



Oberrat Dipl.-Ing. Hans Ulrich Eichelberger

# **Satelliten- und Boden-Mehrpunktmessungen und deren Bedeutung für planetare Atmosphären**

**Magnetfeld- und VLF-Messungen mit Beteiligung an internationalen Projekten**

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

### 1. Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Friedrich  
Institut für Kommunikationsnetze und Satellitenkommunikation  
Technische Universität Graz

### 2. Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Erich Leitgeb  
Institut für Hochfrequenztechnik  
Technische Universität Graz

Graz, November 2017

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

# Vorwort & Danksagung

Ich bin jenen Personen zu Dank verpflichtet die in großartiger und unvergleichlicher Weise geholfen und Zeit aufgebracht haben: Hardware Entwicklungen, Management und Verantwortungen von Özer C. Aydođar bei Cluster-, Doublestar- und Rosetta-Magnetometern waren maßgeblich und zugleich die Basis zur Umsetzung eigener Aktivitäten bei diesen Projekten. Gerhard Fremuth war in hervorragender Weise bei PICAM/BepiColombo Arbeiten stets mit Rat und Tat zur Seite. Für ihre aufmunterten Anregungen, Kommentare und konstruktiven Kritiken danke ich Irmgard Jernej, Mohammed Y. Boudjada, Gustav Prattes, Karl Mocnik, Werner Zambelli, Helmut Feldhofer und Daniel Stock. Betreuer und Kollegen halfen großzügig bei den technischen und wissenschaftlichen Einzelheiten: Konrad Schwingenschuh war "Mastermind" bei allen Projekten, die Professoren Willibald Riedler, Erich Leitgeb, Martin Friedrich und Klaus M. Torkar trugen im großen Maße – sei es direkt oder indirekt – zur Genauigkeit und Klarheit der Thematik bei, indem sie Entwürfe durchsahen oder in Diskussionen richtungsweisend waren. Für wertvolle Anregungen in der Hardware und Magnetometrie danke ich Ingo Richter, Chris Carr, Patrick Brown, Uli Auster, Karl-Heinz Fornaçon, Manfred Steller und Werner Magnes mit ihren Teams, Gerhard Berghofer, Hannes Leinweber und Edita Georgescu. Unschätzbare Einsichten in kosmologische Belange erhielt ich durch das "Alpbach Demon Team" – Carina, Alicia, Pedro, Mareike, Francesca, Mike, Vincent, Fabio M., Michał, Carlos, Fabio N., Linda und Ming – und durch Günther, Yannick, Peter und Andrea; unterstützt durch die Agentur für Luft- und Raumfahrt der FFG (Michaela Gitsch, Johannes Ortner, Harald Posch). Ich bin Wolfgang Baumjohann – Direktor des IWF's – für zahlreiche Unterstützungen außerordentlich dankbar. Schließlich danke ich der Plasma Gruppe, namentlich Rumi Nakamura, Martin Volwerk, Daniel Schmid, Tielong Zhang, Zoltan Vörös und Andrei Runov für ihre Anregungen und Seminare. Ich wünsche auch meine Hochachtung gegenüber Personen auszudrücken, deren vorteilhafte Reaktionen den fortwährenden Antrieb lieferten, speziell Sigrid Zehetleitner, Cosima Muck, Sonja Neukirchner, Claudia Grill, Alexandra Scherr, Ute Nischelwitzer-Fennes, Doris Hradecky, Barbara Flock, Elvira Tschachler und Kolleginnen in [Jetzl et al., 2005], weiters Gerald Kögler, Martin Pitterle, Wolfgang Voller, Hannes Gröller und Daniel Wolbang. Manfred J. Stachel und Bruno P. Besser haben zur Klärung strittiger Punkte unverzichtbar beigetragen, Projektphasen mit Zuversicht und Aufgeschlossenheit begleitet und sich auf vielfältige Art und Weise verdient gemacht. Das Vergnügen, das mir unsere Diskussionen und Disputationen am runden Tisch bereiteten, gehört mit zu den unvergeßlichen Belohnungen und bleibt im Bewußtsein erhalten. Generell gaben Herbert I. M. Lichtenegger und Magda Delva wertvollste Anregungen zur Behandlung der Grundideen, lieferten ex cathedra konstruktive und zugleich kreative Vorschläge, dafür gebührt ihnen tiefster Dank. An Einzelpersonen und Organisationen geht meine Anerkennung für die Erlaubnis Abbildungen reproduzieren zu dürfen, darunter NASA, ESA, Bibliotheken, Archive und Museen. Literaturhinweise inkl. häufiger Nachschlagewerke wurden am Ende der Arbeit zusammengestellt. Der Liste liegt nicht die Absicht zugrunde in irgendeiner Weise vollständig zu sein. Sie enthält im Großen und Ganzen die Publikationen die in Laufe der Zeit verwendet wurden und soll deshalb ein Anerkenntnis diesen Quellen gegenüber sein.

Ludwig Josef Johann Wittgenstein (1889 – 1951) in Logisch-philosophische Abhandlung:

*... was ich hier geschrieben habe macht im Einzelnen überhaupt nicht den Anspruch auf Neuheit; und darum gebe ich auch keine Quellen an, weil es mir gleichgültig ist, ob das was ich gedacht habe, vor mir schon ein anderer gedacht hat.*

Speziellen und herzlichsten Dank an meine Eltern Anna und Gerhard Eichelberger und an meinen Bruder Gerhard, ihnen ist diese Arbeit gewidmet!

# Kurzfassung – Abstract

Im Zentrum dieser Arbeit sind fassettenreiche Perspektiven auf wissenschaftliche Mehrpunkt-Missionen, und damit einhergehenden stationären und Satelliten-Experimenten, mit dem Ziel, das systematische Verhalten von Instrumenten zu verbessern um damit planetare Atmosphären detaillierter charakterisieren zu können. Parallel zu theoretischen Betrachtungen wird basierend auf Erfahrungen bei Cluster, DoubleStar und Rosetta die Qualität von magnetischen Messungen erörtert. Neben herkömmlichen Standard-Parametern sind wichtige Punkte dabei die genaue Bestimmung von Bandbreite, Frequenzverhalten und Abtastrate, speziell in Abhängigkeit von Temperatur und Magnetfeld. Trotz nominell identer Bauweise, d. h. gleicher Hardware, sind bei hohen zeitlichen Auflösungen die Instrumente minimal unterschiedlich, Einflüsse vom Satelliten selbst und den Instrumenten, z. B. unterschiedliche Moden, verändern das Verhalten nochmals zusätzlich. Systems Engineering Aktivitäten sind dargelegt für eine kosmologische Studie und ein akustisches Experiment für den Saturnmond Titan, weiters werden Hardware- and Software-Simulations Resultate für ein Teilcheninstrument auf BepiColombo gezeigt. Kontinuierliche terrestrische lithosphärische-atmosphärische Messungen im Zusammenhang mit Längstwellen-Ausbreitung liefern komplementäre Ergebnisse für sub-ionosphärische Bereiche. Höhere Integration und kleinerer Strukturen, u. a. bei Halbleitern, ergeben phantastische Möglichkeiten, stellen allerdings durch experimentelle Komplexität und systematische Einflüsse auf Meßgrößen auch zunehmend begrenzende Faktoren dar – zusätzlich zu Massen-, Leistungs- und Datenraten-Limitierung als systemrelevante Randbedingungen. Diese Abhängigkeiten und Verzahnungen gilt es durch innovative Methoden, erwähnt sei eine Instrumenten-Moden Optimierung nach gezieltem Einsatz von EMV-Messung in der Entwicklungsphase, zu bestimmen, und nachfolgend in der Auswertung, z. B. bei der Ableitung von Vektorgrößen bei Multi-Satelliten-Missionen, zu berücksichtigen.

The focus in this work is on scientific ground- and space missions, in particular some versatile perspectives on multi-point experiments, with one of the goals to enhance the systematic behaviour of the instruments in order to improve the characterisation of planetary atmospheres. After theoretical considerations the quality of magnetic field measurements is discussed, all based on experience with Cluster, DoubleStar, and Rosetta. Beside the usual standard parameters, crucial points are the exact determination of bandwidth, frequency behaviour, and sampling rate, in particular with regard to temperature and the magnetic field itself. Despite nominally identical design, i. e. exact match in hardware, in high temporal resolution the instruments (incl. their modes) behave slightly differently – in some sense unique with own fingerprints – and an influence is also from the satellite itself. Systems engineering activities are outlined for a space probe with cosmological scientific background and an acoustical experiment for the Saturnian moon Titan, furthermore hardware- and software-simulation results for a particle instrument on BepiColombo are shown. Long term lithospheric-atmospheric measurements in the frame of very low frequency wave propagation yield complementary results for terrestrial missions. High integration and small structures of semiconductors enable fantastic possibilities, but come together with experimental complexity and systematic influences on measurement parameters, in addition to system-relevant constraints on mass, power, and data rate. These dependencies and interlockings have to be overcome by innovative methods, e. g. just to mention an instrument mode optimization based on EMC measurements during development phase or throughout scientific data processing if vector parameters are derived by multi-satellite missions.

Karl Raimund Popper (1902 – 1994):

*Science may be described as the art of systematic over-simplification.*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung, Einleitung, Raison d'être der Arbeit</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Magnetfeldmessungen mit Satelliten</b>	<b>4</b>
2.1	Gesamtkonzept des Cluster Fluxgate-Magnetometers	4
2.2	Cluster FGM – ADC Platine	6
2.2.1	Allgemeines	6
2.2.2	Design und Herstellung	6
2.2.3	ADC Platinen Tests	6
2.3	Cluster FGM – Resultate der Frequenzanalyse	10
2.4	DoubleStar TC1- und TC2-Magnetometer – Abtaste und Bandbreite	13
2.4.1	DoubleStar TC2 Despiking, Einzelsensor	15
2.4.2	DoubleStar TC1 Despiking Gradiometer Methode	16
2.5	Rosetta RPC-Mag – Abtaste und Bandbreite	18
<b>3</b>	<b>BepiColombo PICAM Instrument</b>	<b>24</b>
3.1	Ionenoptik-Simulation bei PICAM/BepiColombo	24
3.2	EMV Messungen bei PICAM/BepiColombo	24
3.3	EMV Messungen bei MAREMF/Mars-96 und ASPOC/MMS	24
<b>4</b>	<b>Boden-Messungen in einem Mehrpunkt-Netzwerk</b>	<b>31</b>
4.1	Längstwellen-Messungen	31
4.1.1	Netzwerk und Resultate	31
4.1.2	Atmosphärische Untersuchungen	33
4.1.3	Solar Flare Studien	33
4.1.4	Seismo-elektromagnetische Untersuchungen	46
4.2	Modell für Schumann-Resonanz	51
<b>5</b>	<b>Projektstudien – TandEM/TSSM und Demon</b>	<b>53</b>
5.1	TandEM / TSSM – Multi-Mikrophon Instrument ACU	53
5.2	Demon – Missionsstudie für kosmologische Untersuchungen	60
<b>6</b>	<b>Schlußbetrachtungen, Zukunftsperspektiven, Ausblick</b>	<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Theoretische Betrachtungen</b>	<b>64</b>
A.1	Dunkles Universum, Lichtablenkung, Magnetfeld und Techniken	64
A.1.1	Dunkle Energie, Dunkle Materie	64
A.1.2	Gravitative Lichtablenkung, Gravitationslinsen	74
A.1.3	Kosmische Evolution mit Galaxienhaufen	91
A.1.4	Magnetismus	102
A.1.5	Galaktische, extragalaktische, interstellare, initiale Felder – Dynamos	106
A.1.6	Geomagnetismus	121
A.1.7	Meßmethoden und Instrumente	129
A.1.8	Systemkonzepte für weltraumtaugliche Magnetometer	130

A.1.9	Quantenmechanik, Klassische- und Relativitäts-Theorie	132
A.2	Magnetosphäre und Plasma	145
A.2.1	Plasmabeschreibungen: Einzelteilchen, MHD, Kinetik	145
A.2.2	Sonne	147
A.2.3	Sonnenwind, interplanetarer Raum, Heliosphäre	164
A.2.4	Magnetosphäre und Ionosphäre	172
A.2.5	Solar-Terrestrische Beziehung, Space Weather	176
A.2.6	Epilog – Troposphäre, Ionosphäre, Entfernungsmessung	188
A.3	Koordinierte Mehrpunktmessungen	189
A.3.1	Mehrpunktmessungen allgemein	189
A.3.2	Mehrpunktmessungen mit Satelliten	190
A.4	Cluster	194
A.4.1	Hintergrund zur Cluster Mission	194
A.4.2	Wissenschaftliche Zielsetzungen von Cluster	196
A.4.3	Cluster Nutzlast	196
A.4.4	Cluster Orbit und Missionsplan	198
A.4.5	Satelliten und Nutzlast Operationen während der Mission	198
A.4.6	Datensystem von Cluster	198
A.4.7	Wissenschaftliche Vorbereitungen und bodengestützte Messungen	199
A.4.8	Cluster Satelliten	200
<b>B</b>	<b>Hardware-Tests, EMV, SEE, Zuverlässigkeit</b>	<b>204</b>
B.1	Elektromagnetische Verträglichkeit, Störgrößen, transiente Signale	204
B.1.1	Allgemein	204
B.1.2	EMV Spezifikation von Satellitenbaugruppen	204
B.1.3	Elektromagnetische Beeinflussung	206
B.1.4	Transiente impulsförmige Signale: Blitze, Schaltspannungen, Kurzschlüsse	208
B.2	Single Event Effekte, Strahlungsbelastung, Versetzungsfehler	212
B.2.1	Single Event Effekte	212
B.2.2	Strahlungsbelastung, Versetzungsfehler	213
B.2.3	Ursachen und Tests hinsichtlich SEE	214
B.3	Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit	214
B.3.1	ADC Definitionen	219
<b>C</b>	<b>Software und Datenverarbeitung</b>	<b>222</b>
C.1	Systems Engineering	222
C.2	Digitale Frequenzanalyse und Meßmethoden	223
C.2.1	Abtastrate und Bandbreite bei Cluster FGM	223
C.2.2	Dual Magnetometer Technik – Gradiometermethode	231
C.2.3	FGM Kompensationsfilter, Transferfunktion	233
C.2.4	Störspannungen im dynamischen Spektrum – Orbit	240
C.2.5	Kalibration für spezielle Events und kurze Zeiträume	240
C.3	Datenverarbeitung und Datenauswertung	240
C.3.1	Rohdatenauswertung	240
C.3.2	Visualisierung, Präsentation über Webinterface	244
C.3.3	Wissenschaftliche Datenauswertung – Mehrpunktalgorithmen	245

# Kapitel 1

## Aufgabenstellung, Einleitung, Raison d'être der Arbeit

Im Jahr 2000, zu Beginn des neuen Millenniums, wurden die Satelliten der ESA Mission Cluster in elliptische, polare Erdorbits gestartet um erstmals Mehrpunkt-Messungen in der Magnetosphäre durchzuführen, mit denen man räumliche und zeitliche Phänomene in erdnahen Plasmapopulationen unterscheiden kann. Die dafür notwendige Voraussetzung, um diese Aufteilung vornehmen zu können, sind mindestens vier Satelliten (Quartett mit variabler Tetraederkonfiguration) mit entsprechender Nutzlast. Das Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (IWF - ÖAW) ist dabei mit mehreren Experimenten beteiligt. Eines davon sind die Fluxgate-Magnetometer (FGM) auf den vier Satelliten. Nach dem Fehlstart der Mission mit dem Arianeflug 501 im Jahre 1996 und dem Beschluß, die Mission nochmals zu starten, konnte der Autor am Neubau der Magnetfeldinstrumente, insbesondere der ADC-Platine im Bereich der Hardware und an der Kalibrierung des Instrumentes, mitwirken. Relevant – speziell für zeitlich hochaufgelöste Daten aller 4 S/Cs – waren die Bestimmung von Frequenzgang, Abtastrate und differentieller Phasenverschiebung sowohl im Burst- als auch im Normal-Mode. In der Kalibration kann durch ein Korrekturfilter dieses Verhalten berücksichtigt werden. Regelmäßige Datenprodukte in der Science-Phase der Mission sind die Berechnungen von Vektorparametern (Curlometer-Technik).

Bei der Doublestar Mission (ähnliche FGMs wie bei Cluster) wurden Abtastrate und Bandbreite für beide Satelliten (TC1 & TC2) exakt bestimmt. Eine Software für die Korrektur von Magnetfelddaten aufgrund nichtkompensierter Stromkreise in der Verkabelung der Solarpaneele (bei TC1) wurde implementiert, eine weitere Software in der Datenauswertung übernimmt die Entfernung von Störspitzen (Anwendung der Gradiometer-Technik).

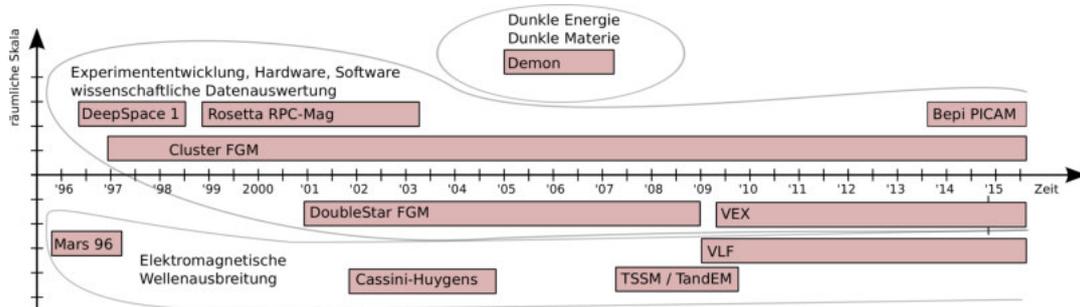
Bei Rosetta RPC-Mag ging es in den Anforderungen primär um Kalibration und Software. In der Entwicklung wurden Abtastrate und Bandbreite für alle Kombinationen von Sensor und Datenverarbeitungseinheit (DPU) ermittelt. Im Flug konnten Störungen in den Magnetfelddaten aufgrund von Reaction-Wheel Einflüssen des Satelliten charakterisiert werden, sichtbar als Aliasing-Effekte im dynamischen Spektrum.

Beim Instrument PICAM auf BepiColombo wurden Messungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und Simulationen der Ionenoptik durchgeführt. Aufgrund dieser Arbeiten konnte eine Verbesserung resp. Optimierung eines Ablenkspiegels realisiert werden (immer unter der Prämisse von Zuverlässigkeit, Zeit- und Kosten-Beschränkungen). Aufwendige EMV-Messungen waren zudem bei den Instrumenten ASPOC/MMS – ebenfalls eine 4 S/C Mission – notwendig.

Systems-Engineering Aktivitäten wurden durchgeführt für (i) ein akustisches Mikrophon-Array konzipiert für die Atmosphäre des Saturnmondes Titan – TandEM/TSSM – und (ii) eine Studie für eine Satellitenmission – Demon – im Bereich Kosmologie mit Bezug zu Dunkler Energie und Dunkler Materie.

Im Bereich der Längswellen-(VLF)-Ausbreitung wird eine permanente Empfangsstation betrieben, zugleich ist sie eingebettet in ein internationales Netzwerk (Hard- und Software-Aktivitäten des Autors). In diesen Studien geht es um die Charakterisierung von Variationen des VLF-Wellenleiters, gebildet durch Lithosphäre/Erdoberfläche und Ionosphäre (D/E-Schicht), wissenschaftliche Ziele sind u. a. Solar-Flare Studien und seismo-elektromagnetische Untersuchungen.

Der Zweck/Fokus dieser primär technisch-experimentellen Arbeit ist die Darstellung der Aktivitäten über diese längeren Phasen hinweg, beginnend mit dem Bau der Cluster-Hardware im Jahre 1997, bis zur Weiterentwicklung, Realisierung und Verfeinerung von Hard- und Software für verwandte Missionen. Die gesammelte Erfahrung verdeutlicht die Notwendigkeit, daß nur durch detaillierte Kenntnis der Instrumente es letztendlich möglich ist optimale Resultate – ein Maximum an Information, Aussagekraft, Erkenntnis, letztlich neues Wissen – zu erzielen. Die variierenden Parameter der Instrumente müssen in der Kalibration exakt spezifiziert werden um neuralgische Punkte und Abhängigkeiten bestimmen zu können. Abbildung 1.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der durchgeführten Arbeiten, Tab. 1.1 die Aufschlüsselung von Projekten – Mehrpunkt Aspekten – Atmosphären-Gesichtspunkte, Kap. 2 Resultate bei Magnetfeld-Instrumenten, Kap. 3 Simulationsergebnisse bei einem Teilchenexperiment, Abschnitt 4 diskutiert sub-ionosphärische VLF Langzeitmessungen (ausgewählte Einzelereignisse und Statistiken) und Kap. 5 erörtert Studien verbunden mit zukünftigen Experimenten und Missionen. Schlußbetrachtungen/Ausblicke in Abschnitt 6 sind Perspektiven gewidmet. Im ergänzenden Anhang Kapitel A werden grundlegende Begriffe



**Abbildung 1.1:** Grobe Zeitstruktur der durchgeführten Hardware-, Software-, Management-Arbeiten und Systems Engineering Aktivitäten an Instrumenten einzelner Missionen. Zusätzlich zu Cluster, DoubleStar und Rosetta wurden Tests für MMS/ASPOC (EMV) durchgeführt und Untersuchungen bei Mars-96 (EMV), DeepSpace 1 (ADC Elektronikplatine), Cassini-Huygens (Schumann Resonanzen) unternommen. Ein Missionsvorschlag – Demon (Dark Energy and Matter Observational Nexus) – im Bereich Astrophysik und Kosmologie zur Bestimmung der Eigenschaften von Dunkler Energie und Dunkler Materie wird dargestellt. Diese Erfahrungen sind Katalysatoren für Projekte bei Venus Express (Software; Daten nach einer Aerobreaking-Phase bis 28 Nov. 2014, danach finale Archivierung), TandEM/TSSM (Systems Engineering), PICAM (Software-Simulationen, EMV) auf BepiColombo und VLF (Längstwellen-Meßstation zur Charakterisierung des Wellenleiters gebildet aus Erdoberfläche/Ionosphäre, z. B. Solar-Flare Studien oder seismoelektromagnetische Untersuchungen).

erläutert, die theoretischen Betrachtungen gelten der Kosmologie und dem Magnetfeld wie es sich für Mehrpunkt-Beobachtungen darstellt. Weiters wird auf Projekte eingegangen bei denen der Autor in unterschiedlicher Form (durch Freiraum bei Experimenten) mitarbeiten und diverse Forschungen und Untersuchungen durchführen konnte. Die nachfolgenden Kap. B und C sind den Hardware- und Software-Anforderungen von Instrumenten und der wissenschaftlichen Datenauswertung gewidmet.

Uriels Arie in Franz Joseph Haydn's (1732 – 1809) Oratorium in drei Teilen "Die Schöpfung".

*Nun schwanden vor dem heiligen Strahle // Des schwarzen Dunkels gräuliche Schatten:  
Der erste Tag entstand. // Verwirrung weich, und Ordnung keimt empor.*

Die aktuelle und vergangene Entwicklung auf dem Gebiet der Weltraumforschung ist extrem umfangreich, mit einem riesigen Spektrum in der Grundlagen- und angewandten Forschung, einige Daten, Fakten und Namen verdienter Protagonisten mit ihrem Opus magnum werden erwähnt, siehe [Stock et al., 2014]. Meist hatten sie die Tatkraft von Visionär(inn)en, waren Vorreiter(inn)en, legten den Grundstein in ihrer Disziplin und haben die Zukunft aktiv gestaltet oder gar vorweggenommen. Manchmal diente das Österreichische Biographische Lexikon 1815-1950 (ÖBL) der ÖAW als Informationsquelle, ebenso diverse Internet-Such-

Nr.:	Matrix Projekt, Mission	Mehrpunkt Aspekte	Bedeutung für planetare Atmosphären
1	Cluster FGM	4 Punkt-Mission koordiniert	Magnetosphäre-Ionosphäre Kopplung
2	Doublestar FGM	2 Punkt-Mission	Magnetosphäre-Ionosphäre Kopplung
3	Rosetta RPC-Mag	2 Punkt-Mission mit Romap	
4	PICAM BepiColombo	1 Punkt Teilcheninstrument	Atmosphäre Merkur
5	VLF Messungen	8/12+ Multi-Punkt Netzwerk	Terrestrische Atmosphäre/Ionosphäre
6	TandEM/TSSM ACU	4 Punkt Mikrophon-Array	Atmosphäre des Saturnmondes Titan
7	Demon	1 Punkt Teleskop	(Sternatmosphären)

**Tabelle 1.1:** Matrix: Mehrpunkt-Projekte in dieser Arbeit und ihre Bedeutung für Atmosphären. Siehe ebenfalls koordinierte Mehrpunktmessungen Kap. A.3, Cluster-Doublestar FGM Synergien Abb. C.15,  $\gamma$ -ray Burst als Quelle für radiolytische Reaktionen auf Oberflächen und in Atmosphären im äußeren Sonnensystem Abb. 5.8 (Einzelpuls  $\rightarrow$  mehrere Objekte).

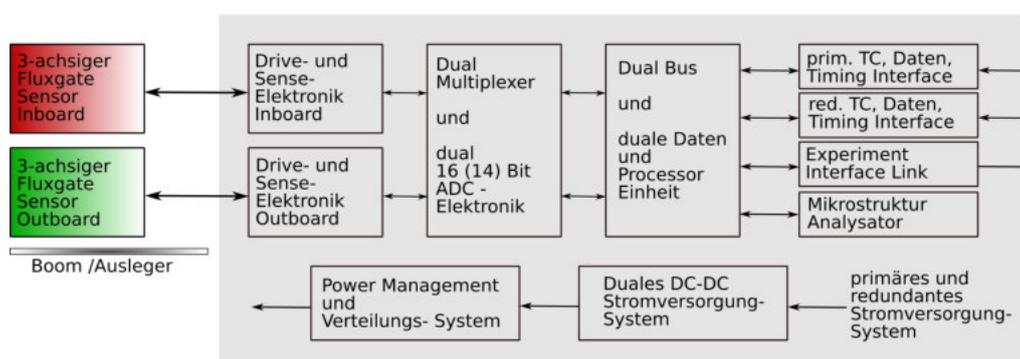
maschinen. Wenn somit der Verfasser ab und zu einen ergänzenden Blick auf soziale, ökonomische, religiöse und kulturelle Hintergründe und Geschichte(n) wirft, so ist es nicht rein um der Vergangenheit willen, diese Betrachtungen legen zur Gegenwart und Zukunft eine zeitliche Distanz und ermöglichen zugleich wieder neue Annäherungen, Perspektiven und Sichtweisen.

## Kapitel 2

# Magnetfeldmessungen mit Satelliten

### 2.1 Gesamtkonzept des Cluster Fluxgate-Magnetometers

Jeder der vier Cluster Satelliten (Rumba, Salsa, Samba und Tango) trägt nominell identische Instrumente, siehe Tab. A.13 und für die Mission Kap. A.4, darunter auch die vier Fluxgate-Magnetometer (FGM) zur Messung des magnetischen Feldes entlang der leicht unterschiedlichen Orbits. Das FGM besteht aus den beiden dreiachsigen Sensoren, montiert auf den Auslegern der S/C und der Elektronikbox auf der Hauptplattform. Das Blockdiagramm in Abbildung 2.1 zeigt die wesentlichen Komponenten eines Cluster Magnetometers.



**Abbildung 2.1:** Blockdiagramm eines Cluster Fluxgate Magnetometers. Deutlich erkennbar sind die redundanten Strukturen aller Komponenten zur Erhöhung der Ausfallsicherheit (Kap. B.3).

Die Masse der beiden triaxialen Sensoren beträgt 290 g, die thermische Schutzschicht zusätzlich 48 g, die Masse der Elektronikbox 2060 g und die Leistung unter Standardbedingungen ergibt sich zu 2460 mW. Dieses Design des Magnetometers ist ähnlich von vielen bereits erprobten Magnetometern, sei es im Erdorbit oder auch für andere planetare und interplanetare Missionen, siehe Kap. A.1.7. Um das magnetische Eigenfeld und andere Störungen vom Satelliten zu vermeiden, ist der Outboard (OB) Sensor an einem der beiden 5.1 m langen radialen Auslegern montiert, der Inboard (IB) Sensor befindet sich am gleichen Boom, 1.5 m näher am Satelliten. Im wissenschaftlichen Betrieb kann jeder der beiden Sensoren als primär geschaltet werden, der Zweite fungiert parallel als sekundärer Sensor mit geringerer zeitlicher Auflösung. Diese primär/sekundär Festlegung erfolgt durch Telemetriekommandos vom Boden aus. Im Regelfall hat der OB-Sensor die höhere zeitliche Auflösung und ist somit der primäre Sensor.

Die Magnetometer haben acht mögliche operative Bereiche, fünf davon werden von den Cluster Magnetometern verwendet, dargestellt in Tabelle 2.1. Diese Aufteilung stellt die bestmögliche Auflösung sowohl im Sonnenwind, mit Feldern von einigen wenigen Nanoteslas (zwischen 3 – 30 nT), als auch in Regionen mit höheren Feldern im erdnächsten Bereich, dem Perigäum, mit  $\sim 1000$  nT dar. Der höchste Erdfeld-

Bereich	Aussteuerungsbereich (nT)	digitale Auflösung 14 Bit (nT), 16 Bit ADC
2	-64 ... +63.97	$7.8 \times 10^{-3}$
3	-256 ... +255.87	$3.1 \times 10^{-2}$
4	-1024 ... +1023.5	0.125
5	-4096 ... +4094	0.5
6	-16384 ... +16376	2
7	-65536 ... +65504	8

**Tabelle 2.1:** Operative Bereiche für das Fluxgate-Magnetometer mit einem Faktor 4 als Schrittweite; ursprünglich nicht alle in Verwendung aufgrund des Orbits; Bereich 5 seit 2006, Bereich 6 seit 2008 und Bereich 7 zusätzlich (2009) in den erweiterten Missionsphasen.

S/C TM Modes	FGM TM Mode	primärer Sensor (Vek/s)	sekundärer Sensor (Vek/s)
Nom. Modes 1, 2, 3	A	15.519	1.091
Burst Mode 2	B / C	18.341 / 22.416	6.957 / 3.011
Burst Mode 1	D	67.249	7.759
Burst Mode 3	F	(MSA dump)	(MSA dump)

**Tabelle 2.2:** Magnetfeldvektoren in der Telemetrie des Satelliten für die fünf operativen Modes des Fluxgate-Magnetometers.

bereich war lange Zeit während des Fluges nicht in Verwendung. Die Umschaltung zwischen den einzelnen Bereichen erfolgt automatisch, vorgenommen durch die Onboard-DPU (data processing unit), oder ist fest vorgegeben über Telemetrie vom Kontrollzentrum. Im automatischen Mode erfolgt eine up-range Bereichsumschaltung wenn eine Magnetfeldkomponente nahe der Vollaussteuerung ist (Limit 90 %), oder wenn alle drei Komponenten länger als die Telemetrieframe-Periode von 5.15222 s unter das Limit von 10 % fallen (down-range). Cluster FGM verwendet zwei 16 Bit Analog-Digital-Konverter (ADC) im redundanten Betrieb. Von diesen 16 Bit werden die höherwertigen 14 Bit als Magnetfeldwert weiterverwendet. Die digitale Auflösung für die fünf Bereiche des Magnetometers sind in Tabelle 2.1 wiedergegeben, die Telemetrikombinationen in Tab. 2.2.

Das Instrument enthält zwei redundante Datenverarbeitungs-Einheiten, verwendet wird der strahlungsfeste MAS21750 Mikroprozessor mit dem MIL-STD-1750A Befehlssatz. Die DPUs sind gegenseitig und mit anderen Funktionseinheiten verlinkt, Daten- und Adress-Busse sind ebenfalls redundant. Zwei redundante Interface Einheiten empfangen Telecommands (TCs) und senden Daten zur Telemetrie (TM), ebenfalls mittels redundanten primär und sekundär S/C Kommandierungs- und Telemetrie-Schnittstellen. Das interne Power Management System erlaubt mittels TC die Kontrolle von Funktionseinheiten innerhalb der DPU. Die Schalter können automatisch Funktionen in der DPU abschalten wenn zu hoher Strom auftritt. Das Instrument wird von zwei redundanten Leistungseinheiten (power converter units) versorgt. Das gesamte Design hat somit eine hohe fehlertolerante Architektur (siehe Kap. B.3).

Das Sampling der Daten wird von der DPU gesteuert. Die drei Komponenten des magnetischen Feldes werden vom primären Sensor mit einer Rate von 201.75 Hz abgetastet, unabhängig von der übertragenen Telemetrierate, und danach digital gefiltert um die Telemetrierate zu erreichen. Die S/C Telemetrie hat mehrere Moden, entsprechend der unterschiedlichen Daten- und Übertragungs-Rate der Instrumente. Das Magnetometer hat vier Telemetrie-Datenraten, entsprechend dem (i) Nominal Mode (1211.13 bits/s), (ii) Burst Mode 1 (3465.69 bits/s), (iii) Burst Mode 2 (1347.77 bits/s) und (iv) Burst Mode 3 (5583.61 bits/s). Die Telemetrie ist packetorientiert mit einer konstanten Frame-Länge von 5.15222 s, unabhängig von der Telemetrierate. Die Parameter sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. Im Nominal und Burst Mode 2 TM-Mode verwendet das Instrument drei kommandierbare Übertragungsraten, die FGM Telemetrieoptionen A, B und C für den primären und sekundären Sensor und der Datenrate vom Mikrostruktur-Analysator. Im Burst Mode 3, kollektiv für alle Instrumente mit Burst Speicher Kapazitäten, werden die Daten vom Mikrostruktur-Analysator Speicher geladen. Das Magnetometer verwendet eine Filterung mit Gauß'scher

Charakteristik um den Datenstrom vom primären Sensor mit der Bandbreite der Telemetrie abzugleichen. Jedes FGM enthält einen Mikrostruktur Analysator (MSA) samt dazugehöriger Eventsoftware in der DPU um  $\sim 32.000$  Magnetfeld-Vektoren in einem Burst Speicher halten zu können. Gedacht ist der MSA für die Speicherung von kurzen Ereignissen mit Datenraten höher als die Normal- oder Burst-Telemetrierate. Zum Ansprechen muß die magnetische Signatur des Events vorbestimmten programmierbaren Kriterien genügen. Daten vom MSA an die Telemetrie werden entweder im Background Mode, parallel mit den anderen Daten, oder in kurzen Bursts, im Burst Mode 3 der Spacecraft Telemetrie, übertragen. Damit wurde eine beträchtliche Flexibilität im MSA verwirklicht, eine in-flight Optimierung ermöglicht das Erkennen von Klassen kurzzeitiger Ereignisse.

## 2.2 Cluster FGM – ADC Platine

### 2.2.1 Allgemeines, IWF Beteiligung

**Hardware** Die Beteiligung des IWF's an den FGM Instrumenten konzentriert sich auf die ADC-Platinen. Im Normalbetrieb ist nur ein ADC in Verwendung, die zweite Einheit arbeitet redundant. Für spezielle Anwendungen ist ein paralleler Betrieb vorgesehen. Die ADC-Chips haben eine Auflösung von je 16 Bit. Zusätzlich sind beide Chips mit Abschirmungen aus Tantal ( $^{73}\text{Ta}$ ) versehen. Die redundanten Eingangsmultiplexer der ADC-Platine übernehmen Signale von beiden dreiachsigen Sensoren und zusätzlich Signale für Statusinformationen, d. h. Werte von Temperaturfühlern und bestimmten Spannungspunkten. Nach der analog-digital-Umsetzung durch die ADC-Chips, gesteuert durch integrierte anwendungsspezifische Bausteine (ASICs), liegt das digitale Signal für die Recheneinheiten und TM vor. Besonderes Augenmerk bei dieser Entwicklung liegt auf Optimierung für Zuverlässigkeit bei gleichzeitig minimalem Leistungsverbrauch. Die Anforderung an die Chips und Platine, die Auswahl der Komponenten, Layout, Testmethoden und Entwicklungsschritte sind kurz dargestellt in [Aydogar et al., 1994].

**Software** Sämtliche Software für die Entwicklung der ADC-Platine wurde am Institut erstellt und adaptiert. Auf Instrumentenebene wird an der Kalibrierung, sowohl auf der Erde (Bodenkalibration, pre-flight) als auch nach dem Start (Flugkalibration und Interkalibration zwischen den Instrumenten auf den Satelliten, in-flight), aktiv mitgearbeitet. Detaillierte Untersuchungen mittels eigener Software erfolgen für den höherfrequenten Frequenzbereich von Cluster FGM. Dies ist notwendig um im Plasma Wellenausbreitungen oder Turbulenzen exakt charakterisieren zu können, siehe Abschnitt A.4.2. Um Parameter von Sensoren auf Instrumentenebene zu bestimmen wurde entsprechende Software implementiert, z. B. [Eichelberger et al., 1996a] ist generell anwendbar bei Missionen mit Fluxgate Magnetometern.

### 2.2.2 Design und Herstellung

Abbildung 2.2 (links) zeigt die Oberseite der bestückten ADC Platine (Flugmodell 7), Abbildung 2.2 (rechts) die entsprechende Unterseite. Man erkennt die redundanten Strukturen, d. h. zwei parallele Einheiten mit entsprechenden Bauteilen ("cold redundancy"). An der Unterseite der Platine ist eine Versteifung zu erkennen, an der Oberseite die Tantalabschirmung unter der die beiden Analog-Digital-Converter Bausteine aus zwei unterschiedlichen Chargen vom Typ CS5016 liegen. Besondere Vorsicht beim Umgang mit der Platine erfordern die ASICs, eine Zerstörung der Eingänge würde sich – abgesehen von der offensichtlichen Fehlfunktion der Platine – auch in einer leicht erhöhten Stromaufnahme in den Versorgungen bemerkbar machen. Diese zusätzliche Leistungsaufnahme wäre somit ein direkter Indikator für ein fehlerhaftes ASIC in einer der beiden Einheiten. Die Produktion und Bestückung der Platinen wurde von Schrack Aerospace (danach Austrian Aerospace und nunmehr RUAG Space GmbH) in Wien durchgeführt.

### 2.2.3 ADC Platinen Tests

Ein 80386 Notebook, zusammen mit einem Routing Bus Simulatorboard auf einer Erweiterungskarte ("expansion box") vom Imperial College London (ICL) Space and Atmospheric Group, wird verwendet, um

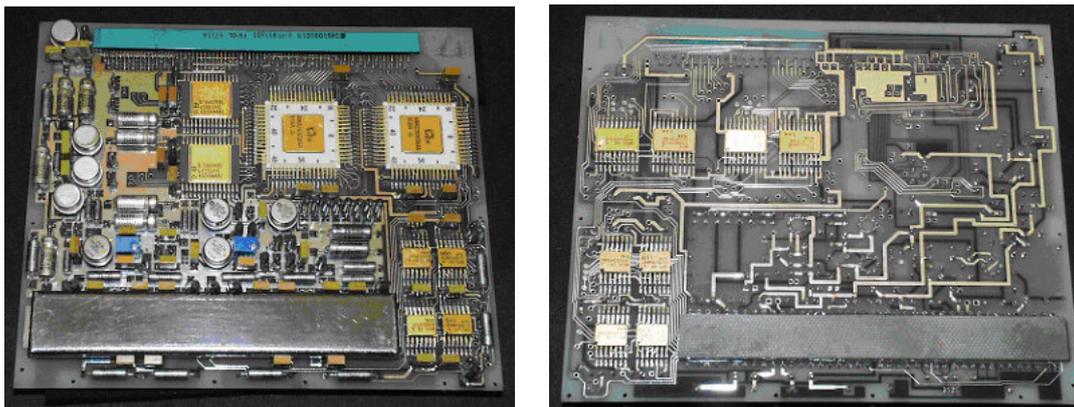
Kanal Nummer dezimal (hex)	Name, Bezeichnung	Beschreibung
0 / 1 / 2	OBx / OBy / OBz	Outboard xyz-Achse
3 / 4 / 5	IBx / IBy / IBz	Inboard xyz-Achse
6 / 7	Power 1 / Power 2	Leistungsmesspunkte 1, 2
8	Temp 2	Temperaturmesspunkt 2
9	AGnd	Analog Ground
10 (a)	Power 3	Leistungsmesspunkt 3
11 (b)	+4.5 V	VRef; Referenz-Spannung
12 (c) / 13 (d)	-2.5 V / +2.5 V	VA-/2 / VA+/2 Analog-Spannung
14 (e) / 15 (f)	AGnd	Analog Ground

**Tabelle 2.3:** Spannungskanäle zum Test der ADC Platine; neben den Komponenten der beiden dreiachsigen Sensoren werden zusätzlich Versorgungs-, Referenzspannungen und Massepotentiale mitgemessen.

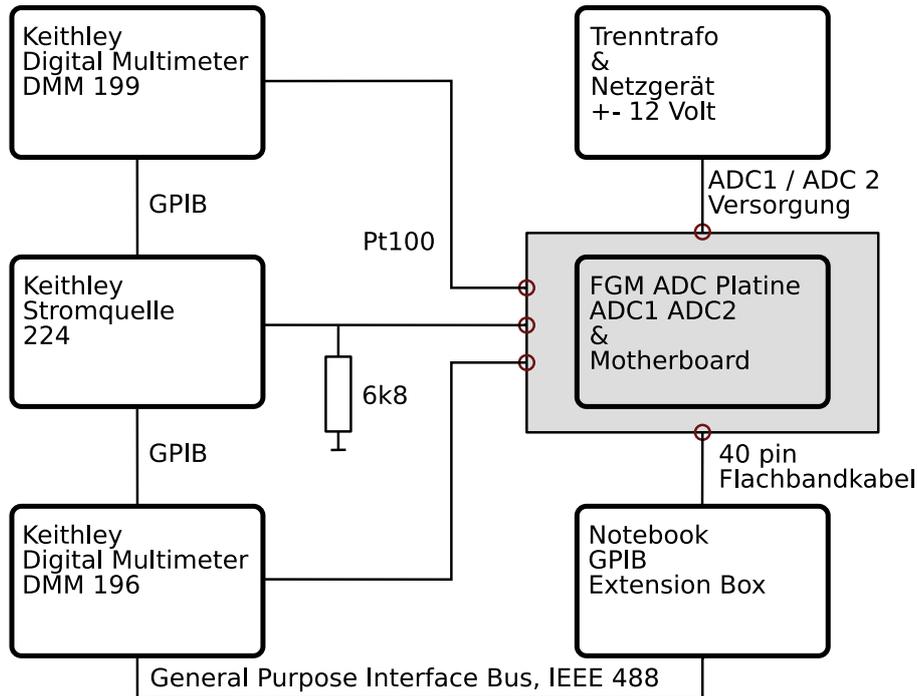
das Datenhandling und die Abtastung auf der Cluster FGM ADC Platine durchzuführen. Das Simulatorboard verwendet immer nur eine ADC Einheit, ein 40 pin Flachbandkabel verbindet ADC1 oder ADC2 mit dem Motherboard. Das Motherboard selbst wird durch eine externe  $\pm 12$  V Versorgung und Trenntrafo angeschlossen. Abbildung 2.3 zeigt das Setup für die Tests an den ADC Platinen.

Die Software für den PC ist in Turbo C++ geschrieben, einige zeitkritische Teile sind in Assembler kodiert. Externe Geräte werden über General Purpose Interface Bus (GPIB) angesprochen, die Programme zur Berechnung und Visualisierung sind in Asyst kodiert. Die Asyst Software enthält aus Geschwindigkeitsgründen keine Abtastroutinen, spezielle TC++ Programme erledigen diese Aufgabe. Die Daten werden auf Harddisk gespeichert und zur Auswertung in Asyst reimportiert. Tabelle 2.3 zeigt die Kanalbelegung des Motherboards: Neben den 3 Kanälen der Sensoren sind die Versorgungsspannungen, Referenzspannungen und Massesignale herausgeführt. Abbildung 2.4 zeigt die Flugplatine F8 aufgesteckt auf der Testvorrichtung. Das Motherboard dient zum Anlegen der Testsignale und zur Ansteuerung über die Erweiterungsbox. Die typischen Bedingungen im Labor zeigt die Darstellung 2.5.

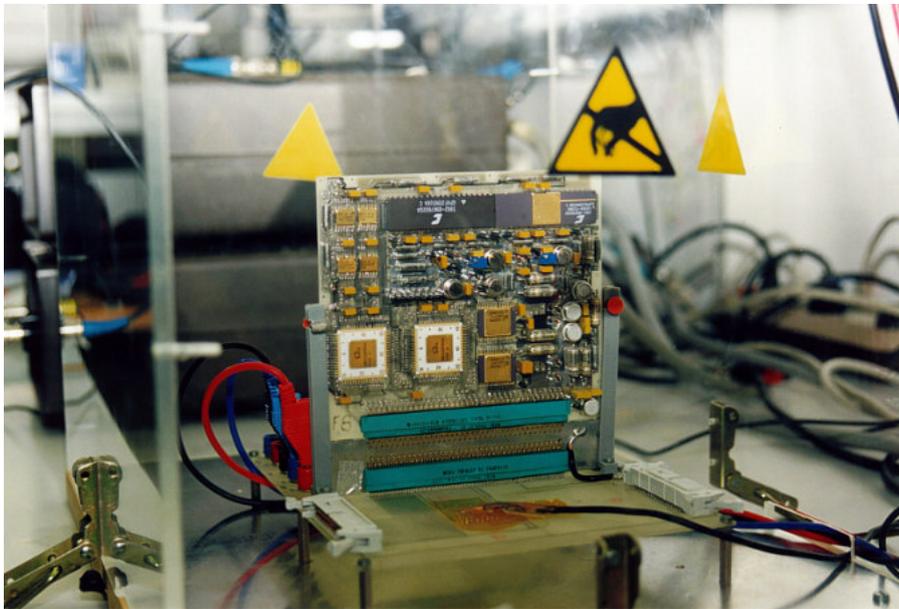
Um die Variationen der elektrischen Parameter bezüglich der Temperatur zu bestimmen benutzt man den Klimaschrank, zusätzlich wird die Luftfeuchte kontrolliert. Abbildung 2.6 zeigt die Platine bei geöffneter



**Abbildung 2.2:** Links: ADC Platine Oberseite, FM7, Unterhalb der aufgeklebten Tantalabschirmung (Bildunterseite) befinden sich die beiden Analog-Digital-Converter CS5016 der Firma Crystal. Deutlich erkennbar sind die redundanten, d.h. doppelt vorhandenen Bauelemente und Einheiten. Rechts: ADC Platine Unterseite, FM7, Rückseite der mehrlagigen Platine mit aufgeklebtem Verstärkungstreifen zur Schwingungsdämpfung, vor allem beim Start – Resonanzen und Vibrationen in kritischen Frequenzbereichen werden damit verhindert – und Bestückung mit Logikbausteinen.



**Abbildung 2.3:** Setup für die ADC-Platinen Tests: Nur das Netzgerät für die ADC-Platine darf vom Trenntrafo gespeist werden, alle anderen Einheiten oder Meßgeräte müssen außerhalb des Versorgungsbereichs liegen, ansonsten wird bei Verbindung mit dem GPIB Bus der ASIC auf der ADC-Platine zerstört.



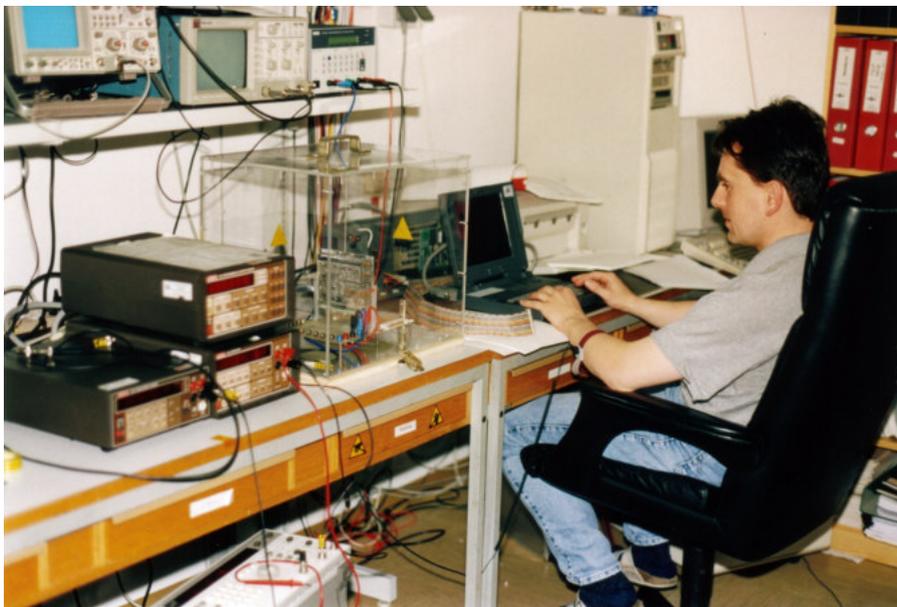
**Abbildung 2.4:** ADC Platinen Test, Flugmodell FM8 auf Testplatine unter Plexiglas-Abschirmung während der Funktionstests im Labor. Die beiden ADCs sind aus verschiedenen Chargen. Zu erkennen sind die leicht unterschiedlichen Gehäuseabmessungen und Aufschriften, die elektrischen Parameter sind ident. Auf das Motherboard ist ein Temperatursensor mittels Kaptonfolie aufgeklebt.

Tür des Klimaschranks vor den Tests im Untergeschoss des (vormalige Bezeichnung) Instituts für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung (INW). Der Test läuft im Bereich von  $-20\text{ °C}$  bis  $+60\text{ °C}$  mit einer Schrittweite von  $10\text{ °C}$ . Alle Steuer- und Meß-Signale werden seitlich in die Kammer eingeschleust, die Steuerung erfolgt mit dem Laptop. Am oberen Rand der Meßkammer ist das elektrochemische Weston-element erkennbar. Es liefert die Normalspannung und besitzt eine minimale Temperaturabhängigkeit.

**ADC Spezifikationen** Die Genauigkeiten, Spezifikationen und Parameter von AD-Umsetzern sind gegeben durch (i) statische Fehler, dazu zählen ( $i_a$ ) der systematische Quantisierungsfehler resultierend in einem Signal-Rausch-Verhältnis  $S/N \approx 6 \times B$ , mit  $B$  als Anzahl der Bits, siehe Gl. B.2, und schaltungsbedingte Fehler wie ( $i_{b1}$ ) Offsetfehler mit einer kontinuierlichen absoluten Abweichung über den Aussteuerbereich (Abhilfe: Abgleich vom Nullpunkt), ( $i_{b2}$ ) Verstärkungsfehler mit kontinuierlicher relativer Abweichung über den Aussteuerbereich (Abhilfe: Abgleich vom Vollausschlag), ( $i_{b3}$ ) gesamte Nichtlinearität und ( $i_{b4}$ ) differentielle Nichtlinearität. Diese Spezifikationen eines ADCs beziehen sich auf ein DC Eingangssignal. Zu den (ii) dynamischen Fehlern zählen ( $ii_a$ ) Fehler aufgrund des vorgeschalteten Anti-Aliasing Filters, ( $ii_b$ ) Aperture Jitter (Unsicherheit des Abtastaugenblickes) und ( $ii_c$ ) Glitches (Störimpulse). Dynamische Charakteristiken sind weiters Kleinsignal- und Großsignal Bandbreite, Anstiegszeit, die Überspannungserholungszeit und effektive Aperturverzögerung (siehe zudem Seite 219 ff.).

Umfangreiche und zugleich zeitintensive Tests wurden durchgeführt um die Parameter der ADC Platinen exakt zu bestimmen und die Funktionsweise unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, d. h. insbesondere Temperaturschwankungen  $\Delta T$  und Variationen der Spannungsversorgung  $\Delta U$ , zu gewährleisten, siehe [Jernej et al., 1991]. Im Einzelnen sind dies, nach Abstimmarbeiten an der Platine wie einstellen und finales verkleben der Potentiometerstellungen:

- Grundlegende funktionale Tests,
- Sync A/B Signal,
- Hold Signal,



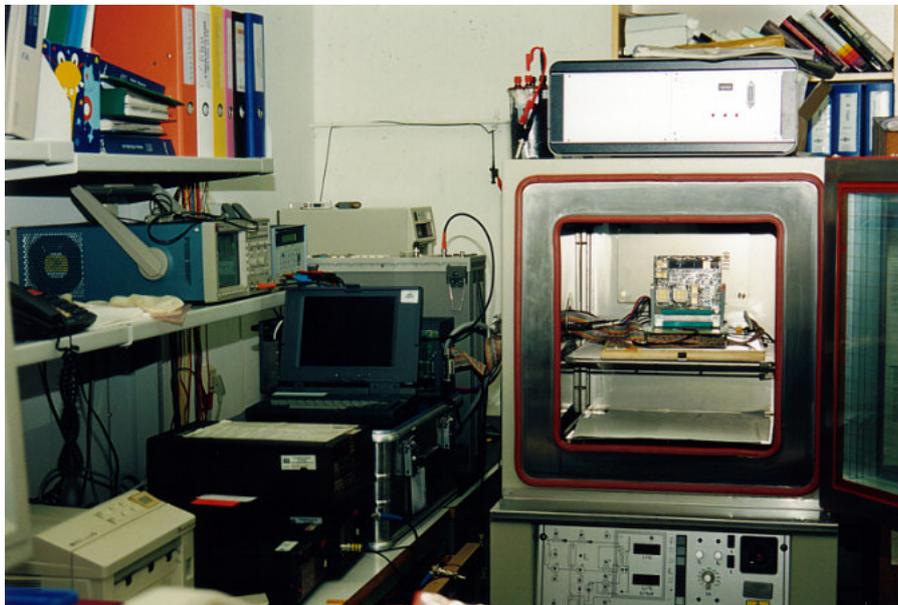
**Abbildung 2.5:** *Meßaufbau zum Test der Clusterplatine. Unter der Plexiglas-Abschirmung befindet sich die ADC-Platine aufgesteckt am Motherboard, extern versorgt mit der Betriebsspannung und den variierenden Testsignalen. Die Steuerung der Platine erfolgt über das Notebook mit externer Erweiterungseinheit und einem Flachbandkabel. Die Meßgeräte werden über GPIB gesteuert.*

- Software Reset,
- Hardware Reset (power on test),
- $\pm 12$  V Leistungsverbrauch und  $\pm 5$  V Analog / Digital Spannungen,
- Referenz Spannung  $+4.5$  V und  $\pm 2.5$  V Multiplexer Eingangssignal,
- Übersprechen / Kopplung auf andere, vor allem räumlich benachbarte, Leitungen (Crosstalk),
- Fast Fourier Transformation (FFT) und Signal/Rausch-Verhältnis (SNR),
- Linearitäts-Messungen (Rampenverlauf des Eingangssignals),
- Temperatur Tests zwischen  $-20$  °C und  $+60$  °C, Schrittweite  $10$  °C.

Die Grafiken 2.7 sind ein repräsentativer Querschnitt der Ergebnisse von den ADC-Board Tests. Die Tabelle 2.4 zeigt typische Werte für eine ADC Platine, d. h. der Unterschied zwischen statischem und dynamischem Verhalten ist meßbar, wenn auch minimal. Wie zu erwarten zeigen die fünf ADC Platinen, vier Flugmodelle und eine Ersatzeinheit, idente Charakteristiken. Die Tantalabschirmung der ADC Bausteine – Tantal aufgrund seines hohen spezifischen Gewichtes – schlägt sich mit gemessenen 53 g zu Buche. Deutlich erkennbar ist die nahezu vollständige Symmetrie der beiden Einheiten – Unit 1 und Unit 2 – in den elektrischen Parametern. Letztendlich, ab einer bestimmten Auflösung, hat aber jede Einheit ihren eigenen charakteristischen "Fingerabdruck" und damit ein eigenes systematisches Verhalten bei nominell identer Hardware. Diese Feinheiten in den Parametern müssen in der Kalibrierung berücksichtigt werden, speziell bei hoher zeitlicher Auflösung der Magnetfeldwerte.

### 2.3 Cluster FGM – Resultate der Frequenzanalyse

Die Grafiken in Abb. 2.8 (oberes Paneel) zeigen die Amplitudengänge und Eckfrequenzen,  $-3$  dB Bandbreite, für zwei Moden vom FGM, bestimmt aus der digitalen Frequenzanalyse [Eichelberger et al., 1999a].



**Abbildung 2.6:** ADC Platine Test in der Temperaturkammer im Untergeschoß des INW. Auf der linken Seite sind Notebook (386'er), Oszilloskop und Frequenzgenerator zu erkennen, auf der Temperaturkammer steht das elektrochemische Weston-Element (Spannungsnorm).

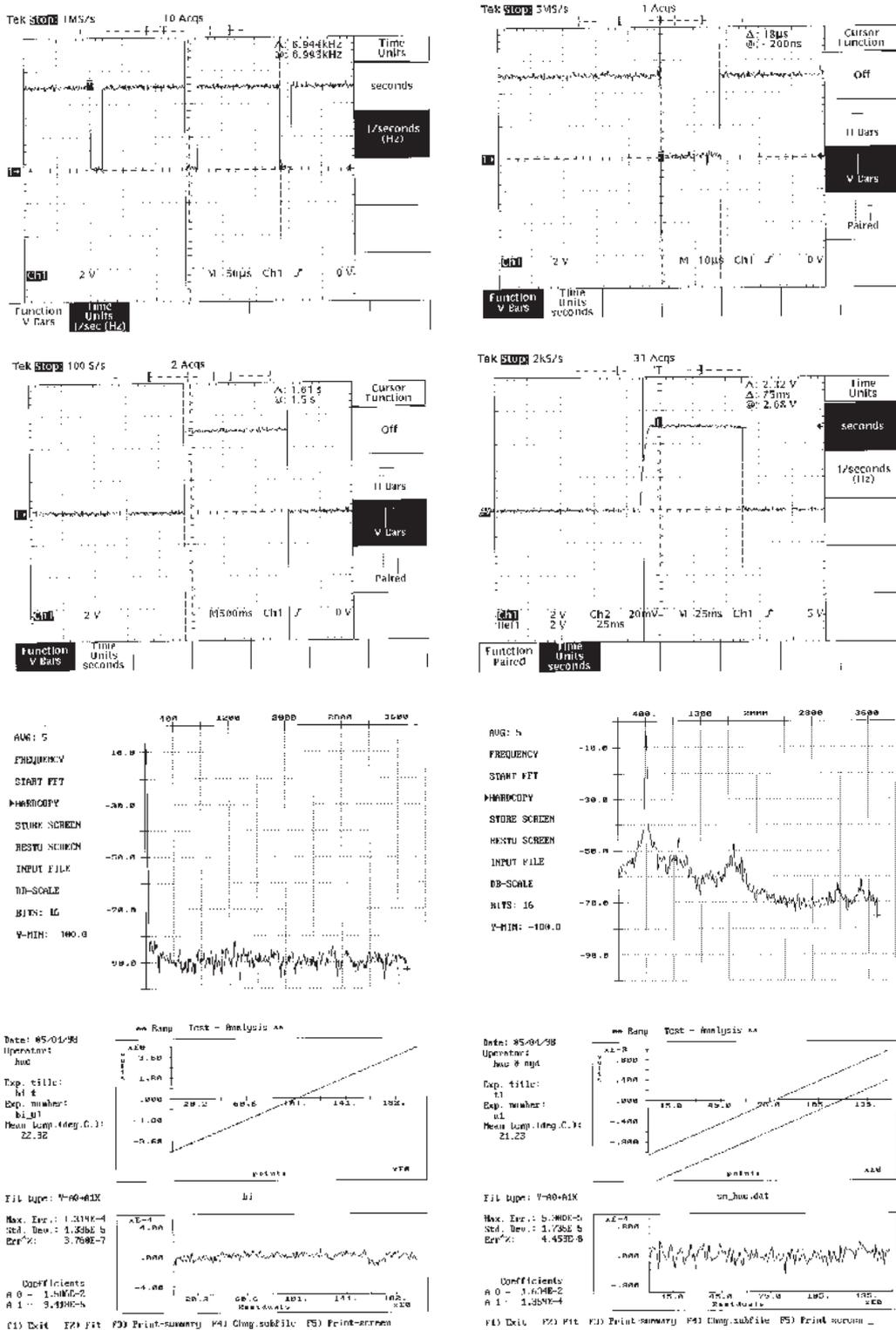
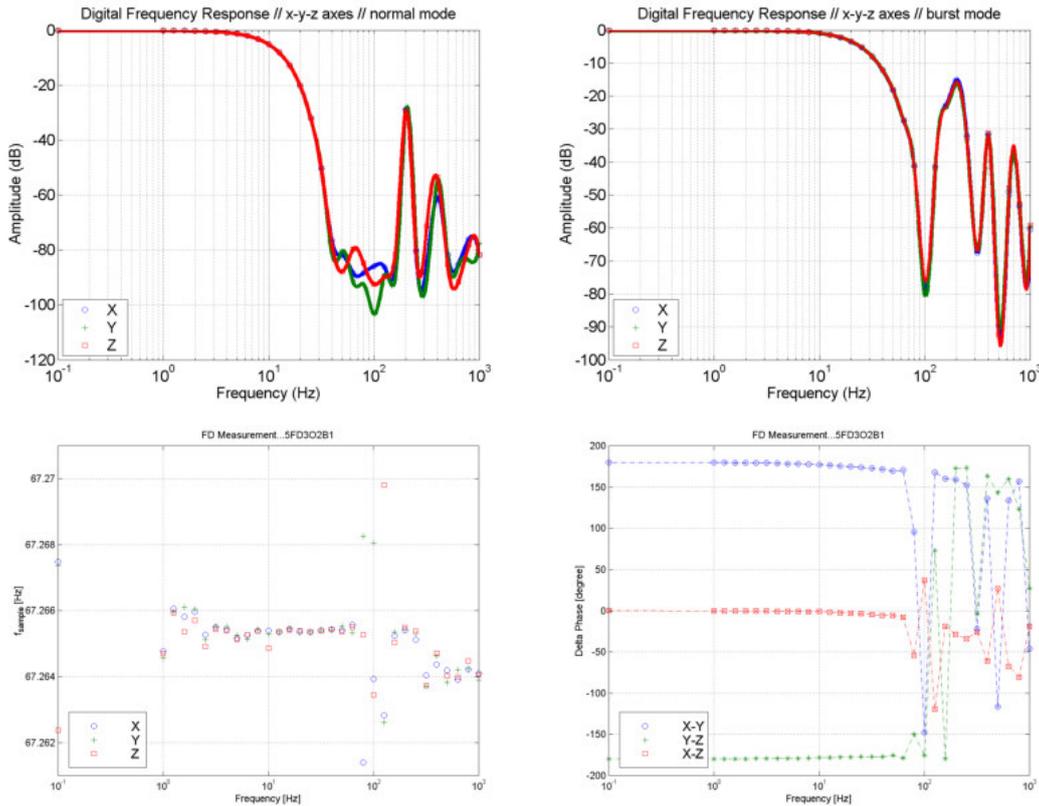


Abbildung 2.7: Cluster FGM ADC-Board Testergebnisse. Erste Zeile: Halte Sequenz und Halte Signal. Zweite Zeile: Software- und Hardware Resets. Dritte Zeile: Dynamisches Verhalten / FFT Test 5 Hz und 400 Hz, 4 Vpp. Vierte Zeile: Linearität / Ramp Test Vollaussteuerung, Linearität / Ramp Test Detail.

board dimensions	length: 139 mm width: 118.5 mm thickness: 1.45 mm	
board weight	without Ta shielding 139 g, with shielding 192 g	
	Unit 1	Unit 2
SW reset (EOC)	1.61 sec	1.61 sec
HW reset (RST)	72 msec	72 msec
+12 V current	static 18.0 mA dynamic 18.6 mA	static 17.3 mA dynamic 18.2 mA
-12 V current	static -12.9 mA dynamic -13.2 mA	static -12.5 mA dynamic -12.8 mA
+5 V	analog static 5.066 V analog dynamic 5.066 V digital static 5.050 V digital dynamic 5.042 V	analog static 5.060 V analog dynamic 5.060 V digital static 5.045 V digital dynamic 5.036 V
-5 V	analog static -4.998 V analog dynamic -4.998 V digital static -4.990 V digital dynamic -4.987 V	analog static -5.026 V analog dynamic -5.026 V digital static -5.018 V digital dynamic -5.015 V
+4.5 V Reference	4.492 V	4.492 V
+2.5 V Mux input	2.531 V	2.528 V
-2.5 V Mux input	-2.496 V	-2.510 V
Temperature		
-20 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 19 mA
-10 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 19 mA
0 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA
+10 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA
+20 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA
+30 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA
+40 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA
+50 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA
+60 °C	-12 V: 12 mA +12 V: 18 mA	-12 V: 13 mA +12 V: 19 mA

**Tabelle 2.4:** Charakteristische Daten einer ADC Platine des Cluster Fluxgate Magnetometers. Einerseits erkennt man die vollständige Redundanz der Platine andererseits auch die minimalen Unterschiede von gewissen Größen in den beiden Einheiten mit fast identischen elektrischen Parametern.

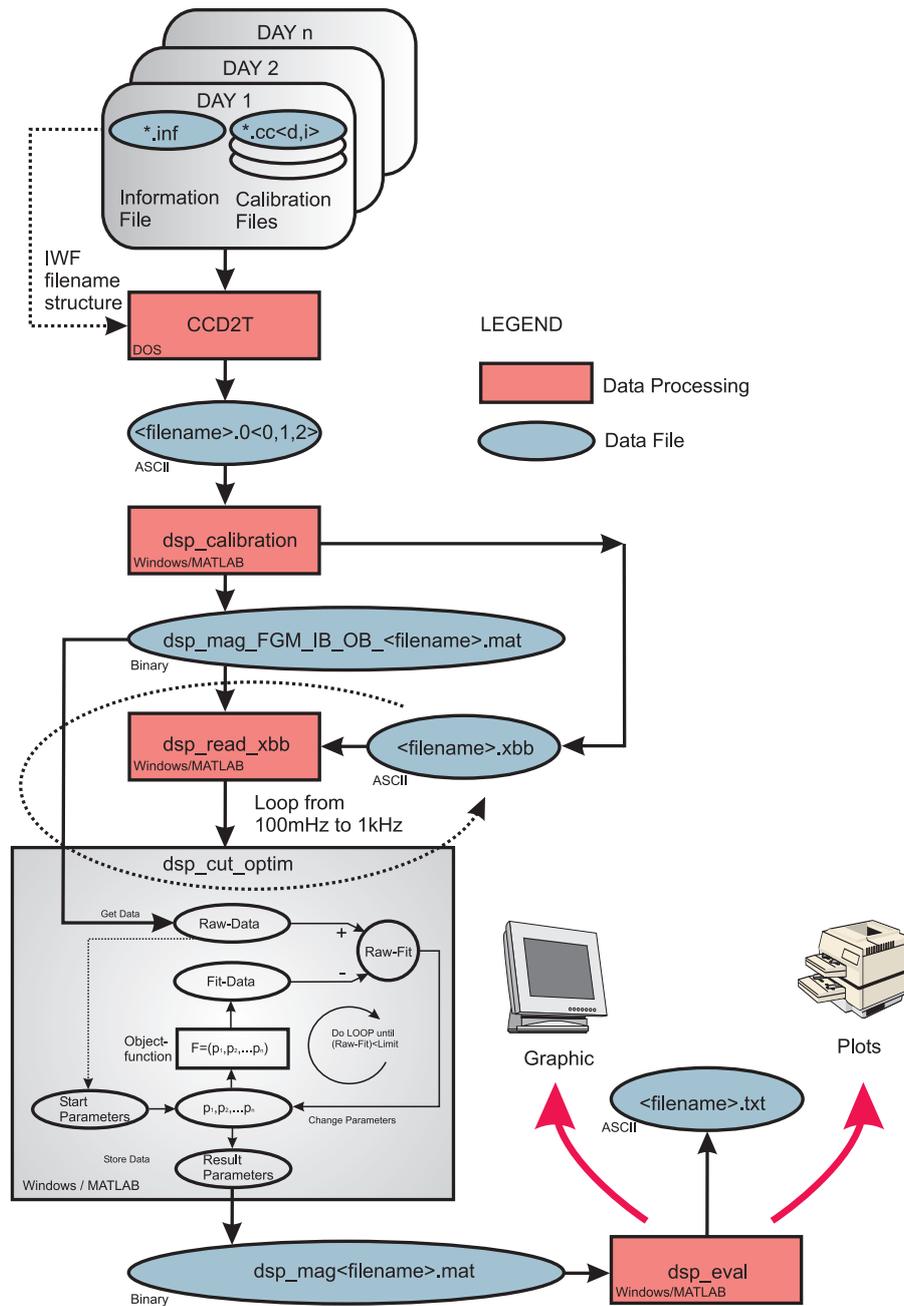
Die Auswertung erfolgte für jeden Modus und jedes Instrument in allen Auflösungen, die Resultate stehen in den Dokumenten [Eichelberger et al., 1999b], [Eichelberger et al., 1999a], [Eichelberger et al., 1999c], [Eichelberger et al., 2000b] und im Anhang C.2.1. Im unteren Paneel sind Einzelmessungen des Fits der Abtastrate und der differentiellen Phasenverschiebungen ("interchannel delay time") dargestellt. Das signifikant schlechtere Signal-Rausch Verhältnis bei hohen Frequenzen limitiert die Analyse auf den unteren Bereich und stellt keine Einschränkungen für den Betrieb des Instrumentes oder die Qualität der Daten dar.



**Abbildung 2.8:** Oberes Paneel: Cluster FGM Amplitudengang bis 1 kHz, links Normal-Mode, rechts Burst-Mode. Unten: Abtastrate (links) und differentielle Phasenverschiebung (rechts) zwischen den Achsen im Frequenzbereich bis 1 kHz. Die Messungen stammen von der Bodenkalibration in Magnetsrode.

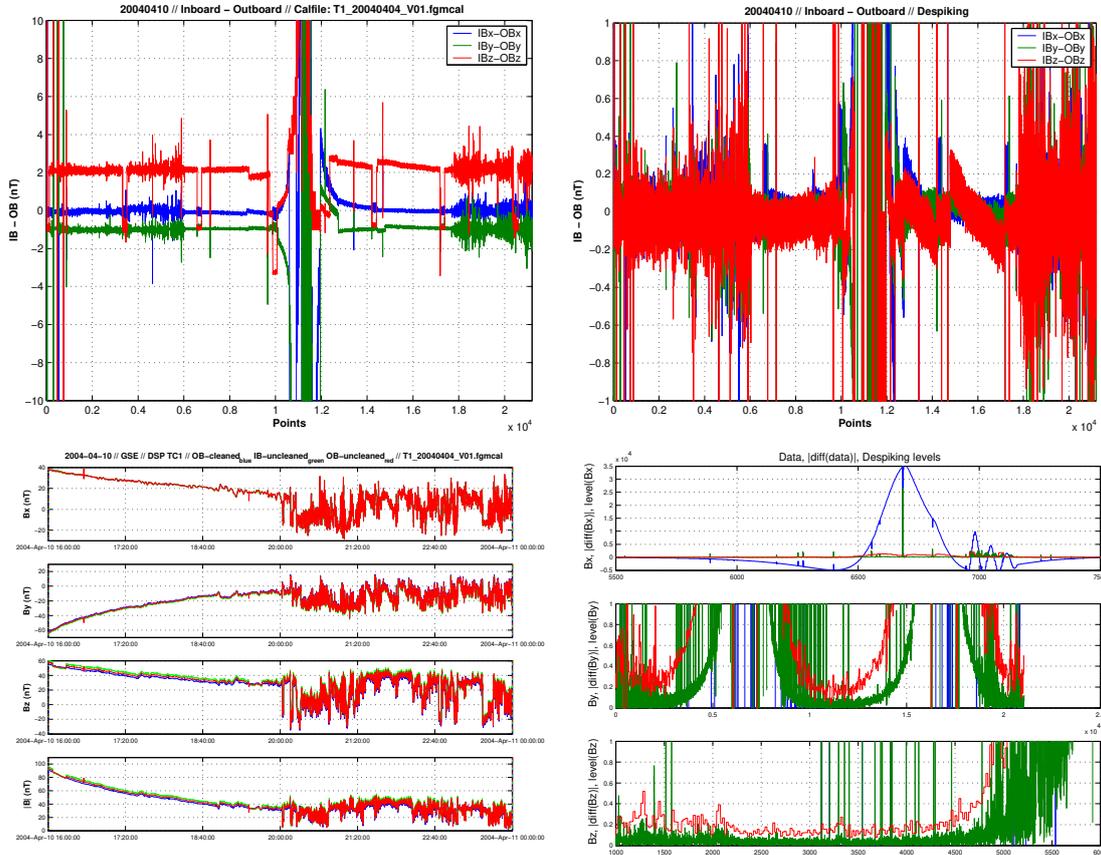
## 2.4 DoubleStar TC1- und TC2-FGM – Abtastrate und Bandbreite

Die Magnetometer der beiden Doublestar Satelliten TC1 und TC2 (TC – Tan Ce) – DSP-MAG & DSE-MAG – sind vom gleichen Typ wie Cluster FGM. Der primäre Sensor (OB) hat 22 Hz, der sekundäre Sensor (IB) 3 Hz Datenrate am Ausgang des Instrumentes. Dies entspricht dem Normal Mode bei Cluster FGM. Das Flußdiagramm ist wiedergegeben in Grafik 2.9, für die genauen Werte siehe [Eichelberger, 2003], [Eichelberger et al., 2003] und [Eichelberger et al., 2004]. Aufgrund von Problemen mit der magnetischen Reinheit des Satelliten, verursacht durch nichtkompensierte Stromkreise in der Verkabelung der Solarpaneele, wurde ein Gradiometermode nach dem Start eingerichtet, siehe dazu [Georgescu et al., 2006], [Georgescu et al., 2008], [Carr et al., 2005], [Carr et al., 2006] und Kap. C.2.2. Tabelle 2.5 zeigt die Bereiche der Magnetometer. Im Unterschied zu Cluster wird bei Doublestar wegen des geringeren Perigäums der größte Meßbereich R7 von Beginn an wissenschaftlich verwendet. Die Spin Average Disturbance (SAD)



**Abbildung 2.9:** DoubleStar FGM ADC Datenflußdiagramm für die digitale Frequenzanalyse. Die Daten der Meßanlage liegen im sogenannten Complete Calibration Data (CCD) Format vor und daraus können bereits erste Informationen zur Messung gewonnen werden, z. B. über den Status der Anlage. Verschiedene Module in einer SW Pipelinestruktur ermöglichen die Extraktion der Magnetfeldwerte ins ASCII-Format, sie bilden die Rohdaten für die Optimierung. Aus den Magnetfeldvektoren werden die Startparameter, z. B. die Offsets sind die Mittelwerte, für die Optimierung entnommen. Mittels der Zielfunktion kommt man zu den Fit-Daten, die Differenz zu den Rohdaten verändert die Parameter was wiederum zu einem Update führt. Diese Schleife wird solange durchlaufen bis das Residuum minimal wird und keine schmalbandigen Frequenzanteile enthält. Eine äußere Schleife versorgt die Optimierungsstufe mit allen Frequenzblöcken der CCD Dateien. Die Struktur ist praktisch ident mit Cluster Abb. C.1.

Korrektur der OB Werte von TC1 erfolgt durch Anwendung der Gradiometermethode. In Abbildung 2.10 (links oben) erkennt man die Unterschiede zwischen IB und OB, 2.10 (rechts oben) zeigt die Daten nach der Korrektur. In der Prozedur werden vorher die OB und IB Sensoren auf den gleichen Zeitraster gebracht



**Abbildung 2.10:** Oben links: DoubleStar TC1 SAD Sprünge, Differenz zwischen Inboard und Outboard Sensoren für jede Achse, IB und OB wurden zuvor auf den selben Zeitraster gebracht ohne zu interpolieren. Oben rechts: DoubleStar TC1 SAD Sprünge, Inboard minus Outboard, nach der Korrektur. Spikes sind auf den Bereich  $\pm 1$  nT begrenzt und die SAD Sprünge beseitigt. Die zeitliche Differenz zwischen 2 Punkten entspricht der Spinperiode von TC1,  $\sim 4$  Sekunden. Unten links: Doublestar TC1 Daten vor und nach der Beseitigung von SAD- und Spike Störungen mittels Dual-Magnetometer Methode. OB cleaned (blau), IB uncleaned (grün), OB uncleaned (rot), 10-April-2004, Zeitspanne 16-24 h, GSE. Unten rechts: DoubleStar TC2 Daten, PP, GSE, OB Daten, original, despiked und despiked zoom.

und die Störungen – sowohl Spikes als auch SADs – innerhalb eines frei wählbaren Limits entfernt. Die Abbildung 2.10 (links unten) zeigt die Magnetfelder von IB und OB vor und nach der Korrektur. Die Sprünge, verursacht durch die Solarpaneele, und Spikes sind weitgehend entfernt. Das Entfernen der Spikes erfolgt durch Verschieben von  $OB_{spike} = OB - \text{median}(OB - IB)$  in jedem Subspace und für jede Achse. Danach verschiebt man OB um  $OB_{SAD} = OB - \text{median}(IB - OB)$  und schreibt die Resultate in eine Datei.

### 2.4.1 DoubleStar TC2 Despiking, Einzelsensor

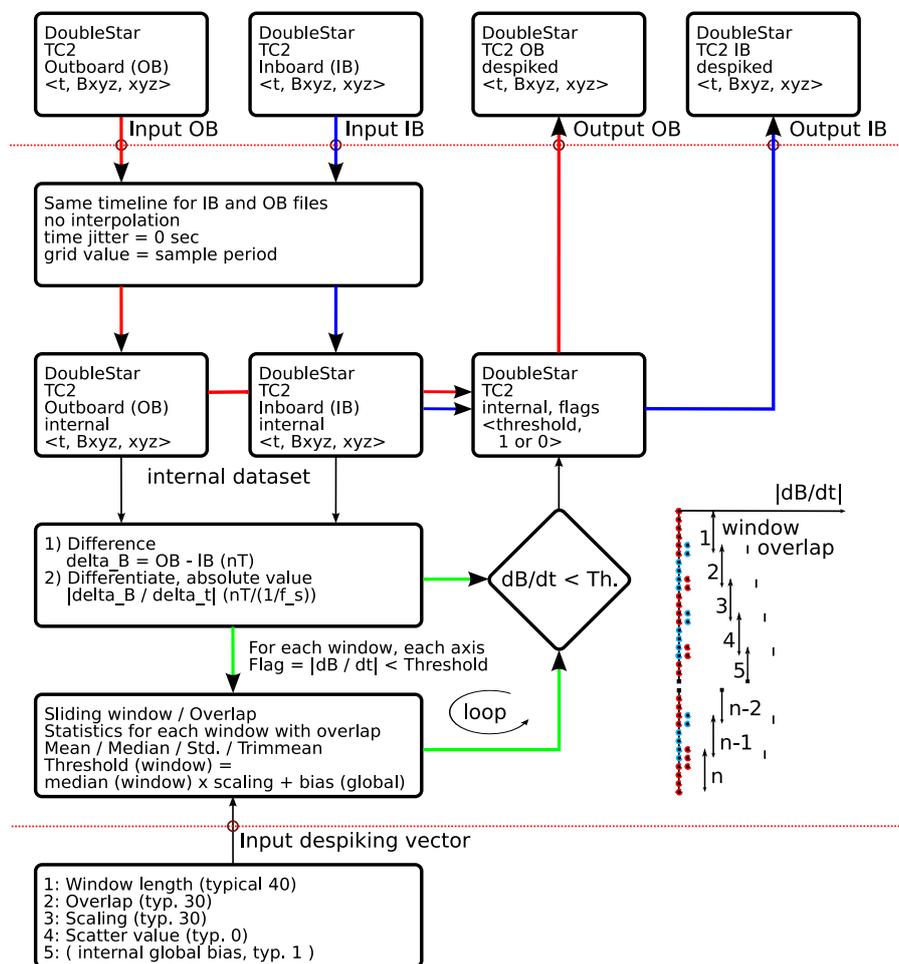
Die Methode basiert auf der Statistik von kurzen Datenblöcken einzelner Files (kein Gradiometer Modus) mit einer frei wählbaren Länge, siehe Grafik 2.10 (rechts unten). Für jedes Fenster wird der Medianwert berechnet, dieser Skalar wird mit einem Skalenfaktor multipliziert und daraus ergibt sich die Schwelle

DoubleStar FGM Bereich Nummer	digitale Auflösung (nT), 14 Bit ADC
3 / 4 / 5 / 6 / 7	$\pm 128 / \pm 512 / \pm 2048 / \pm 8192 / \pm 32768$

**Tabelle 2.5:** Bereiche und Auflösung für die baugleichen DoubleStar Fluxgate Magnetometer auf den Satelliten TC1 (äquatorialer Orbit) und TC2 (polarer Orbit).

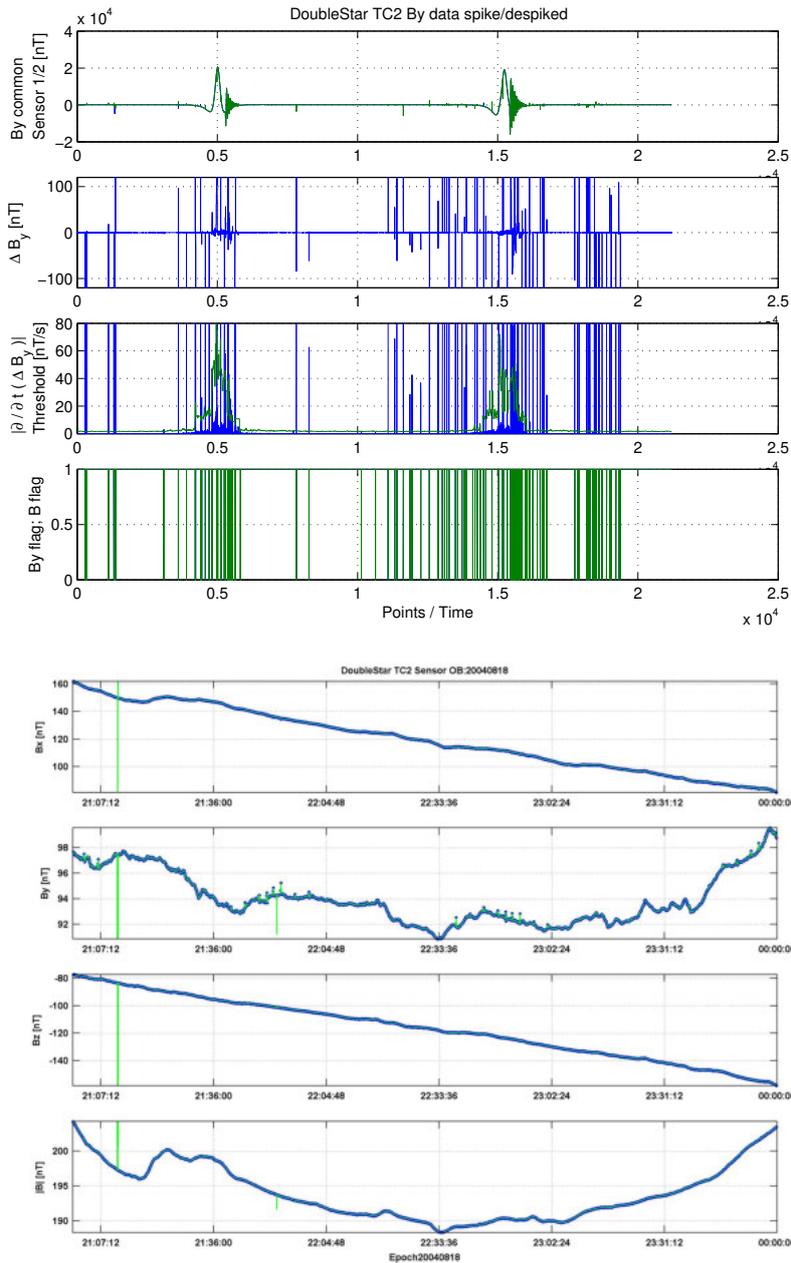
(Threshold) für das Despiking. Die Spikes und Daten rund um den Spike (Scatter value) werden entfernt. Der Median Wert vermeidet eine signifikante Verzerrung (Biasing) wie es bei einem Mittelwert (Mean) der Fall wäre.

## 2.4.2 DoubleStar TC1 Despiking Gradiometer Methode



**Abbildung 2.11:** DoubleStar TC2 Despiking Blockdiagramm Gradiometer (Dual-Magnetometer) Methode [Eichelberger et al., 2007]. Die Daten beider Sensoren werden eingelesen, auf das selbe Zeitraster gebracht, die Differenz der einzelnen Achsen gebildet, differenziert, mit einem wählbaren Fenster im Zeitbereich statistische Werte berechnet, siehe Tab. 2.6, daraus der Schwellwert abgeleitet und Werte unterhalb des Thresholds als "despiked" auf Files ausgegeben.

Im Unterschied zur Einzelsensormethode (dieses Kap. 2.4.1 vorhin) sind sowohl IB als auch OB Daten notwendig um die Gradiometer Methode anwenden zu können, siehe Abbildung 2.11. Nach Zeitab-



**Abbildung 2.12:** Obere Grafik: TC2 2004-08-18, PP, GSE, OB und IB  $B_y$  Daten, Panel (i) ursprüngliche Daten mit Spikes auf gemeinsamer Zeitbasis (ii) Differenz in den Komponenten  $B_{yOB} - B_{yIB}$  (iii) Absolutbetrag der zeitlichen Ableitung der Differenz (blau) und dynamischer Grenzwert (grün) hervorgegangen aus den statistischen Daten des Kurzzeitfensters (iv) markierte  $B_y$  und  $B$  Werte (logische UND-Verknüpfung aller Einzelkomponenten). Das Flußdiagramm mit den einzelnen Stufen ist dargestellt in Abb. 2.11. Untere Grafik: TC2 2004-08-18, 2100-2400, PP, GSE,  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ,  $B$ , Outboard Sensor. Die entgültigen OB Daten sind in Hintergrund in blauer Farbe dargestellt, die Originaldaten mit den Spikes im Vordergrund (grün). Die großen Spikes sind entfernt, es sind keine "blauen" Punkte am Ende der Spitzen. Kleinere Spikes ( $\leq 2\text{ nT}$ ) erkennt man in der  $B_y$  Achse als Punkte an den Spitzen, sie verbleiben in den Daten. Der Grenzwert im Standardverfahren wurde bewußt höher gewählt um nur markante Störspitzen zu entfernen.

DoubleStar TC2 Despiking Parameter - Gradiometer Methode			
Nr.:	Name	typ. Wert	Anmerkung
1	WL - Window length	40	Basisperiode für statistische Datengenerierung
2	OL - Overlap	30	Glättung des Stufenverlaufes, kleiner als WL
3	SC - Scaling	30	Skalierung des getrimmten Mittelwertes
4	SV - Scatter value	0	Werte um den Spike, Def. einer Korrelationslänge
5	GB - Global bias	1	Offsetwert unabhängig vom Magnetometerbereich

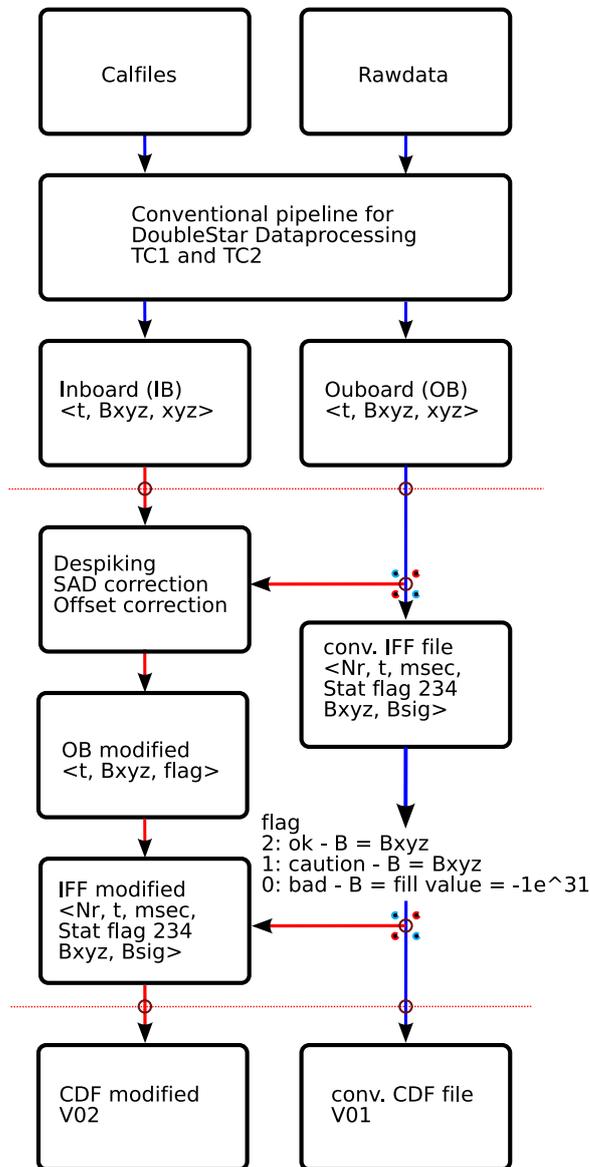
**Tabelle 2.6:** DoubleStar TC2 Parameter zur Bestimmung des Schwellwertes für Despiking in der Gradiometer Methode: (i) Window length, (ii) Overlap, (iii) Scaling und (iv) Scatter fungieren als primäre Werte, gemeinsam mit den IB und OB TC2 Files sowie dem (v) Global bias (programmintern realisiert) bilden sie den vollständigen Datensatz. Der Overlap muß kleiner als die Window length sein, in jedem Unterraum werden die niedrigsten und höchsten 15 % der Werte verworfen. Die restlichen 70 % liefern die Grundlage zur Berechnung der statistischen Werte. Wäre der Overlap nur einen Punkt kleiner als die Window length, z. B.  $OL = 39$  und  $WL = 40$ , würde ein gleitender Mittelwert als Grenzbereich zum Despiking realisiert. Die typischen Werte sind für TC2 PP Daten ausführlich getestet und in Anwendung.

gleich der Datensätze wird die Differenz zwischen den einzelnen Achsen der Sensoren berechnet. Dieses Delta-Signal wird differenziert und mit dem erlaubten Grenzwert verglichen. Werte unterhalb der Schwelle werden weiterverwendet, siehe Abb. 2.12. Tabelle 2.6 zeigt die Parameter und typische Werte. Für das entsprechende Datenflußdiagramm siehe Abbildung 2.13.

## 2.5 Rosetta RPC-Mag – Abtaste und Bandbreite

Bei Rosetta Plasma Consortium Magnetometer (RPC-Mag) werden – im Unterschied zu Cluster FGM, siehe Seite 194 – alle Kanäle parallel (simultan) abgetastet. Cluster FGM hat einen Multiplexer am Eingang, der die Spannungen vom IB- und OB-Kanal dem ADC seriell zuführt. In Summe sind es bei RPC-Mag sieben ADCs, drei für jeden Sensor und ein Housekeeping-ADC.

**Rosetta Chronologie** Rosetta wurde am 2. März 2004 von Französisch Guayana mit einer Ariane5G+ Rakete erfolgreich gestartet und manövrierte in 10 Jahren zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko. Nach mehreren swing-by Manövern ( $3 \times$  Erde,  $1 \times$  Mars), Vorbeiflügen an den Asteroiden 2867 Šteins im Sep. 2008 und 21 Lutetia (Juli 2010) und einer Spin-Up / Hibernations-Phase vom 8. Juni 2011 (TC um 12:57:40 UTC) bis zum 20. Jänner 2014 (18:18 UTC; S-Band; Aphel im Okt. 2012 bei  $\sim 5.3$  AU) erfolgen Rendezvous (06. August 2014), Landung von Philae am 12. Nov. 2014 (Separation – Signalkunftszeiten auf der Erde – um 09:03 UTC, 22.5 km vom Kometenzentrum und 510 Mill. km (28 min) von der Erde entfernt; {16:03,17:54,18:01} UTC Landung(en), Aufsetzpunkt in Landestelle "J" – umbenannt zu Agilkia, bezugnehmend zur Insel im Nil mit dem Isis-Tempel nach der Umsiedelung von der Insel Philae, letztere wurde beim Bau des Assuan-Staudammes geflutet; die dritte, entgeltige Landestelle bekam die Bezeichnung Abydos, benannt nach einer Nekropole aus der vordynastischen Zeit Ägyptens; diese Landung ist ein Meilenstein der Mission, zugleich krönender Höhepunkt); Daten bis zum 15. Nov. 2014, 01:15 CET; Wiedererwachen von Philae (Signalempfang ESA) am 13. Juni 2015, 22:28 CEST (mitteleuropäische Sommerzeit = UTC + 2:00). Der Rosetta Orbiter vollendete die Mission am 30. Sep. 2016, 13:19 CEST, durch einen kontrollierten Absturz in die Nähe einer aktiven Stelle (Aufsetzpunkt "Sais", benannt nach dem Ursprungsort des Rosettasteines) in der Region Ma'at (bezeichnet im Ägyptischen u.a. das Prinzip einer kosmischen Ordnung und ist verkörpert in der Mythologie durch eine Göttin mit Straußenfeder auf dem Kopf und dem Anch-Kreuz in der Hand) von 67P (Abstieg aus einer Höhe von 19 km nach dem finalen Manöver um 22:50 CEST des Vortages). RPC-Mag lieferte in Laufe der Mission  $\sim 900$  Millionen Magnetfeldvektoren. Abbildung 2.14 ist eine Illustration von wichtigen Rosetta-Stationen, miteingezeichnet sind die Starts von Cluster und Doublestar. Die nachfolgende Grafik 2.15 zeigt das Datenflußdiagramm zur exakten Bestimmung der Abtaste und der Bandbreite. Aus den CCD-Rohdaten wird das Frequenzverhalten



**Abbildung 2.13:** DoubleStar Datenflußdiagramm: Die konventionelle Datenverarbeitung ist auf der rechten Seite an den blauen Pfeilen erkennbar, die Modifikation mit zusätzlichen Stufen in der Datenverarbeitung erkennt man an der linken Seite (rote Pfeile). Es resultiert ein verbessertes CDF File – Version 2 oder höher – in der DoubleStar Datenbank. Diese Struktur ist für TC1 und TC2 in Verwendung, SAD und Offset Korrektur gibt es allerdings nur bei TC1.

Nummer	Sensor // DPU	-3 dB Eckfrequenz (Hz)	Abtastrate (Hz)
1	FM // FS	$13.5 \pm 0.3$	19.98070(2)
2	FM // FM	$13.5 \pm 0.3$	19.98103(5)
3	FS // FM	$13.5 \pm 0.3$	19.98103(2)
4	FS // FS	$13.5 \pm 0.3$	19.98060(2)

**Tabelle 2.7:** Entgeltige Resultate der Bandbreite und Abtastrate von Rosetta RPC-Mag für die vier möglichen Sensor-DPU Kombinationen bei der Kalibration. Der Wert in der Klammer ist die Unsicherheit der letzten Nachkommastelle.

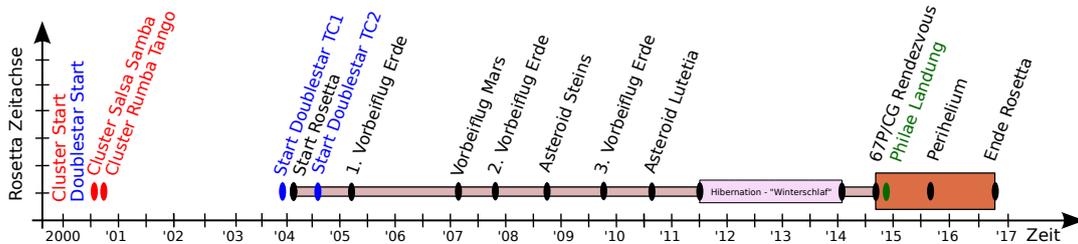
Science-Hk-Mode (ID)	Abtast-rate [Hz]	Paket-dauer [sec]	Paketlänge prim / sek [Vektoren]	Bitrate prim / sek [bit/s]	Vektorrate prim / sek [Vektoren/s]
Minimum SID1 (000)	1/32	1024	32 / 1	2 / 0.0625	$0.03125 / 9.765625 \times 10^{-4}$
Normal SID2 (001)	1	32	32 / 1	64 / 2	1 / 0.03125
Burst SID3 (010)	20	16	320 / 16	1280 / 64	20 / 1
Medium SID4 (011)	5	32	160 / 1	320 / 2	5 / 0.03125
Low SID5 (100)	1/4	128	32 / 1	16 / 0.5	0.25 / 0.0078125
Test SID6 (101)	20	16	320 (32) / 1	1280 / 4	20 / 0.0625
Housekeeping	1280 int.	32	16 Bytes	4	

**Tabelle 2.8:** Rosetta RPC-Mag Science und Housekeeping Moden. In jedem Modus gibt es Daten vom primären und sekundären Sensor, meist ist OB primär und IB sekundär.

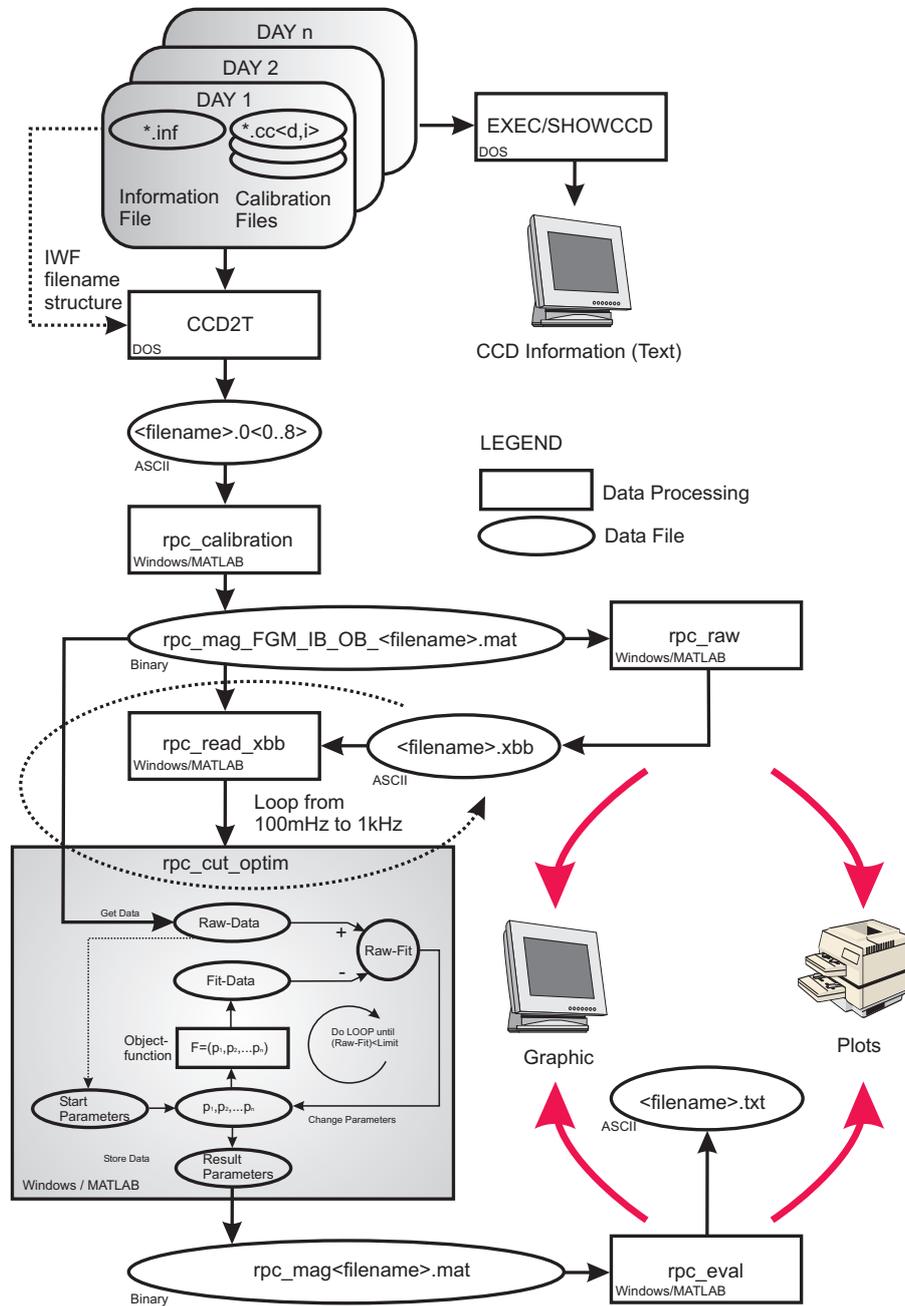
und die Abtastrate bestimmt, jeweils für beide Sensoren. Im Unterschied zu Cluster FGM ist bei Rosetta RPC-Mag die Filterkennlinie wesentlich steiler, dargestellt für zwei Bereiche in der Grafik Abb. 2.16. Die nominelle Abtastrate beträgt 20 Hz, Tab. 2.7 liefert die exakten Resultate für verschiedene Konfigurationen von Flugmodell (FM) und Ersatzmodell (Flight-Spare-model FS). Die Ergebnisse sind im technischen Report [Eichelberger et al., 2002] dokumentiert.

Das Rosetta Orbiter Magnetometer hat eine Auflösung von  $\pm 16000$  nT und fünf verschiedene Moden, zusammengefaßt in Tabelle 2.8. Drei weitere Instrumente mit IWF Beteiligung auf Rosetta und engerem Bezug zum magnetischen Feld sind (i) das Lander magnetometer Romap (ii) MIDAS, ein Rasterkraftmikroskop zur Bestimmung der Feinstruktur des Kometenstaubes [Eichelberger et al., 2000a] und (iii) MUPUS [Eichelberger et al., 1998].

Während der Inbetriebnahme (Commissioning Phase) von RPC-Mag hat sich herausgestellt, daß die vier Reaction-Wheels der 3-Achsen stabilisierten S/C Störungen im Magnetfeld hervorrufen. Grafik 2.17 zeigt das dynamische Spektrum des IB-Sensors über 8 h (08. Sep. 2004) und ein 9.5 h Block am 09. Sep. 2004 mit Umdrehungszahlen der Reaction-Wheels. Deutlich zu erkennen ist die schmalbandige, variierende

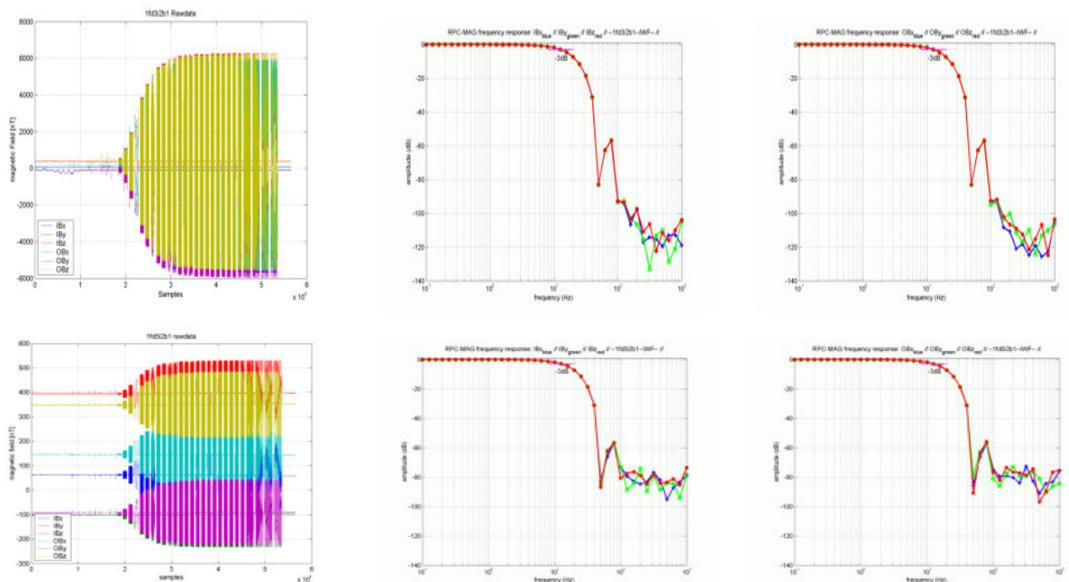


**Abbildung 2.14:** Zeitachse mit den Höhepunkten von Rosetta und den Starts von Cluster und DoubleStar, den 3 Missionen mit Magnetfeldbezug in dieser Arbeit.

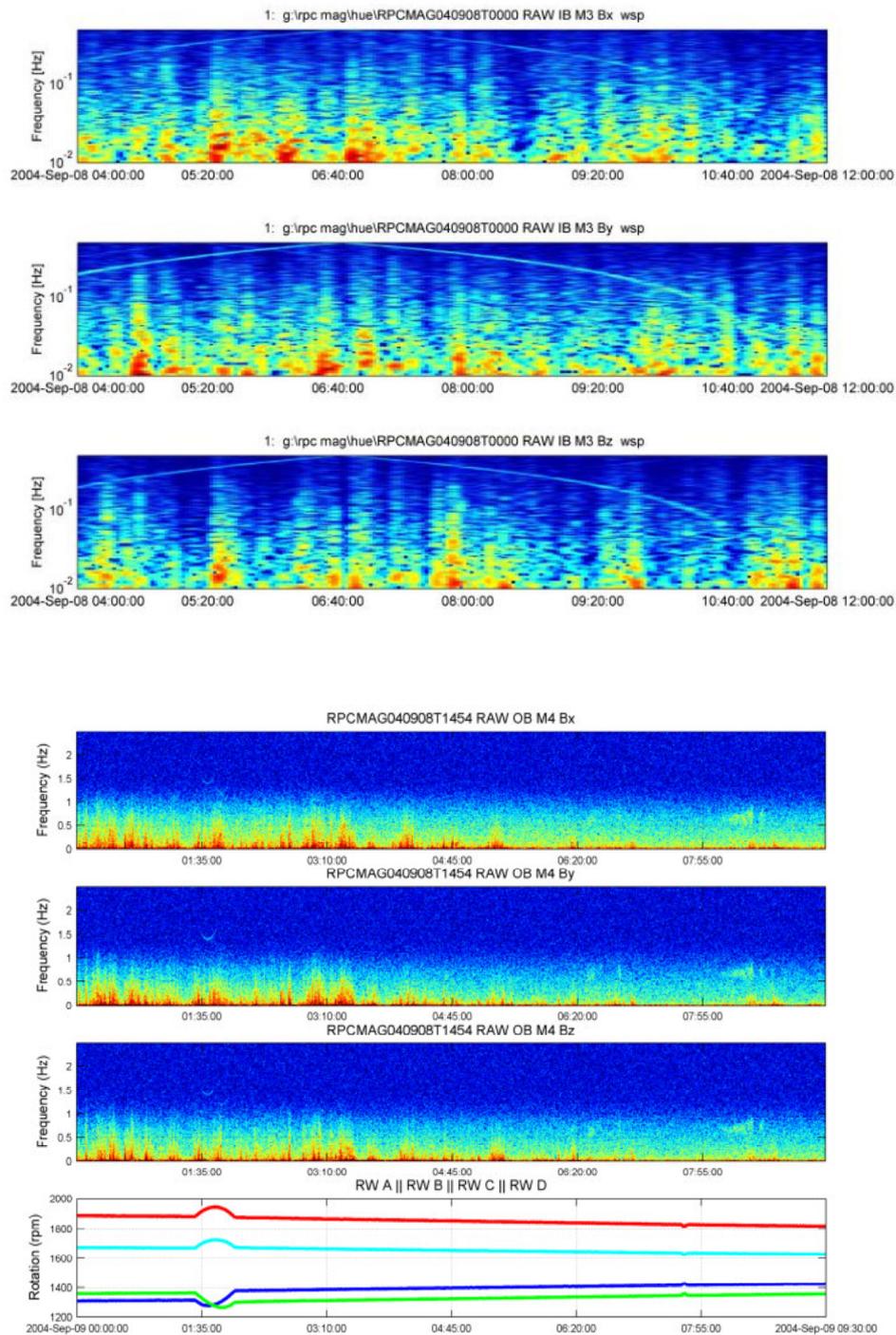


**Abbildung 2.15:** Rosetta RPC-Mag Datenflußdiagramm. Die Bestimmung der Bandbreite und Abtastrate erfolgt ähnlich wie bei Cluster und Doublestar. Die sequentielle Struktur ermöglicht wiederum die Bestimmung eines stabilen Parameterbereiches.

Frequenzlinie (bis zu 4 Linien). Zusätzliche Effekte treten auf wenn die Heizeinheit des Rosetta Lander (Philae) in Betrieb ist, die Kompensationsmagnete zeigen eine Temperaturabhängigkeit, es gibt einen Einfluß von der High-Gain Antenne (HGA) und Änderungen der S/C Konfiguration sind ebenfalls detektierbar. Das Rosetta Orbiter Magnetometer RPC-Mag ist eine Weiterentwicklung des Magnetometers der amerikanischen Mission DeepSpace 1 (DS1), für das Breadboard siehe Abbildung B.5. Das DS1 Magnetometer konnte im Laufe der Jahre bei Vorbeifügen an Asteroiden und am Kometen 19P/Borrelly wertvolle Daten liefern, ebenfalls in Kombination mit anderen DS1 Instrumenten, für Resultate siehe [Special Issue Icarus, 2004]. Primäres Ziel von DS1 war die erstmalige kontinuierliche Erprobung eines Ionentriebwerkes im Weltraum. BepiColombo (im Mercury Transfer Module) und ESA's Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE) Mission verfügen ebenfalls über solch einen Antrieb zur physikalischen Kompensation von nichtkonservativen Kräften (bei den Vorgängermissionen CHAMP und GRACE wird die Bewegungsgleichung (freier Fall) mathematisch-numerisch realisiert). Ionentriebwerke haben einen wesentlich höheren spezifischen Impuls als chemische Triebwerke, siehe Gl. A.250; historisch interessant in diesem Zusammenhang ist Franz Abdon Ulinski (1890 – 1974) mit seinem Ionenantrieb (Elektronen statt Neutralteilchen).



**Abbildung 2.16:** Obere Grafiken: Bestimmung der Bandbreite von Rosetta RPC-Mag während der Bodenkalibration in Magnetsrode (TU-Braunschweig, Deutschland),  $B \sim 22000 \text{ nT}$ . Jeder Frequenzblock der Rohdaten wird gefittet und für OB und IB daraus die Parameter bestimmt. Im Amplitudengang erkennt man die  $-3 \text{ dB}$  Bandbreite von  $13.5 \text{ Hz}$ . Untere Grafiken: Bestimmung von Amplitudengang und Bandbreite von Rosetta RPC-Mag bei einem angelegten Magnetfeld von nunmehr  $B \sim 500 \text{ nT}$ .



**Abbildung 2.17:** Dynamisches Spektrum von Rosetta RPC-Mag OB- und IB Daten mit schmalbandiger, variierender Störung (Aliasing) von den insgesamt vier Reaction-Wheels. Obere Grafik, IB-Sensor: Das erste Paneel zeigt die x-Komponente, danach in der Mitte die y- und darunter z-Komponente des Feldes. Unterer grafischer Teil, OB-Sensor: Alle Sensordaten und die Umdrehungszahlen der Reaction-Wheels (unterstes Paneel), man beachte die Bögen bei  $\sim 01:35:00$  korrespondierend mit denen der Rotation.

## Kapitel 3

# BepiColombo PICAM Instrument

### 3.1 Ionenoptik-Simulation bei PICAM/BepiColombo

Beim Instrument Planetary Ion CAMera (PICAM) auf BepiColombo (Start 2018) wurde eine vollständige 3D Simulation der Ionenoptik vorgenommen, mit den Zielen, (i) kann das Simulations-Modell das reale Modell abbilden, d. h. stimmen Simulation und Messungen (bis zu welchem Grad) überein, (ii) was sind die bestmöglichen Spannungsverhältnisse an den Elektroden und (iii) in welchen Bereichen der Ablenkeinheiten ergeben sich Möglichkeiten zur Verbesserung/Optimierung des Strahlenganges durch mechanische Veränderungen. Die Gittergröße des Modells beträgt  $66 \mu\text{m}$ , in Summe ergibt das  $\sim 2 \times 10^9$  Gitterpunkte, zugleich 19 GByte Speicherbedarf pro Einheit, jeder Simulationslauf mit  $10^5$  Ionen erfordert 4 min, die Ausführung der Software erfolgt im Batch-Mode. Eine mechanische Veränderung macht einen kompletten Neuaufbau/Berechnungsgang des Modells notwendig,  $\sim 10^5$  s sind dafür notwendig.

Alle drei Aufgaben konnten erreicht werden, die Relation der Spannungen wurde fixiert und eine mechanische Modifikation des letzten Spiegels konnte das Abbildungsverhalten verbessern. Dies in Anbetracht der Tatsache, daß Termin- und Kostendruck ein zielgerichtetes Vorgehen verlangen. Die Erfahrung mit der Simulation zeigt, daß weiteres Potential zur Verfeinerung und Optimierung der Ionenoptik im Bereich Konvergenzlinse gegeben ist.

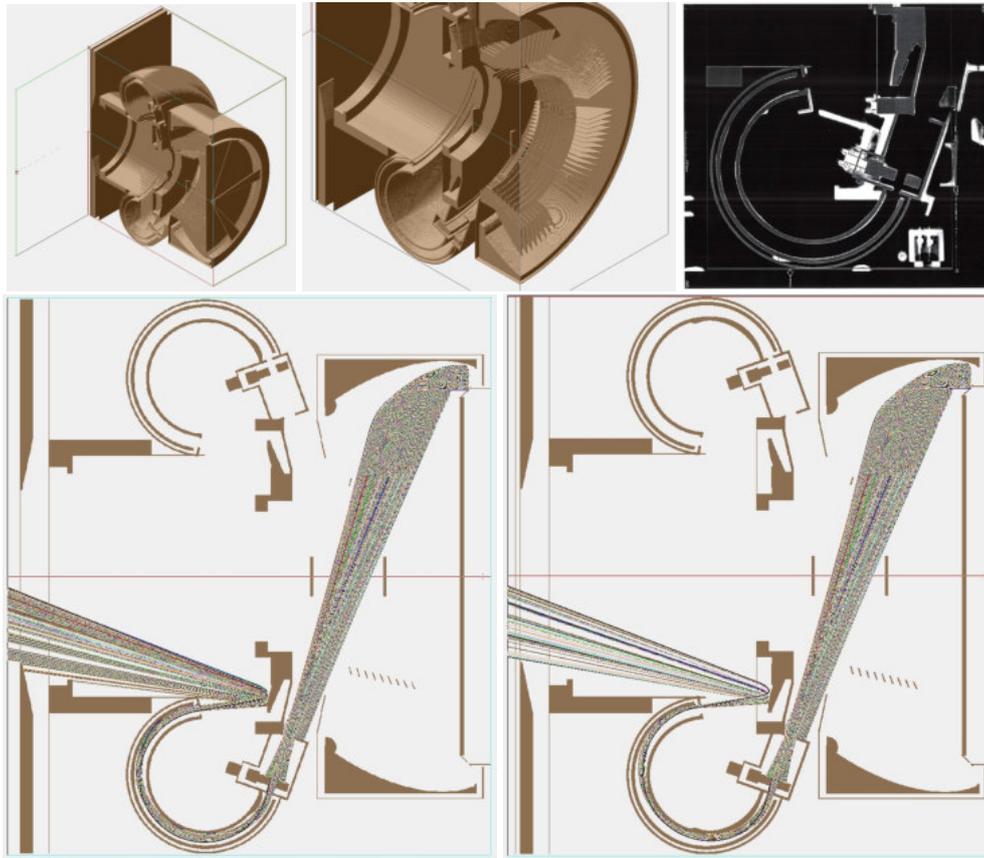
Abb. 3.1 zeigt Schnittbilder des Simulationsmodells, eine Röntgen-Aufnahme des Analysators und exemplarisch zwei Simulationsläufe (Auswirkungen von Inhomogenitäten im Analysator aufgrund Toleranzen in der Fertigung) mit den Strahlengängen. Beginnend bei der Eintrittsöffnung folgen (i) primärer Spiegel, (ii) Ablenkelektroden, (iii) Konvergenzlinse, (iv) toroidaler Analysator, (v) sekundärer Spiegel und (vi) Gitter mit Micro-Channel Plate (MCP).

### 3.2 EMV Messungen bei PICAM/BepiColombo

Eine detaillierte Übersicht von Spezifikationen und EMV-Belangen ist im Anhang B.1 gegeben. Resultate von PICAM/BepiColombo sind dargestellt in Abb. 3.3 und 3.4, die Grafiken zeigen den Gesamtaufbau in der Abschirmkammer bei ESA/ESTEC und das Fluginstrument am IWF Meßplatz. Allgemeine Überlegungen mit dem Hintergrund von praktischen Erfahrungen bei Bodenstationen und mehreren Missionen sind gegeben in [Schwingenschuh et al., 2012b].

### 3.3 EMV Messungen bei MAREMF/Mars-96 und ASPOC/MMS

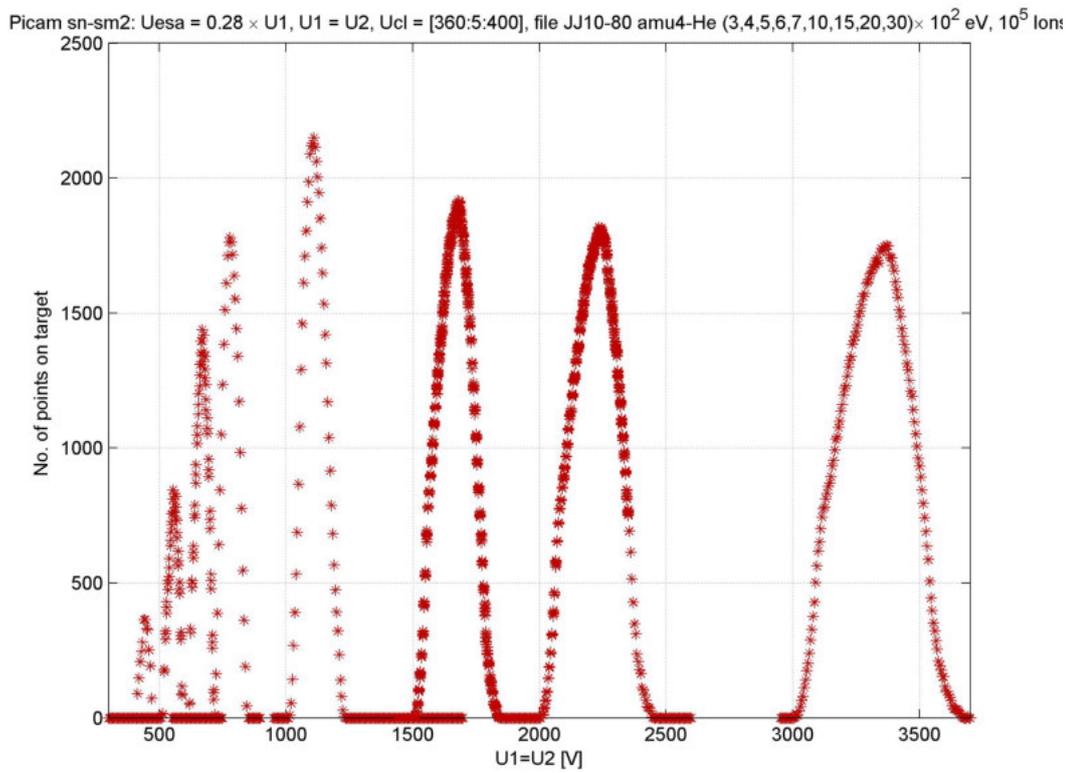
Die Abbildungen 3.5 und 3.6 zeigen ergänzend EMV-Messungen durchgeführt am Magnetometer MAREMF der russischen Mars-96 Mission (eine der ersten umfangreichen EMV Untersuchungen) und beim Instrument ASPOC/MMS (4 Satelliten Mission, siehe Kap. A.3.2), [Eichelberger et al., 2012a].



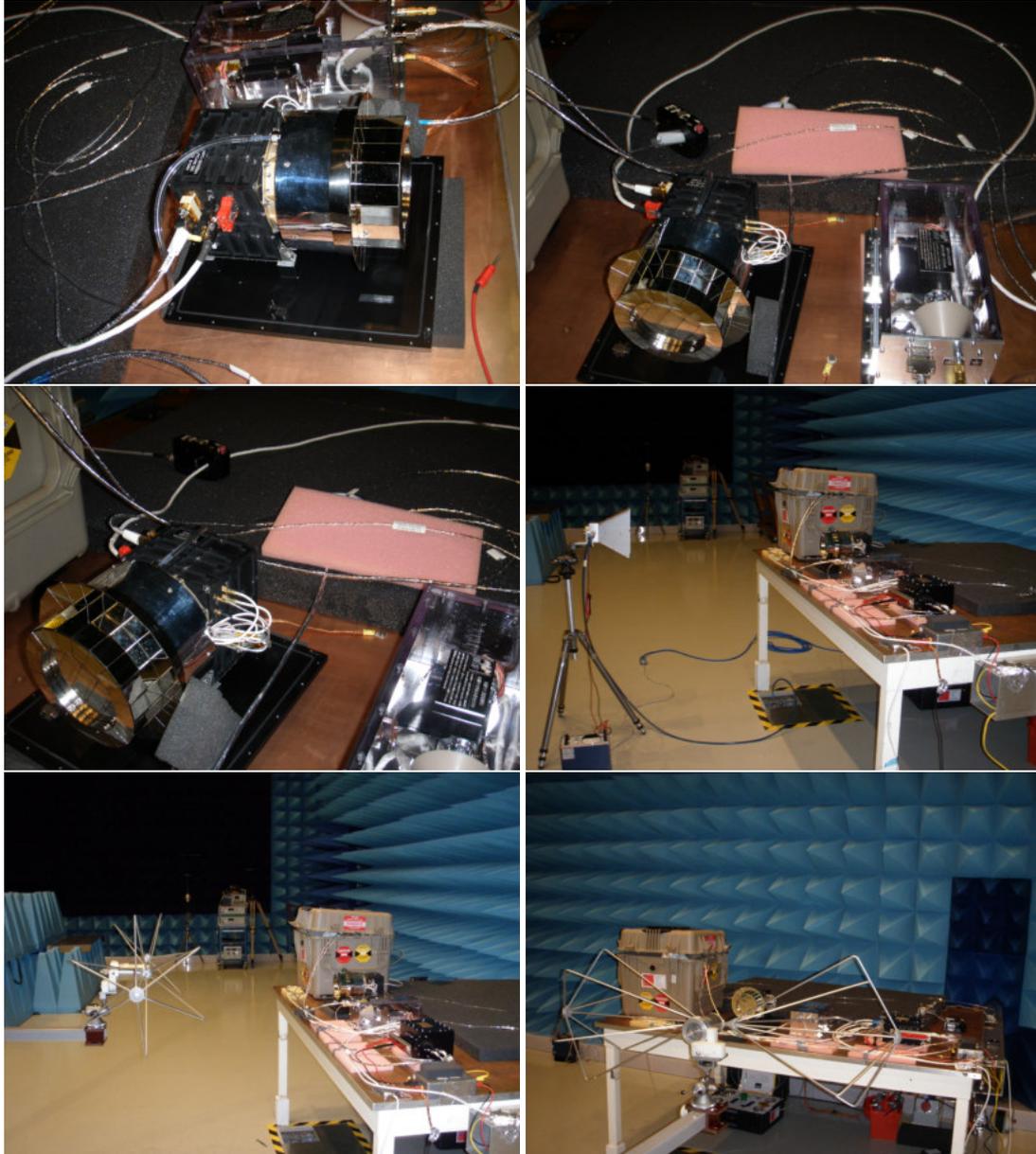
**Abbildung 3.1:** Simulation von PICAM/BepiColombo QM. Obere Bilder: (i) Querschnitt durch das Instrument, (ii) Röntgen-Scan des Analysators © IWF; Untere Bilder: (iii) Teilchensimulation im Elevationsbereich  $0 - 90^\circ$  bei modifiziertem Analysator, Erhöhung im Eingangsbereich (links) und gestreckte Erhöhung über längeren Bereich (rechts), siehe ebenfalls [Eichelberger et al., 2016a] und Abb. 3.4.

No.:	Parameter					
	Energie (eV)	Maximum (eV)	Shift (eV)	Breite (eV)	Delta (eV)	$U_{ESA}$ (V)
1 (a)	300	---	---	---	---	$0.28 \times U_1$
2 (b)	300	---	---	---	---	$0.30 \times U_1$
3	400	440	40	415 - 470	55	$0.28 \times U_1$
4	500	555	55	515 - 590	75	$0.28 \times U_1$
5	600	670	70	620 - 715	95	$0.28 \times U_1$
6	700	780	80	720 - 785	125	$0.28 \times U_1$
7 (a)	1000	1195	195	1090 - 1320	230	$0.26 \times U_1$
8 (b)	1000	1110	110	1015 - 1230	215	$0.28 \times U_1$
9 (c)	1000	1055	55	975 - 1145	170	$0.30 \times U_1$
10	1500	1680	180	1510 - 1850	340	$0.28 \times U_1$
11	2000	2235	235	2010 - 2465	455	$0.28 \times U_1$
12	3000	3370	370	3010 - 3690	680	$0.28 \times U_1$

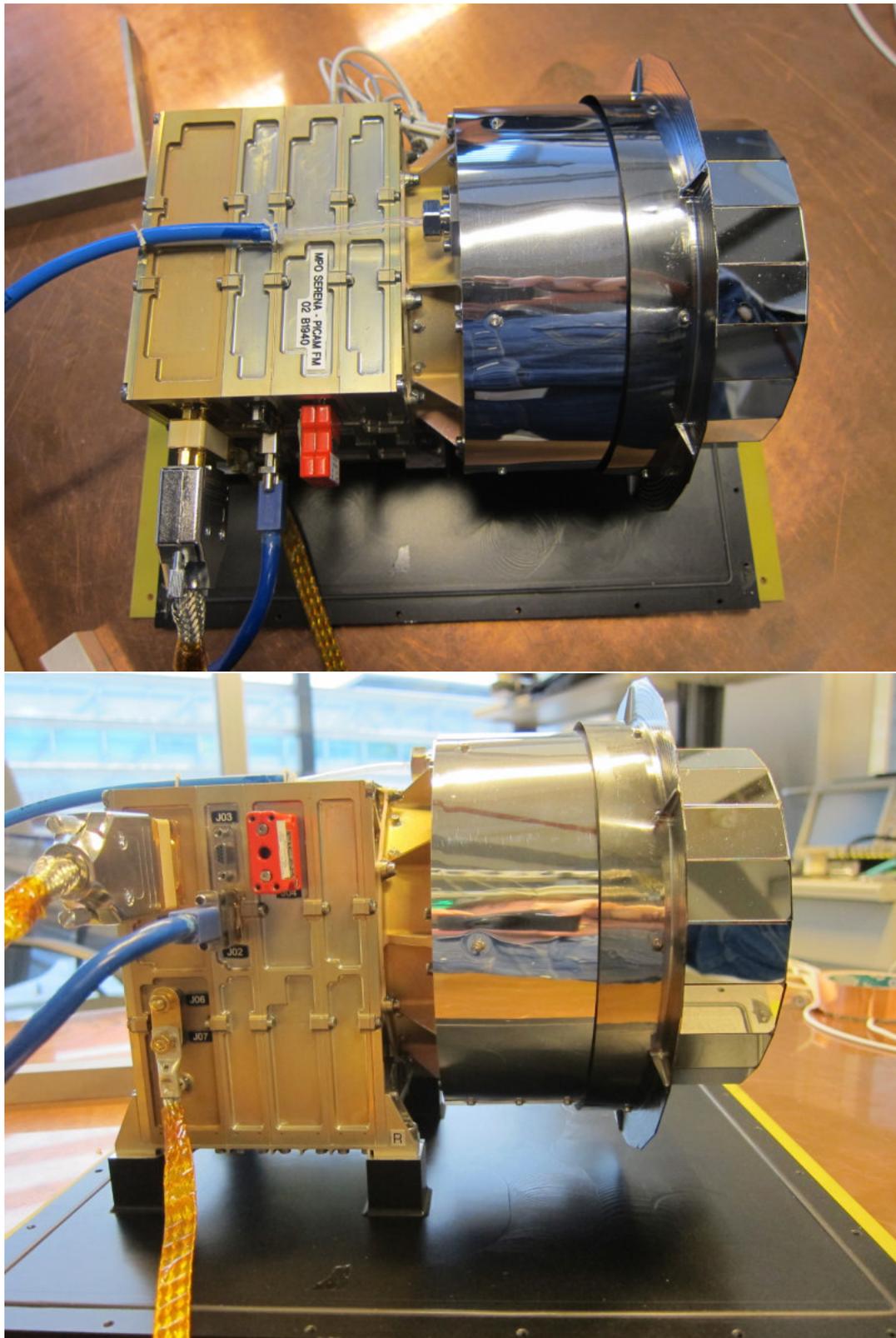
**Tabelle 3.1:** Energieverteilung PICAM/BepiColombo QM Simulation, grafische Darstellung in Abb. 3.2.



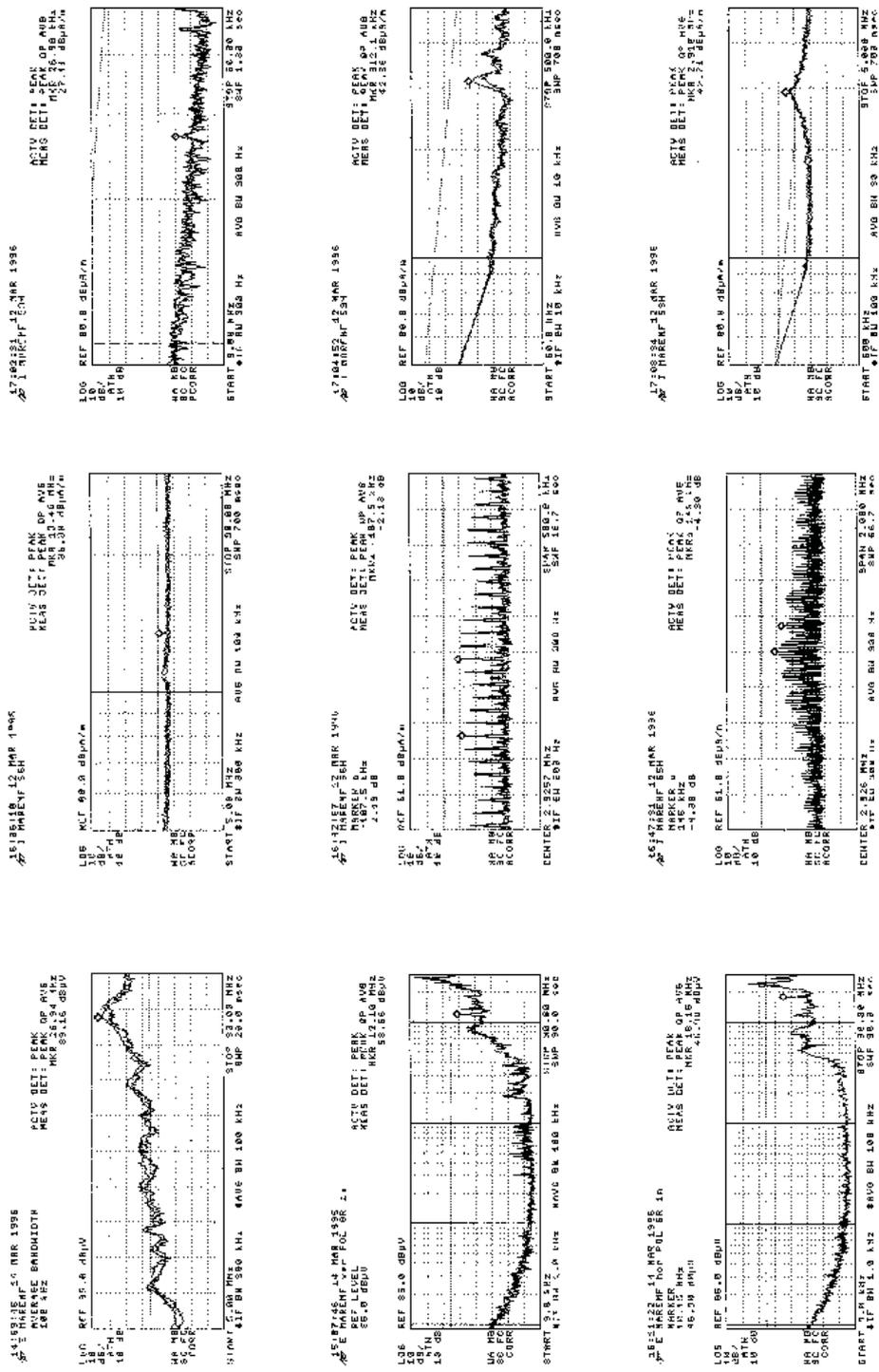
**Abbildung 3.2:** Resultate bei der PICAM/BepiColombo QM Simulation mit Helium-Ionen (jeweils  $10^5$  Ionen pro Lauf) unterschiedlicher Energien, Auflistung der Werte in Tab. 3.1.



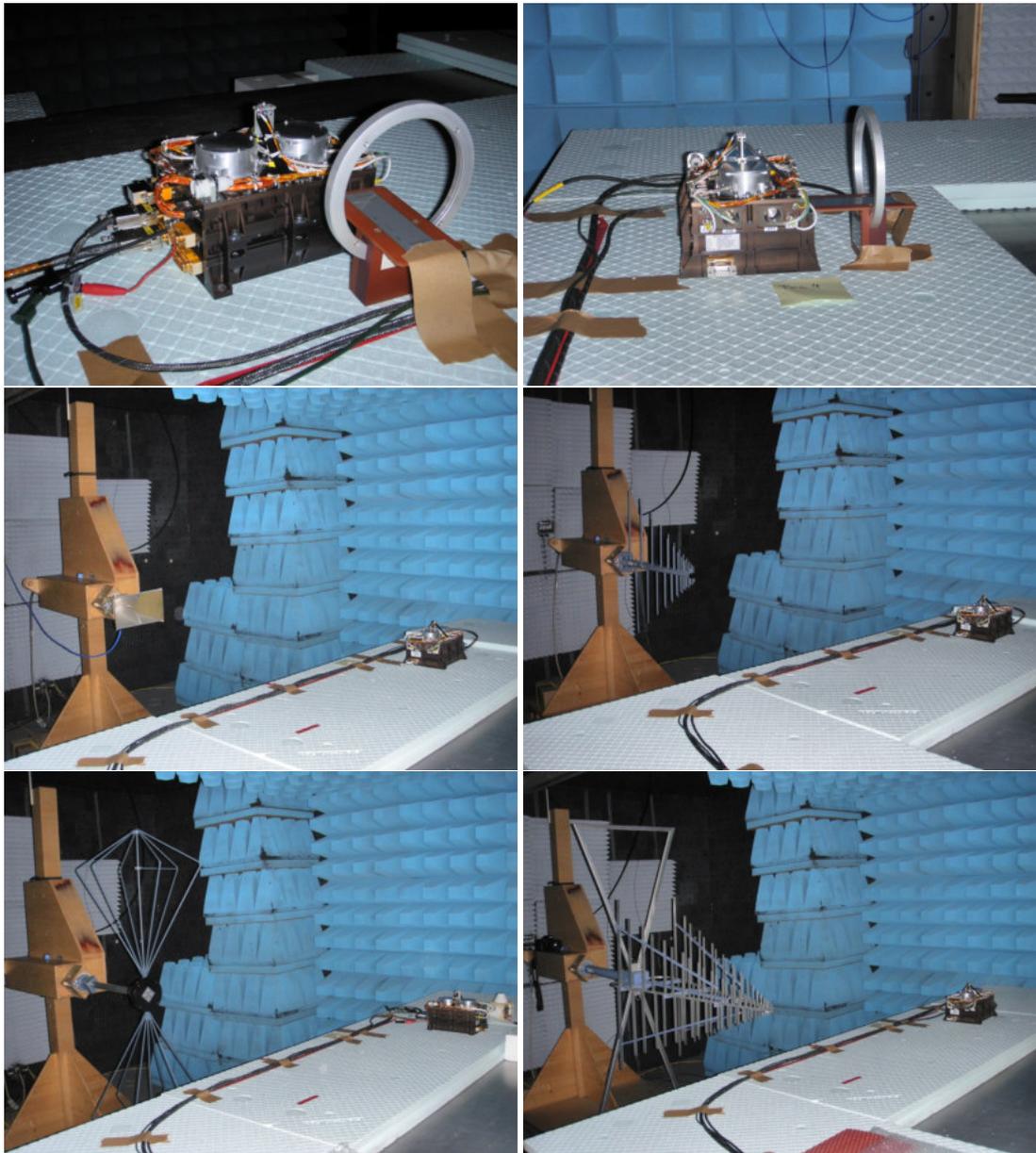
**Abbildung 3.3:** EMV Aufbauten bei PICAM/BepiColombo QM, leitungsgebundene und gestrahlte Messungen, Konfigurationen in der Meßkammer: (i) Leitungsgebundene Messung, Instrumente auf der Kupferplatte, Power- und Spacewire-Kabel, (ii) Emissionen elektrisches Feld mit Horn- und Bikonischer-Antenne.



**Abbildung 3.4:** PICAM/BepiColombo FM02 Instrument während leitungsgebundener EMV Messungen am IWF, Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten), links der Elektronikblock mit den Anschlüssen, rechts der Gehäuseteil der Ionenoptik, siehe ebenfalls Abb. 3.1 für den inneren Aufbau und simulierte Ionenpfade.



**Abbildung 3.5:** EMV Messung am Experiment MAREMF der russischen Mission MARS-96. Die Amplituden der Signale (Spannungen vs. Frequenz, log. normiert) sind für drei verschiedene Fälle dargestellt: (i) E MAREMF, (ii) E MAREMF vertikale Polarisation und (iii) E MAREMF horizontale Polarisation. Die Limitline ist punktiert erkennbar. Bemerkenswert sind einige Resonanzspitzen, an ihnen erfolgen naturgemäß die größten Emissionen. Das mittlere Panel zeigt Messungen des Signals 65H, die rechte Abbildung die Emissionen auf 53H.



**Abbildung 3.6:** EMV Aufbauten bei ASPOC/MMS EQM, gestrahlte Messungen, typische Antennenkonfigurationen in der Meßkammer basierend auf MIL-STD 461/462 Normen: (i) RE01 – AC Magnetfeld-emissionen 10 Hz – 20 kHz, 7 cm Abstand, obere Abbildungen, (ii) RE01 – Niederfrequenz AC Magnetfeld 0.02 – 30 Hz, gemessen in der  $\mu$ Metal-Abschirmung am IWF (gleichzeitige Bestimmung des magnetischen Dipolmomentes, keine Abbildung), (iii) RE02 – elektrisches Feld Emissionen 30 Hz – 18 GHz, 1 m Abstand, mittlere Zeile und (iv) RS03 – elektrisches Feld Immissionen 14 kHz – 18 GHz, 1 m Abstand, untere Zeile.

# Kapitel 4

## Boden-Messungen in einem Mehrpunkt-Netzwerk

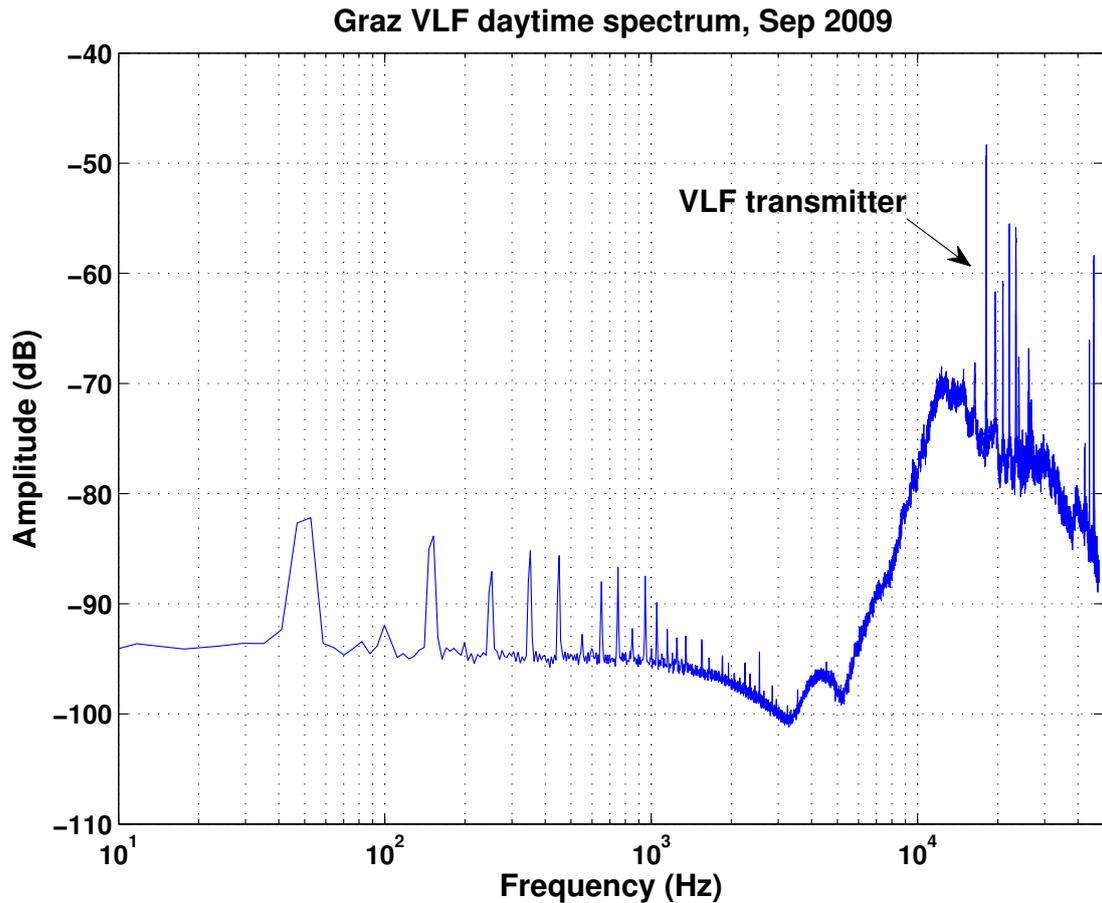
### 4.1 Längswellen-Messungen

#### 4.1.1 Netzwerk und Resultate

Die Very Low Frequency (VLF, Längswelle) Empfangsstation dient zur Bestimmung von Variationen im Ausbreitungspfad zwischen verteilten, vorwiegend militärischen {Navigations, Kommunikations}-Sendern (Spektrum Abb. 4.1, Sender Tab. 4.2, Empfänger Tab. 4.1, Karte Abb. 4.2) mit Minimum Shift Keying (MSK) Modulation, hervorgerufen durch verschiedene (i) natürliche und (ii) künstliche Ursachen. Darunter befinden sich u. a. auch mögliche Modifikationen wie sie bei Erdbeben innerhalb kontinentaler Platten oder an Plattengrenzen auftreten, siehe z. B. [Schwingenschuh et al., 2009b]. Die Tiefe von Beben beträgt i. d. R. einige km, kann in seltenen Fällen allerdings 600 km überschreiten, darunter auch ein sogenanntes Supershear-Beben. Zudem dürfe Plattentektonik/Subduktion sehr früh begonnen haben, der Anfang könnte bereits vor  $\sim 4.4$  Milliarden Jahren sein. Fernziel dieser Forschungen ist es Muster im elektromagnetischen Signal zu erkennen deren Ursache seismische Aktivität ist.

Eine umfassende Darstellung der VLF Empfangsanlage, sie ist zugleich Teil eines internationalen Netzwerkes, ist gegeben in [Schwingenschuh et al., 2011]. Dazu zählen neben (i) Antenne und (ii) Vorverstärker eine (iii) Soundkarte (M-Audio Delta 44) mit 4 Ein- und Ausgängen, der erste Eingang ist belegt vom vorverstärkten VLF Signal, (iv) GPS-Empfänger mit entsprechender Antenne und Puls-Pro-Sekunde (PPS) Ausgangssignal am 2<sup>ten</sup> Audioeingang, (v) maßgeschneiderte Software (UltraMSK) und (vi) ein PC mit Linux Betriebssystem, siehe Blockdiagramm Abb. 4.3. Abbildung 4.4 zeigt typische Tagesgänge für die {aktuelle/ursprüngliche} Anlage im Zeitbereich {kontinuierlich seit 15. Sep. 2009  $\rightarrow$ / $\leftrightarrow$  von 21. Aug. 2008 bis 11. Sep. 2009}. Einen Jahresgang der VLF Amplituden (Strecke {Rhauderfehn, Graz}-{DHO, GRZ}) im neuen System stellt Abb. 4.5 dar, Abb. 4.6 und 4.7 zeigen Teile des Empfangssystems und Dachaufbaus. Zusatzinformation liefert eine professionelle Wetterstation mit permanenter Aufzeichnung von (i) Temperatur, (ii) Druck und (iii) relativer Feuchte,  $\sim 3$  km entfernt am Observatorium Lustbühel, mit {1, 10} min zeitlicher Auflösung.

Resultate seismischer und nicht-seismischer Natur von ULF Messungen und VLF/LF Wellenausbreitung für lithosphärische, atmosphärische, ionosphärische Untersuchungen sind gebündelt in folgenden Studien. Umfangreiche Datensätze der Satellitenmission DEMETER und GPS/GNSS-TEC Auswertungen ergänzen einige Forschungen in komplementärer Art und Weise, Details dazu in Kap. 4.1.4. Ein Fokus bezüglich ULF (teilweise kombiniert mit VLF) ist gegeben in [Prattes et al., 2011b], [Prattes et al., 2011], [Schwingenschuh et al., 2014] und bei Berücksichtigung von Hintergrund-Quellen in [Prattes et al., 2012a]. Sub-ionosphärische VLF Studien mit mehreren Schwerpunkten sind (i) bei Variationen im Wellenleiter [Eichelberger et al., 2011], [Wolbang et al., 2012], [Schwingenschuh et al., 2012a], (ii) unter Heranziehung von Erdbebenereignissen [Wolbang et al., 2014], [Wolbang et al., 2014], (iii) bei Link-Charakterisierung



**Abbildung 4.1:** VLF Spektrum in log-Darstellung am Empfänger des Victor Franz Hess Forschungszentrums (Institut für Weltraumforschung, IWF), September 2009, Tageszeitpunkt. Man erkennt 50 Hz Netzstörungen inkl. Oberwellen im unteren Frequenzbereich und die zahlreichen Sender (Liste Tab. 4.2) im Hochpaßbereich ab  $\sim 10$  kHz. Sie werden herangezogen um die sub-ionosphärischen Ausbreitungspfade durch Messung der Variationen in Amplitude und Phase charakterisieren zu können.

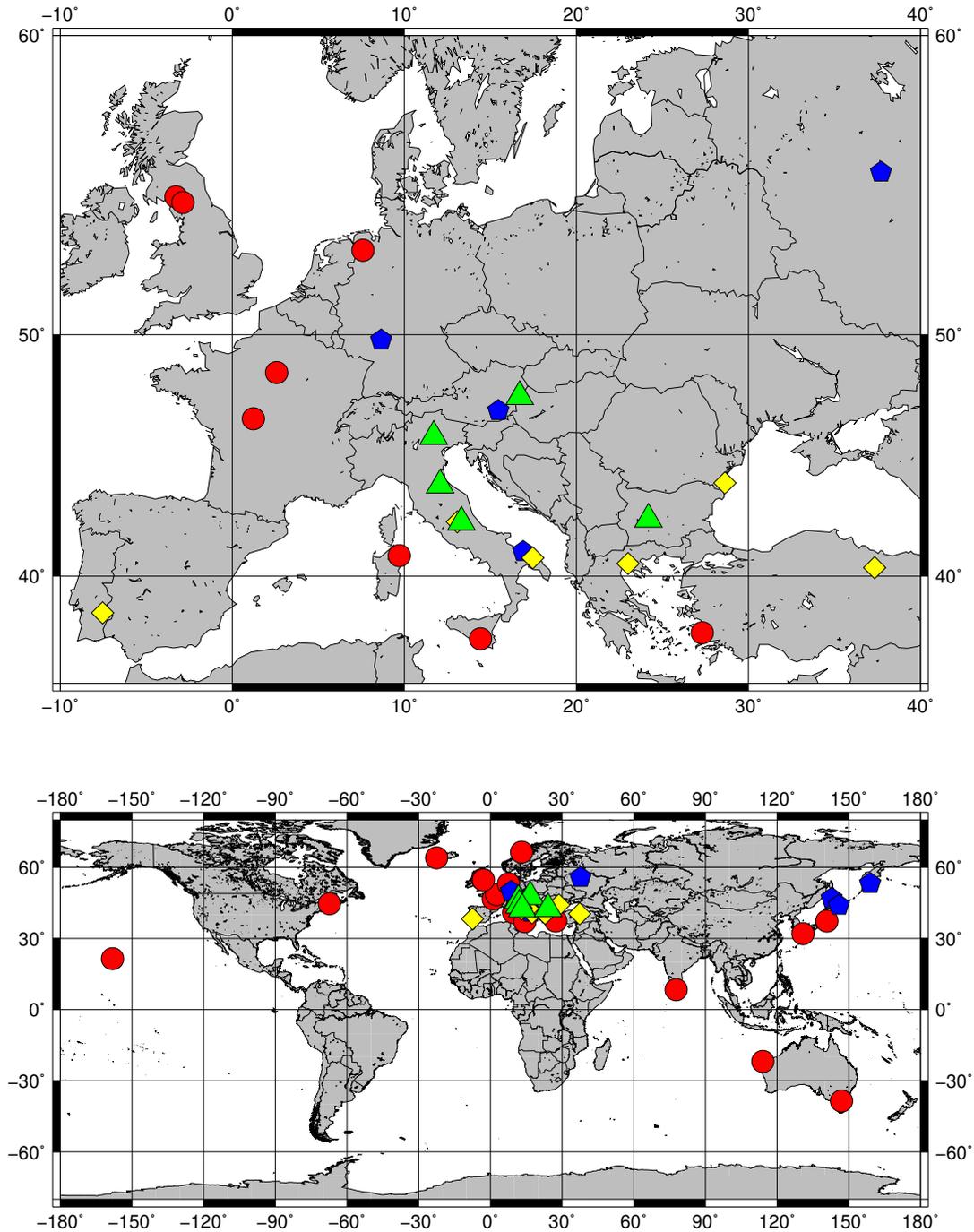
[Eichelberger et al., 2012c], [Eichelberger et al., 2015], [Eichelberger et al., 2016b] und (iv) bei stratosphärischen Parametern [Eichelberger et al., 2012b], [Solovieva et al., 2015], siehe ebenfalls dazu Grafiken in Abb. 4.8. Trans-ionosphärische Studien – meist DEMETER Satellit zentriert – sind [Boudjada et al., 2011], [Boudjada et al., 2014], [Boudjada et al., 2017a], mit Hinblick auf Fernerkundung [Boudjada et al., 2015], [Boudjada et al., 2016] und im engeren Zusammenhang mit aktuellen Erdbeben in Italien und Griechenland [Boudjada et al., 2017b], ein kombinierter Ansatz erfolgt in [Ouzounov et al., 2017]. Nicht-seismische VLF Variationen mit Bezug auf Solar Flares sind dargestellt in [Eichelberger et al., 2017]. Im Zusammenhang mit dem Coupled Dark State Magnetometer (CDSM) (Kap. A.1.7) der China Seismo Electromagnetic Satellite (CSES) Mission stehen [Schwingenschuh et al., 2015], [Schwingenschuh et al., 2016] und [Schwingenschuh et al., 2017].

### 4.1.2 Atmosphärische Untersuchungen

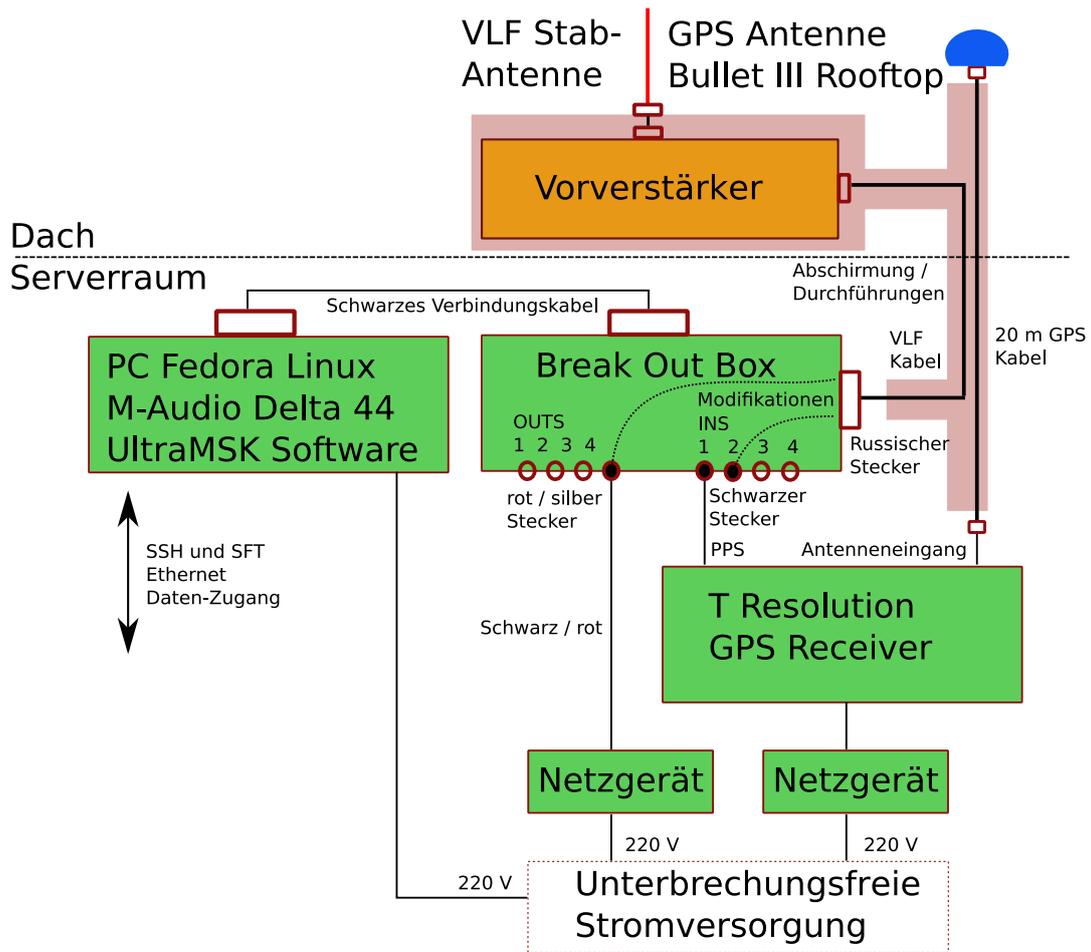
VLF Messungen mit atmosphärischen- und solaren Parametern sind dargestellt in Abb. 4.8. Das obere Paneel zeigt farbkodierte VLF Amplituden im Zeitbereich von 01. Nov. 2009 bis 31. Mai 2016. Überlagert sind die {Sonnenauf-, Sonnenunter-}gangs-Zeiten für die Grazer Empfangsanlage zusammen mit der {zivilen/bürgerlichen, nautischen/mittleren, astronomischen}-Dämmerung bei  $90 + \{6, 12, 18\}^\circ$ . Erkennbar ist das charakteristische Muster, am 3. Aug. 2010 (Tag 276) wurde die Sendeleistung nach der Abschaltphase (7 – 8 Uhr) erhöht (Sprung von 7 dB), ein weiterer Sprung  $\sim 20$  dB, verursacht durch den Empfänger, ist am Ende der Periode. Evident sind ebenfalls rasche Übergänge von Dämpfungsspitzen (gelb-grüner Bereich) am Nachmittag zu Sonnenuntergang jeweils Anfang Mai zugleich mit einem Fading der parallelen Struktur am Morgen. Der markante Balken zeigt reguläre Abschaltungen des VLF Senders ( $\sim 1$  h pro Tag im Zeitraum 7 – 8 UT), ein kontinuierlicher Abfall über die Jahre hinweg ist aufgrund einer zeitlichen Drift im Empfänger (ein leicht zu korrigierendes systematisches Verhalten). Das mittlere Paneel zeigt VLF Amplituden zu Mittagszeiten (11 – 13 UT), also bei D-Schicht Ionosphäre, zusammen mit solaren  $\text{Ly}\alpha$  Daten (typische  $\sim 27$  Tage Periode aufgrund der Rotation der Sonne), es ist ein merklicher Anstieg beginnend mit dem Solarminimum aus 2009 zu erkennen. Der Mittelwert der 2 h VLF Amplitude korreliert mit der solaren  $\text{Ly}\alpha$  Strahlung für ruhige Perioden, z. B. im Herbst 2010 (Tage 300 – 380), zugleich zeigt dieser Mittelwert in der VLF Amplitude eine höhere Variation im Winter. Das untere Paneel zeigt meteorologische Parameter für die nördliche Hemisphäre bei einem Druck von 10 hPa, entsprechend  $\sim 40$  km Höhe. Dargestellt ist die Temperatur, der longitudinal gemittelte zonale Wind (ein Maß für die Stärke des Polarwirbels) und longitudinal gemittelte Wärme- und Momentum-Flüsse (beide sind Indikatoren für eine gestörte Ionosphäre). Eine leicht erhöhte Dämpfung der VLF Amplitude in den Wintermonaten ist erkennbar (Winter Anomalie), größere Fluktuationen korrespondieren mit atmosphärischen Proxies (VLF Amplituden-Muster mit Perioden von planetaren Wellen, d. h.  $\sim \{5, 8 - 10, 14 - 20\}$  Tagen, siehe [Eichelberger et al., 2012c]). Abbildung 4.9 gibt für jeden der 8 Links den Amplitudenverlauf in diesen  $\sim 6.5$  Jahren wieder.

### 4.1.3 Solar Flare Studien

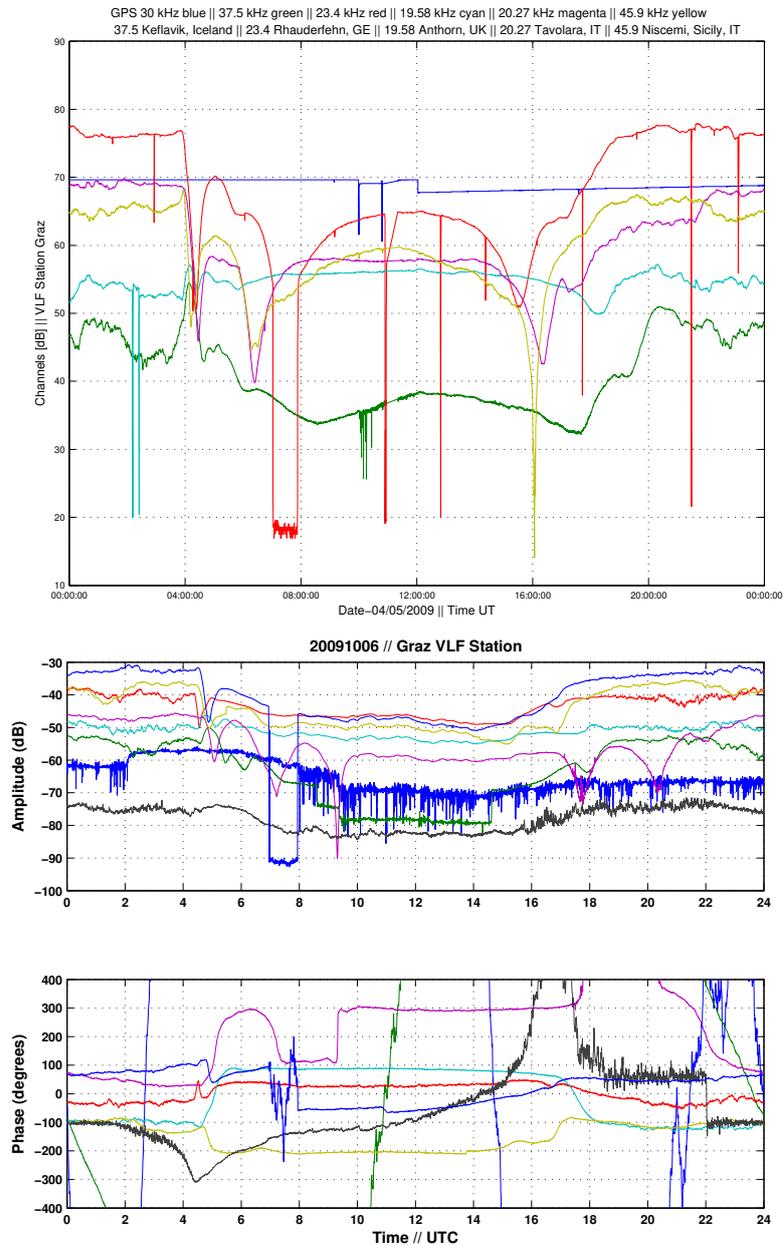
Das unmittelbare Ziel ist das Studium des Einflusses von X-class Flares in Verbindung mit etwas kleineren {C, M}-Class Ausbrüchen auf den VLF Wellenleiter, siehe Abb. 4.10, zusammen mit dem Aussteuerungsmuster X-ray vs. VLF Amplitude rund um den Spitzenwert.



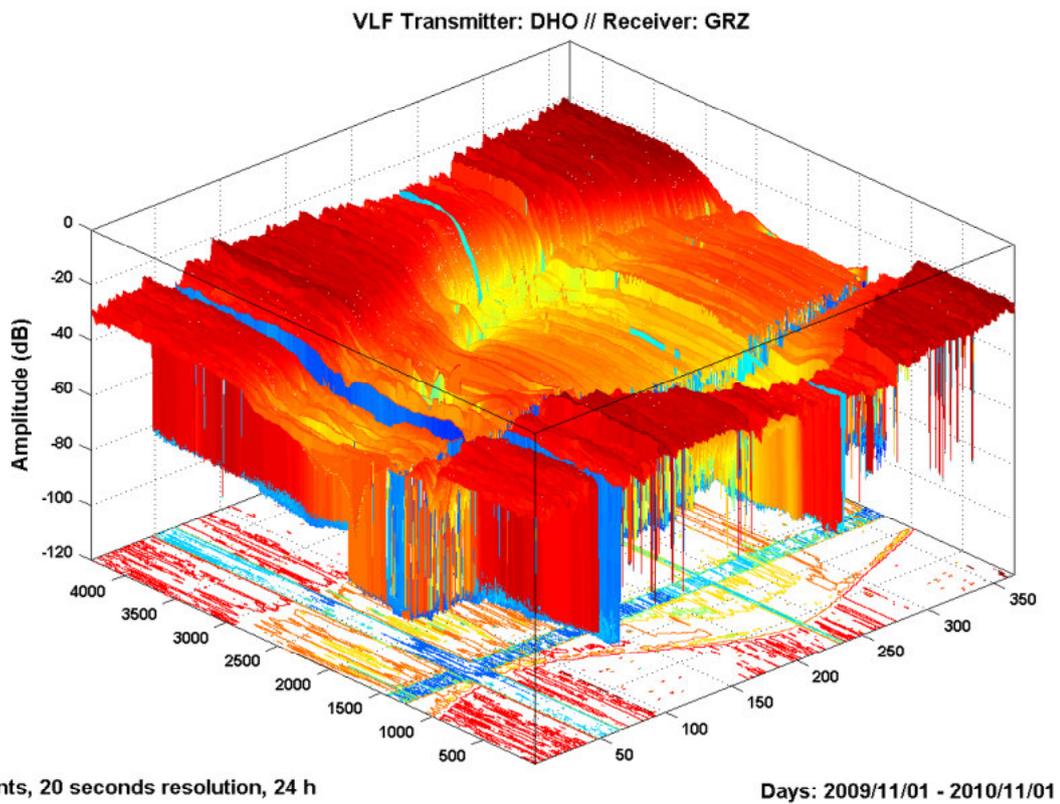
**Abbildung 4.2:** Karten der weltweiten und europäischen ULF/VLF/LF Stationen zur Untersuchung von seismo-elektromagnetischen Phänomenen und weiteren wissenschaftlich benachbarten Fragestellungen. VLF Sender (rote Kreise, ○, Tab. 4.2), VLF Empfänger (blaue Fünfecke, ◓), LF Empfänger (gelbe Rauten, ◊) und ULF Magnetometer (grüne Dreiecke, △) von Tab. 4.1; Stand Sommer 2017. Die einzelnen Systeme werden weiter technisch ausgebaut und das Netzwerk damit kontinuierlich erweitert. Das dichte Netz von GPS/GNSS Referenz-Stationen zur Bestimmung des TEC und LF Sender sind nicht eingezeichnet.



**Abbildung 4.3:** VLF Anlage am Victor Franz Hess-Forschungszentrum Graz, VLF Komponenten mit GPS System und deren Verschaltung, klimatisierter Innenraum inkl. unterbrechungsfreier Stromversorgung und Antennen-Außenbereich am Container des Daches – Blockdiagramm.



**Abbildung 4.4:** Obere Grafik: VLF Empfangssignale von 5 Sendern (siehe Tab. 4.2) und das GPS Signal (blaue Linie) erhalten mit der ursprünglichen Anlage (inzwischen erneuert, siehe Abb. 4.6) am 05. April 2009, ein Tag vor dem Erdbeben in L'Aquila, Italien. Erkennbar sind die typischen Tagesgänge und Störungen. Studien sowohl im VLF/LF, siehe [Schwingenschuh et al., 2010b], [Schwingenschuh et al., 2010a], [Schwingenschuh et al., 2011], [Wolbang et al., 2013], [Wolbang, 2014] als auch im ultra low frequency (ULF) Bereich, siehe [Prattes et al., 2010a], [Prattes et al., 2010b], [Prattes et al., 2011a], [Schwingenschuh et al., 2013], [Besser et al., 2010a], [Prattes et al., 2011] (die Entfernung zwischen dem L'Aquila Observatorium mit dem Magnetometer und dem Epizentrum beträgt nur  $\sim 6$  km), zeigen mögliche Verbindungen zwischen Erdbeben und Wellenausbreitung auf. Untere Grafik: VLF Empfangssignale von 8 Sendern am 06. Oktober 2009, neues und erweitertes VLF System mit momentan 12 (technisches Maximum für stabilen Betrieb) Kanälen.



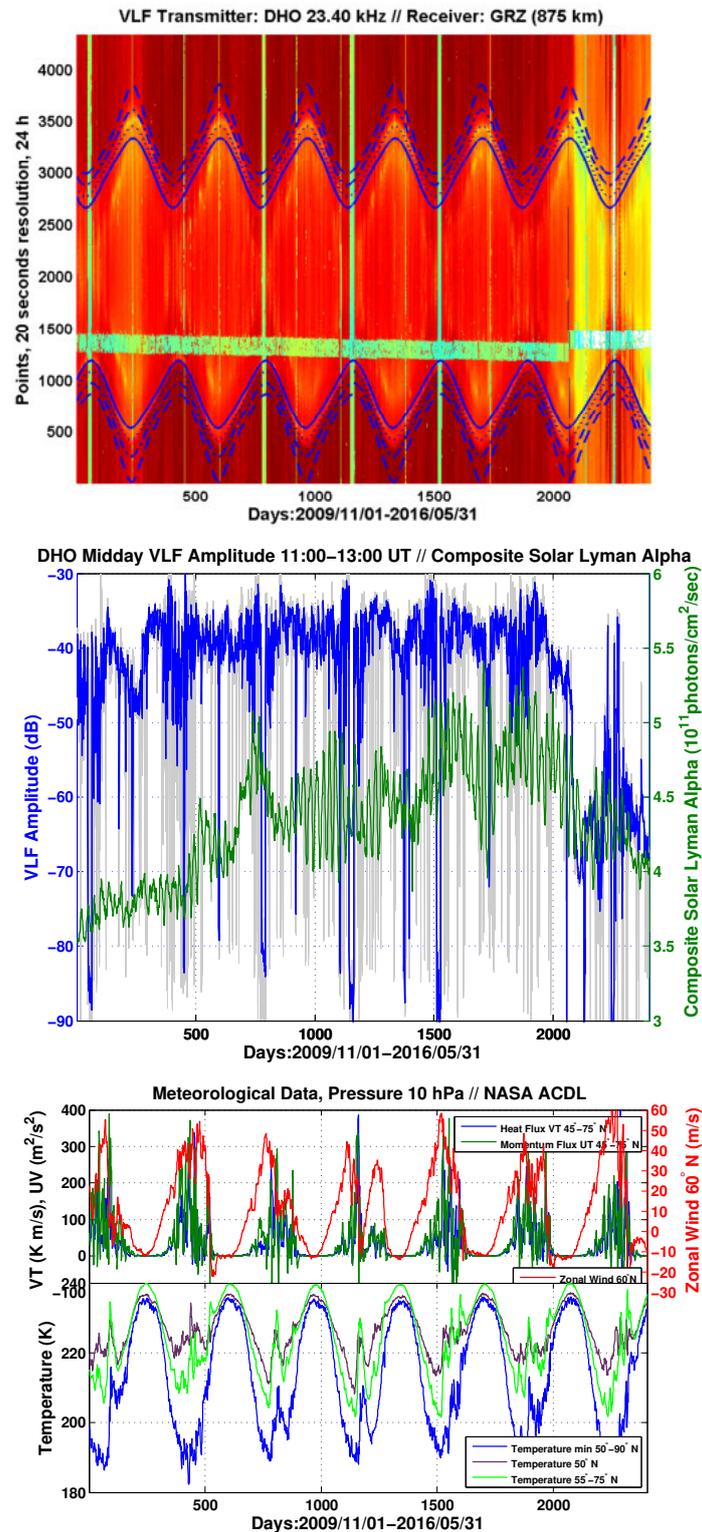
**Abbildung 4.5:** VLF Amplitudendaten für ein Jahr – 2009/11/01 bis 2010/11/01 – zwischen dem Sender Rhauderfehn (DHO) und dem Empfänger Graz (GRZ). Erkennbar sind (i) die beiden regulären täglichen Spitzen zu Sonnenauf- und Sonnenuntergang, (ii) der Rauschpegel wenn der Transmitter ausgeschaltet ist und (iii) jährliche Schwankungen in der Amplitude mit höheren Werten im Winter und Abnahme Richtung Sommer.



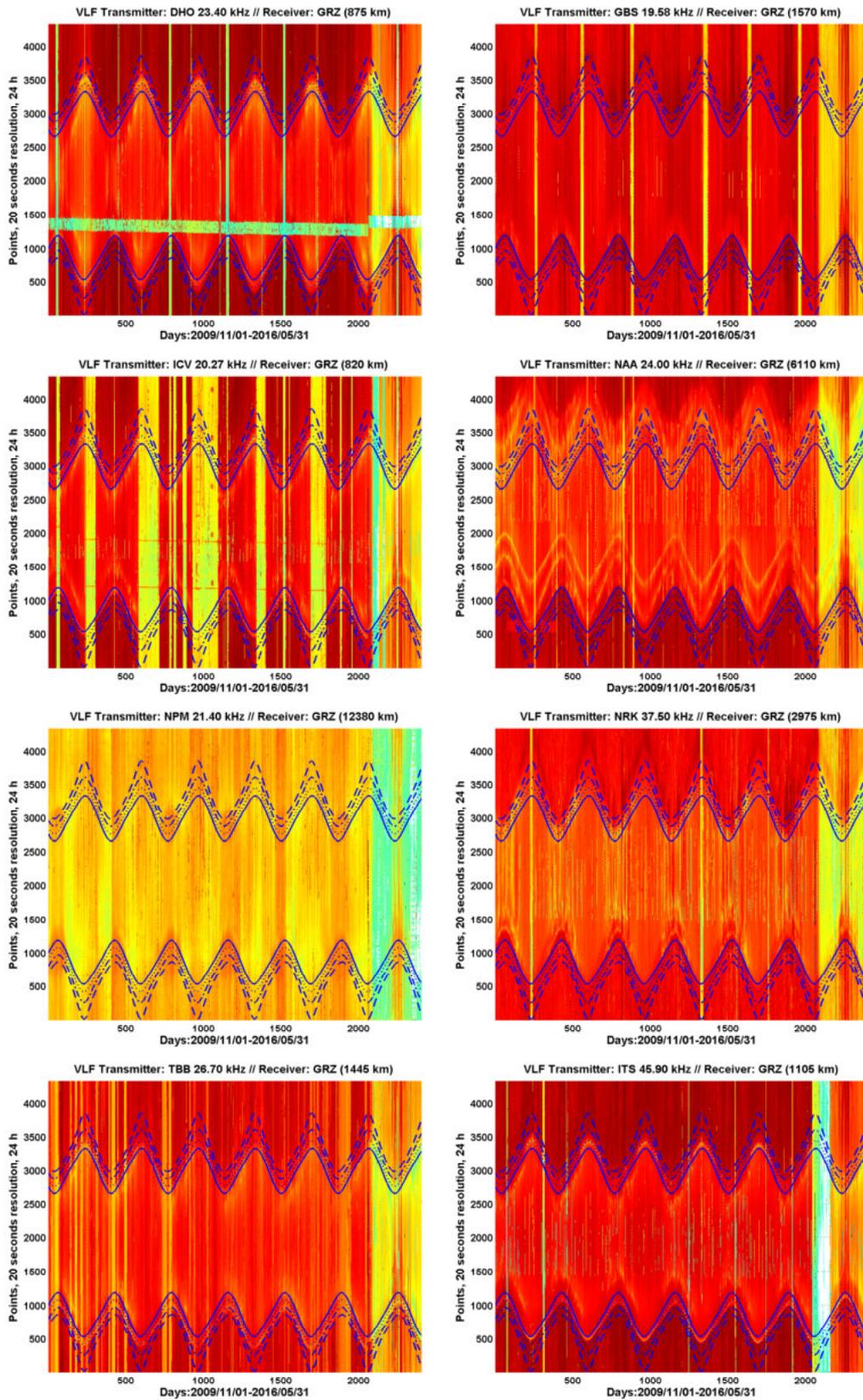
**Abbildung 4.6:** VLF Antennensystem zur Bestimmung der Ausbreitungseigenschaften von elektromagnetischen Wellen im Bereich von  $\sim 15 - 48$  kHz zwischen weltweit verteilten Sendestationen und dem Empfänger am Dach des IWF's in Graz, siehe Tab. 4.2. Die linke Abbildung zeigt den VLF Antennenaufbau (fotografiert neben der GPS Antenne), in der Mitte ist der Vorverstärker zu erkennen und im rechten Bild die Schutz-Ummantelung mittels Oloid-Tasche.



**Abbildung 4.7:** Die linke obere Abbildung zeigt die Schutz-Ummantelung des Vorverstärkers und die Verstreben samt Abspannungen der Antenne, rechts davon erkennt man die Befestigung am Dach-Container mit GPS- und VLF-Antenne. Die beiden Grafiken darunter sind Aufnahmen bei winterlichen Bedingungen, ein Szenario für nur wenige Tage pro Jahr. Die Kabeldurchführung in den Serverraum ist mehrfach gegen äußere Einflüsse geschützt.



**Abbildung 4.8:** VLF Messungen der Strecke DHO-GRZ im Zeitraum 01. Nov. 2009 bis 31. Mai 2016, Amplituden von 11 – 13 UT (Farbskala gemäß Abb. 4.5), solare Ly $\alpha$  Strahlung (Charakterisierung der äußeren Einflüsse auf die Mesosphäre) und atmosphärische, meteorologische Parameter bei 10 hPa Druck ( $\sim 40$  km Höhe), d. h. Größen für den stratosphärischen Einfluß auf den VLF Wellenleiter.



**Abbildung 4.9:** VLF Amplituden von 8 Sendern, Farbskala gemäß der 3D Darstellung Abb. 4.5, Senderbezeichnung laut Tab. 4.2, mit den sub-ionosphärischen Pfaden zum Empfänger Graz für einen Zeitraum von nahezu 6.5 Jahren, siehe Abb. 4.8 und [Eichelberger et al., 2017].

**Tabelle 4.1:** Kern-Empfangsstationen im ULF/VLF/LF Frequenzband mit Magnetometern und UltraMSK oder Eletttronika Geräten und deren geografische Lage. Das International Network for Frontier Research on Earthquake Precursors (INFREP) in Bari ist ein zentraler Knoten für den Datenzugriff. Die Station Malta (\*) befindet sich seit 25. August 2017 in Graz, örtlich gemeinsam mit der VLF Station aufgestellt. Über Moskau gibt es Verbindungen zu den fernöstlichen Stationen in Sachalin (N 46° 57', O 142° 45'), Kamtschatka (N 53° 09', O 158° 55') auf den Kurilen (Kunaschir), nach Kirgistan und Varanasi in Indien. Die ULF Stationen bilden die SEGMA Kette, z.T. aufbauend auf Chimag ([Magnes, 1999]), siehe Kap. A.4.7 und Abb. 4.2. Ein weiteres Chimag Instrument wird im Hellenig GeoMagnetic Array (ENIGMA), Griechenland, für Pulsations-Untersuchungen verwendet.

ULF/VLF/LF Stationen und Systemaufbau, Sender in Tab. 4.2 gelistet				
Nr.:	Akronym	f-Band	Empfänger	System, Anmerkungen, Koordinaten
1	GRZ	VLF	Graz	UltraMSK, N 47° 02' 40.38'', O 15° 28' 47.68''
2	MOS	VLF	Moskau	UltraMSK, N 55° 45', O 37° 42'
3	ITBa	VLF	Bari	OmniPal, N 41° 06', O 16° 53', 5 empf. Sender
4	DST	VLF	Darmstadt	UltraMSK, Anlage kurzzeitig in Betrieb
5	SHE	VLF	Sheffield	UltraMSK, N 53° 23', W 1° 29', 14 Sender
6	IT-Mi	VLF / LF	Italien, Miano	Elettronika, N 44.36°, O 10.99°
7	IT-An	VLF / LF	Italien, Antrodoco	Elettronika, N 42° 25', O 13° 05'
8	IT-Du	VLF / LF	Italien, Duronia	Elettronika, N 41.67°, O 14.47°
9	IT-Tc	VLF / LF	Italien, Santeramo	Elettronika, N 40° 49', O 17° 28'
10	GRE	VLF / LF	Gri., Thessaloniki	Elettronika, N 40° 34', O 23° 00'
11	TUR	VLF / LF	Türkei, Canakkale	Elettronika, N 40° 23', O 37° 20'
12	ROM	VLF / LF	Rumänien, Eforie-N	Elettronika, N 44° 04', O 28° 38'
13	POR	VLF / LF	Portugal, Évora	Elettronika, N 38° 20', W 07° 32'
14	CIP	VLF / LF	Zypern, Nikosia	Elettronika, N 35.17°, O 33.35°
15	CRE	VLF / LF	Kreta, Chania	Elettronika, N 35.52°, O 24.02°
16a	MAL *	VLF / LF	Malta, Valletta	Elettronika, N 35.90°, O 14.51°
16b	Graz	VLF / LF	Österreich, Graz	Elettronika, N 47° 02' 40.38'', O 15° 28' 47.68''
17	CST	ULF	Castello Tesino, It.	Fluxgate (Chimag), N 46° 00', O 11° 42'
18	NCK	ULF	Nagycenk, Ungarn	Fluxgate (Chimag), N 47° 36', O 16° 42'
19	RNC	ULF	Ranchio, Italien	Fluxgate (Chimag), N 43° 58', O 12° 05'
20	AQU	ULF	L'Aquila, Italien	Fluxgate Magnetometer, N 42° 23', O 13° 19'
21	PAG	ULF	Panagyurishte, Bulg.	Searchcoil, N 42° 30', O 24° 11'
22	KAM	VLF	Kamtschatka	UltraMSK, N 53.15°, O 158.92°, 4 Sender
23	SAC	VLF	Sachalin	UltraMSK, N 46.96°, O 142.75°, 7 Sender
24	KUR	VLF	Kunaschir, Kurilen	UltraMSK, N 44.035°, O 145.861°, 7 Sender
25	KIR	VLF	Kirgistan	UltraMSK, N 42.40°, O 74.41°, 8 Sender
26	VAR	VLF	Varanasi, Indien	UltraMSK, N 25.26°, O 82.99°, 12 Sender

VLF Sendestationen, Empfänger Graz, IWF, N 47° 2' 40.38'', O 15° 28' 47.68''				
Nr.:	Akro.	Freq. (kHz)	Entf. (km)	Sendestation, geographische Koordinaten
1	JXN	16.40 *	2160	Aldra, Norwegen, N 66° 24' 55.87'', O 13° 3' 45.20''
2	GBS	19.58 ◊	1570	Anthorn, England, N 54° 54' 41.91'', W 3° 16' 42.43''
3	ICV	20.27	820	Tavolara, Sardinien, Italien, N 40° 54' 51.23'', O 9° 43' 30.47''
4	HWU	20.90 * *	1080	Le Blanc, Frankreich, N 46° 42' 48.86'', O 1° 14' 47.91''
			980	St. Assise, Frankreich, N 48° 32' 47.99'', O 2° 34' 27.44''
5	NPM	21.40	12380	Lualualei, Hawaii, USA, N 21° 25' 9.15'', W 158° 8' 52.34''
6	GBZ	22.10 * ◊	1540	Skelton, England, N 54° 43' 54.48'', W 2° 52' 58.92''
7	DHO	23.40	875	Rhauderfehn, Deutschland, N 53° 5' 7.20'', O 7° 36' 49.75''
8	NAA	24.00	6110	Cutler, Maine, USA, N 44° 39' 10.10'', W 67° 17' 6.98''
9	TBB	26.70	1445	Bafa, Türkei, N 37° 24' 45.55'', O 27° 19' 26.96''
10	NRK	37.50	2975	Keflavik, Island, N 64° 1' 5.80'', W 22° 34' 5.97''
11	ITS	45.90	1105	Niscemi, Sizilien, Italien N 37° 7' 32.17'', O 14° 26' 11.16''
12	VTX	19.20	7240	Vijayanarayanam, Indien, N 8° 23' 13.46'', O 77° 45' 10.02''
13	NTS	18.60	16010	Woodside, Victoria, Australien, S 38.48°, O 146.93°
14	NWC	19.80	12390	Nord-West Küste, Australien, S 21.82°, O 114.04°
15	JJI	22.20	9200	Kyushu, Japan, N 31.95°, O 130.84°
16	JJY	40.00	9190	Honshu, Japan, N 37.37°, O 140.85°

**Tabelle 4.2:** VLF Sendestationen (Spektrum Abb. 4.1) empfangen in Graz am Dach des Victor Franz Hess Forschungszentrums (IWF). Mit \* gekennzeichnete Sender sind am 19. Okt. 2009 hinzugekommen (Start der Aufzeichnungen am 14. Sep. 2009), für zwei Sender (◊) ist die Frequenzuteilung möglicherweise umgekehrt, bei \* ist die tatsächliche Sendestation unsicher (variabel). Der Sender VTX wurde am 01. Dez. 2011 in die Empfangsliste (17 kHz, seit 28. Feb. 2012 beträgt die Frequenz 19.2 kHz) eingefügt, die Australischen- und Japanischen-Sender werden vom Russischen Fern-Ost Teil (unterer Abschnitt Tab. 4.1) des Empfangsnetzes verwendet.

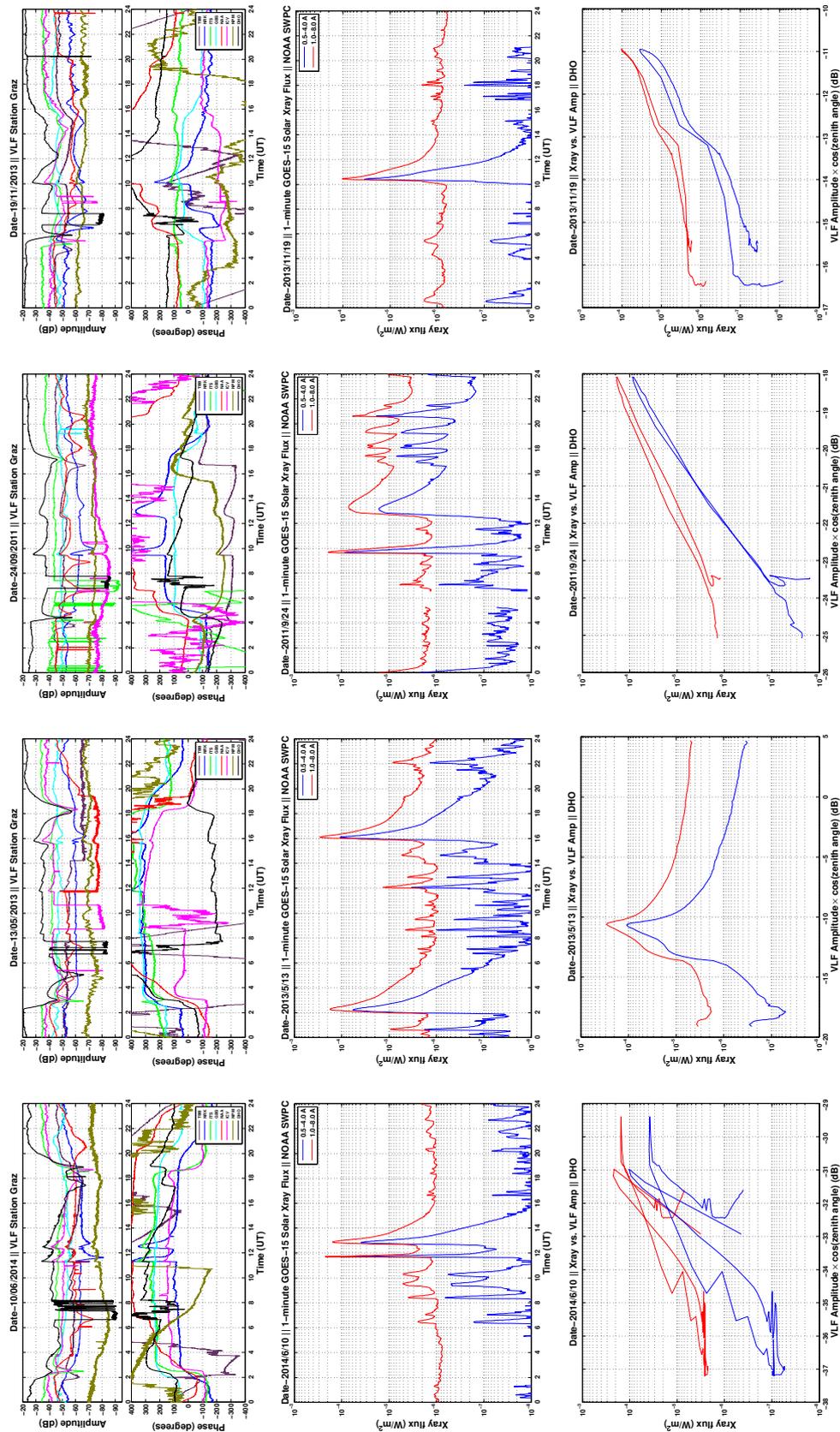
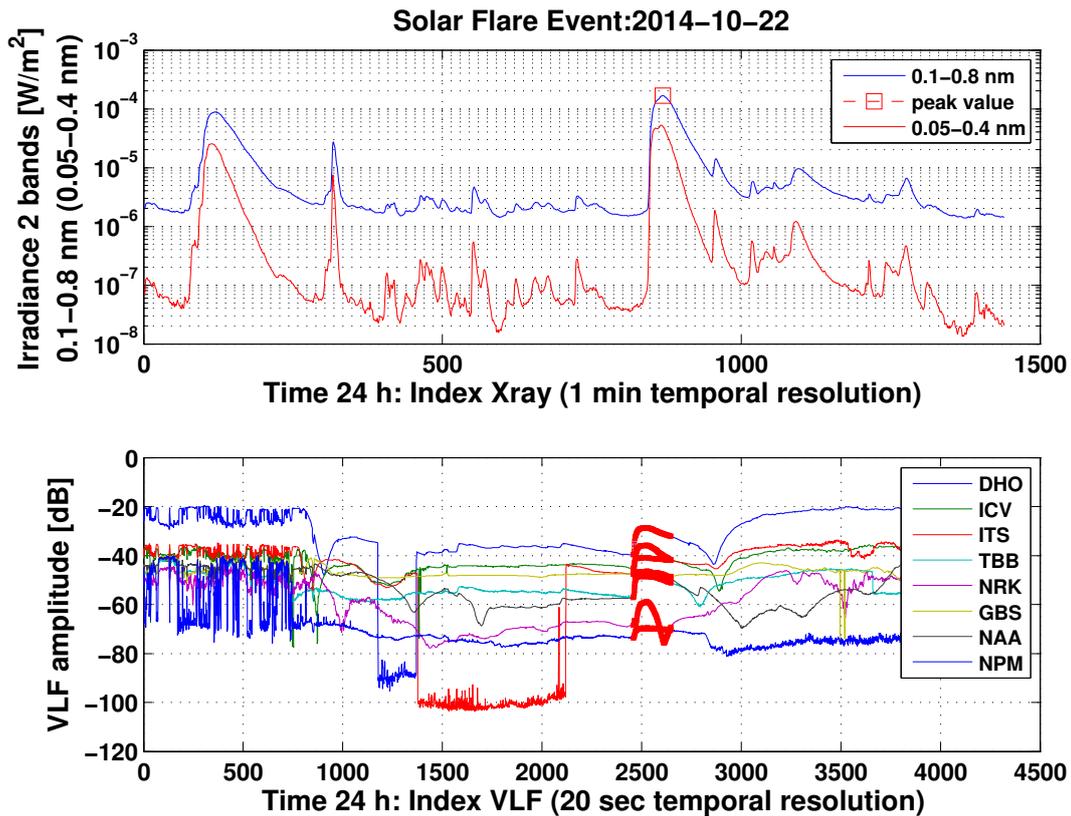


Abbildung 4.10: VLF Amplituden- und Phasen-Messungen verbunden mit 4 markanten X-class Solar Flare Ereignissen im Sonnenszyklus 24.

Abbildung 4.11 zeigt VLF Amplituden-Variationen hervorgerufen durch ein X-class Flare Ereignis am 22. Oct. 2014. Der Spitzenwert in den GOES Röntgen-Daten (2 Kanäle, 0.1 – 0.8 nm und die härtere Komponente 0.05 – 0.4 nm, zeitliche Auflösung 60 sec) wird eruiert (markiert mit rotem Quadrat) und die dazugehörige Variation in den VLF Amplituden (Auflösung 20 sec) bestimmt (größere Linienbreite, rot markiert im unteren Teil der Grafik). Beginnend von der Basis bis zum Maximalwert des Ereignisses ergeben sich die Variationen  $\Delta X\text{-ray}$  und  $\Delta A_{\text{VLF}}$  für alle 8 Pfade im VLF Wellenleiter. Abb. 4.12 ist



**Abbildung 4.11:** X-ray Solar Flare vs. VLF Amplituden Variation, [Eichelberger et al., 2017]. Anmerkung: Der technisch bedingte zeitliche Versatz der VLF Anlage ist in der Auswertung berücksichtigt und führt zu keiner Änderung der Schlußfolgerungen.

die grafische Darstellung eine Kataloges von Solar Flare induzierten VLF Amplituden-Variationen entlang der sub-ionosphärischen Pfade zwischen 8 Sendern und der Grazer seismo-elektromagnetischen UltraMSK Empfangsstation. Diese Messungen nicht-seismischen Ursprungs dienen zur sorgfältigen Charakterisierung des VLF Wellenleiters und damit zur Entflechtung möglicher Modifikationen durch Erdbeben auf der einen Seite und weiteren natürlichen und künstlichen Aussteuerungen in Amplitude und Phase auf der anderen Seite. Der untersuchte Zeitraum erstreckt sich von November 2009 bis Mai 2016, d. h. er umfaßt einen großen Teil des aktuellen Sonnenzyklusses 24. In Summe sind es 373 VLF Amplituden- und Phasen-Modifikationen in Verbindung mit {C, M, X}-Class Flares. Die X-ray Daten sind NOAA GOES Messungen. Es ergibt sich die Folgerung, daß mit diesem Empfänger auf mittlerer geographischer Breite ein Service für Solar-Flare Monitoring betrieben werden kann.

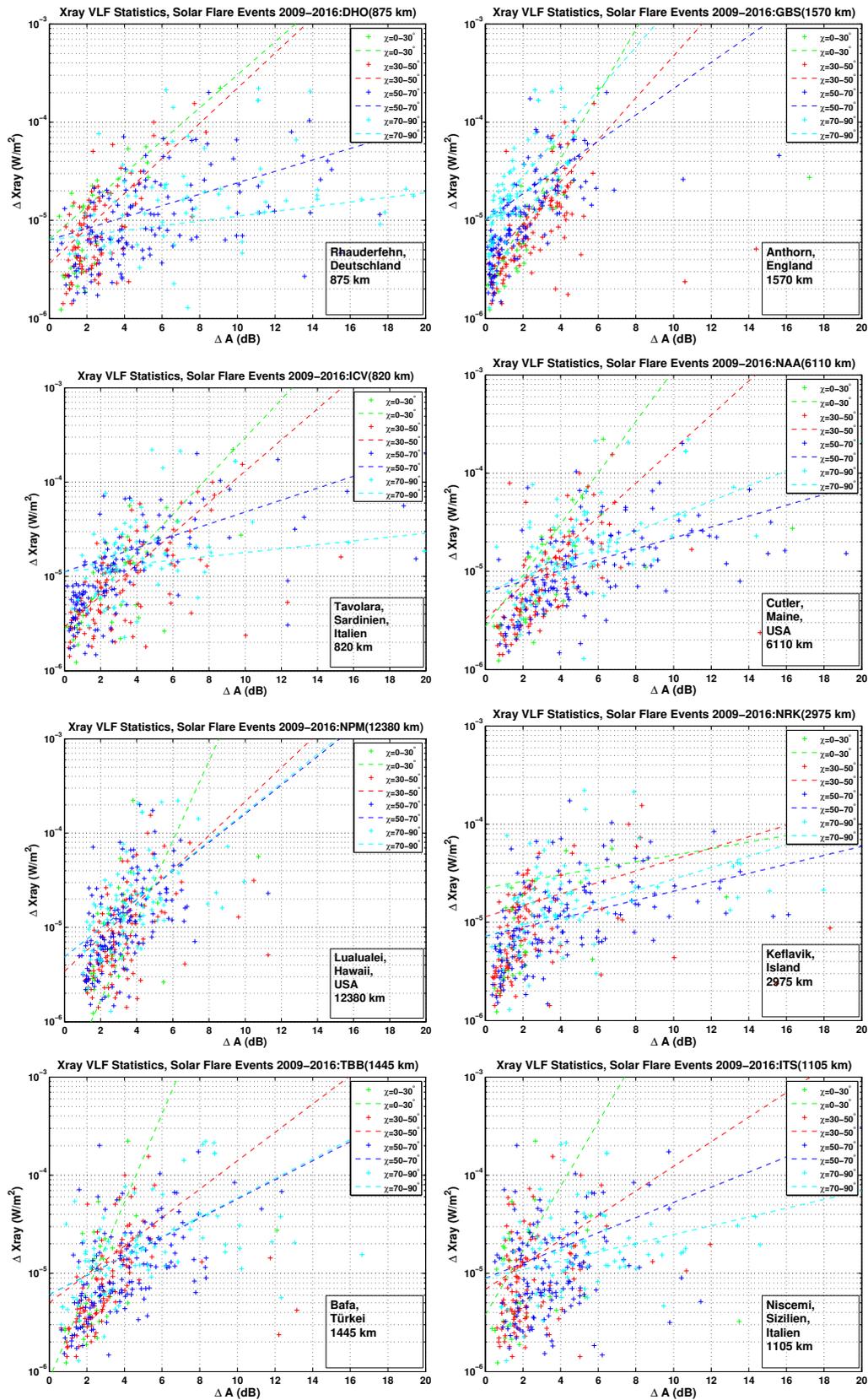


Abbildung 4.12: Solar Flare Statistik für alle 8 VLF Pfade mit Ausgleichsgeraden in 4 Zenitwinkelbereichen,  $\chi_{1-4} = \{0-30^\circ, 30-50^\circ, 50-70^\circ, 70-90^\circ\}$ , [Eichelberger et al., 2017].

#### 4.1.4 Seismo-elektromagnetische Untersuchungen

##### Grundlagen zu seismo-elektromagnetischen Methoden

Immer wieder vorkommend, so auch prominent in der jüngsten Vergangenheit, z. B. im Apennin, zeigen Erdbeben ihre verheerende Wirkung auf die Gesellschaft. Ein Ansatz um dieses Naturphänomen umfangreicher technisch und wissenschaftlich zu untersuchen basiert auf elektromagnetischer Basis, sogenannte seismo-elektromagnetische Methoden (SEM). Eine Zielrichtung dabei ist die experimentelle Untersuchung von elektromagnetischen Phänomenen in der Ionosphäre, Atmosphäre, Erdoberfläche (bzw. Pedosphäre) und Lithosphäre mit Bezug zu Erdbeben. Das raum-zeitliche Gitter in diesem Volumen in somit durch diese konventionelle Schichtung gegeben, in ihm erfolgt die Unterteilung zwischen seismischen und nicht-seismischen Quellen. Bei der seismischen Aktivität wird unterteilt in (i) koseismische- (siehe [Astafyeva et al., 2013]), (ii) präseismische- ([Molchanov and Hayakawa, 2008]) und (iii) postseismische Ereignisse. Bei seismischen Ereignissen müssen zuallererst die elektrischen- und magnetischen Felder in der Lithosphäre betrachtet werden. Daraus ergeben sich Fragen bezüglich der zugrundeliegenden Natur des Signals, die Formierung einer Vorbereitungszone (in ihr wird sich das Beben ereignen) und der Aufbau eines Bereiches um diese Zone der in der Lage ist die Wellenausbreitung zu beeinflussen. Dieses komplexe Gemenge favorisiert Einzelparameter die zu einer robusten Multi-Parameter Methode kombiniert werden können. Ein Ansatz dazu sind Neuronale Netzwerke, in diesem Fall werden Zeitreihen mit hohem S/N der vier komplementären Einzelparameter (ULF,  $2 \times$  VLF, GPS/GNSS-TEC), wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, zu einem Index kombiniert. Alle Einzelparameter sind für sich genommen etabliert, sie erstrecken sich über lange Zeitspannen und sind mit Meß-Netzwerken bestimmt, z. B. SEGMA oder INFREP.

##### Übersicht einiger existierender SEM Modelle

Theoretische Modelle der seismischen Beeinflussung auf die Atmosphäre und Ionosphäre basieren zumeist auf Gas-Flüssigkeit-( $H_2O$ )-Prozessen an der Erdoberfläche. Darunter fallen Modifikationen in Dichte und Verteilung von geladenen Teilchen, z. B.  $Rn^{222}$  Fluktuationen und Temperaturänderungen. Meist hat der Bereich der detektierbaren Veränderung nur geringe Schichtdicke (einige 100 m) und lokale/regionale Ausdehnung, Modelle setzen hier auf unterschiedliche Erklärungen wie es zu Wirkungen hinauf bis zur Ionosphäre kommen kann. (i) Ein Ansatz verwendet das besagte  $Rn^{222}$  in der Erdkruste zur Ionisierung der tiefen Atmosphärenschichten, in weiterer Folge entsteht eine Veränderung des globalen elektrischen Kreislaufs ("Global atmospheric Electrical Circuit", GEC), letztlich kommt es hier zu einer Widerstandserhöhung durch Ionen-Clustering. (ii) Ein zweiter Ansatz verwendet Schwerewellen (Atmospheric Gravity Waves, AGWs) um die beeinflusste Schicht nahe der Erdoberfläche in höhere Bereiche auszudehnen. Dabei wären Effekte mit Perioden im Bereich 7 – 60 min an der Grenze Atmosphäre-Ionosphäre zu erwarten. Reguläre großflächige Turbulenzen der AGWs führen zu ebensolchen ionosphärischen Turbulenzen. Während seismischer Aktivität sollen seismisch getriggerte AGWs mit horizontalen Skalen von 10 – 50 km eine Modifikation der ionosphärischen Turbulenz erzeugen. (iii) Im Gegensatz zu Modellen mit sporadischen Gas/Wasser-Freisetzungen zeigt das Eindringverhalten des elektrischen Feldes mit lithosphärischem Ursprung in die Ionosphäre sehr kleine Werte, es ist deshalb unwahrscheinlich, daß in diesem Szenario seismische Felder detektiert werden können. Dies gilt für weitere angedachte Modelle – besser gesagt Hypothesen – die einen direkten lithosphärischen Einfluß in der Ionosphäre beschreiben. Trotz gewisser Unwägbarkeiten bilden diese Prämissen eine annehmbare Ausgangsbasis für detaillierte Studien.

##### Wissenschaftliche Lösungsansätze zu SEM Vorgängen

Die Hauptzielsetzung ist die experimentelle Untersuchung von elektrischen und magnetischen Feldern in der Lithosphäre/Erdoberfläche, Atmosphäre und Ionosphäre mit seismischem Ursprung. Diese Grundlage, daß lithosphärische Variationen  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  Anomalien in der terrestrischen Umgebung erzeugen, ermöglicht die Messung mittels Einzelparametern oder vereint in einem Index unter Berücksichtigung von seismischen und nicht-seismischen Quellen. Als Ausgangsdaten für klassische seismische Messungen dienen Datenbanken des European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) und vom United States Geological Survey (USGS), bei elektromagnetischen Beobachtungen ist das Hauptaugenmerk auf terrestrischen

und satellitenbasierten VLF-, ULF- und GPS/GNSS-Netzwerken. Satelliten Missionen sind DEMETER (2004 – 2010) und CSES (Start 2018). Relevante Messungen kommen zusätzlich von Phänomenen mit nicht-seismischem Ursprung, z. B. geomagnetische Stürme oder reguläre ionosphärische Variationen. A priori Information bei der Einzelmethoden hilft den Parameter-Raum für seismische Signale einzuschränken.

- GPS/GNSS-TEC (in TECU): Der Anstieg von TEC in der Nacht, wenn die Ionosphäre ruhig und TEC konstant ist, sollte um statistisch signifikant in  $2\sigma$  zu sein zumindest 2 TECU (bis zu 10) betragen. In der Nacht nach einem Erdbeben sollen sich die ursprünglichen, mittleren Verhältnisse wieder einstellen, [Stangl et al., 2011].
- VLF terrestrisch (Amplitude in V/m und Phase in Grad): Die Analyse basiert auf der Residuen-Methode, siehe [Rozhnoi et al., 2005], die Differenz des monatlichen Mittelwertes und des aktuellen Wertes wird berechnet. Bei seismisch gestörten Verhältnissen ist ein absinken zu erwarten ( $2\sigma$ ). Um als signifikant zu gelten muß diese Einbuchtung in der Amplitude zumindest 3 Tage anhalten.
- VLF Satellit ( $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ): Ein prä-seismisches Ereignis ist der Amplitudenabfall von einem terrestrischen Sender einige Tage vor einem Erdbeben, die Flußdichte ist in Verbindung mit Amplituden-Variationen des elektrischen Feldes (DEMETER/ICE Satelliten-Experiment). Die Regel ist gemäß [Molchanov et al., 2006], bestätigt durch [Boudjada et al., 2008].
- ULF (nT und Polarisation): Es werden nur magnetisch ruhigere nächtliche Perioden verwendet. Die spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density, PSD) ist im Bereich 10 – 500 mHz, die Leistung ist normiert auf den Mittelwert und die Standardabweichung, das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Leistung (Polarisation) wird berechnet. Für seismo-magnetische Ereignisse übersteigt die Polarisation die  $2\sigma$  Grenze für mehr als einen Tag (Regel von [Hayakawa et al., 1996], verbessert von [Ida et al., 2008], [Prattes et al., 2008], [Prattes et al., 2011]).

### SEM Datenverarbeitung

**Bodenbasierte Beobachtung von Einzelparametern** Der VLF Link ist ein etabliertes Werkzeug zum Monitoring des Erdoberfläche-Ionosphäre Wellenleiters (sub-ionosphärische Methode), Amplituden- und Phasen-Verläufe zwischen Navigationssendern und Empfängern zeigen ein charakteristisches Muster, siehe Abb. 4.4. Sind Sendefrequenz und Entfernung fixiert, dann sind die beobachteten VLF Signalparameter hauptsächlich bestimmt durch die Höhe des Wellenleiters und durch den Gradienten in der Elektronendichte [Ledinegg, 1982]. Aus diesem Grund ist der VLF Signalverlauf ein Standard zur Bestimmung von kurzzeitigen Elektronendichte-Variationen an der Grenze zwischen unterer Ionosphäre und oberer Atmosphäre verbunden mit solarer Strahlung, z. B. X-ray Flares, Einfall von energetisch geladenen Teilchen oder Ionisationen verursacht durch Blitze, [Schwingenschuh et al., 2010a], [Friedrich and Torkar, 2001]. Diese schmalbandigen Radiosignale im Frequenzbereich 10 – 50 kHz werden kontinuierlich aufgezeichnet, falls das Signal in den Einflußbereich einer Erdbeben Präparationszone kommt ist es grundsätzlich möglich seismische Aktivität zu detektieren [Biagi et al., 2004]. Zwei Methoden werden bei der Auswertung des VLF Signals verwendet, (i) die Residual- und (ii) Terminator-Time Methode.

ULF Analysen eröffnen die Möglichkeit lithosphärische- und atmosphärische Parameter zu bestimmen, VLF gestattet es ionosphärische Störungen über einem Erdbeben zu detektieren. Folgende ULF Anomalien werden bestimmt: (i) Starke seismische Aktivität verursacht Änderungen in atmosphärischen Parametern, das führt zu einer Variation bei der Ausbreitung von ULF Wellen in der Atmosphäre und ist detektierbar am Boden. (ii) ULF Komponenten von elektromagnetischen Wellen erzeugt am Erdbebenherd können am Boden detektiert werden unter Berücksichtigung der Eindringtiefe (Skin-depth). Die SEGMA Kette eröffnet diese Möglichkeiten [Schwingenschuh et al., 2000]. Sowohl lokale als auch globale geomagnetische Variationen können unterschieden werden, Mehrpunkt-Messungen sind ein wichtiger Faktor um lokale ULF Ereignisse mit Erdbebenbezug herausfiltern zu können [Prattes et al., 2011], [Prattes et al., 2012b] und [Schwingenschuh et al., 2012b]. Wichtige Qualitätsmerkmale der Station am Ort der Messung sind bestimmt durch den magnetischen Hintergrund, d. h. meist durch zivilisationsbedingte Aktivität. Mit Bezug zu erdbebenrelevanten Ereignissen sind GPS/GNSS-TEC und VLF in Kombination mit ULF zusätzlich vielversprechende nicht-seismische Methoden.

GPS/GNSS Satelliten senden zumindest zwei Signale im Bereich 1 – 2 GHz. Die Ionosphäre als dispersive Medium verändert damit die Laufzeiten bei diesen Frequenzen. Nachdem die F-Schicht mehr als 90 % aller geladenen Teilchen enthält sind die Zeitdifferenzen zwar dort am größten, jedoch ist durch das Verschwinden der D-Schicht in der Nacht diese Variation ebenfalls signifikant und kann gemessen werden. Für gewöhnlich werden die Laufzeit-Differenzen in den Total Electron Content (TEC) Parameter konvertiert

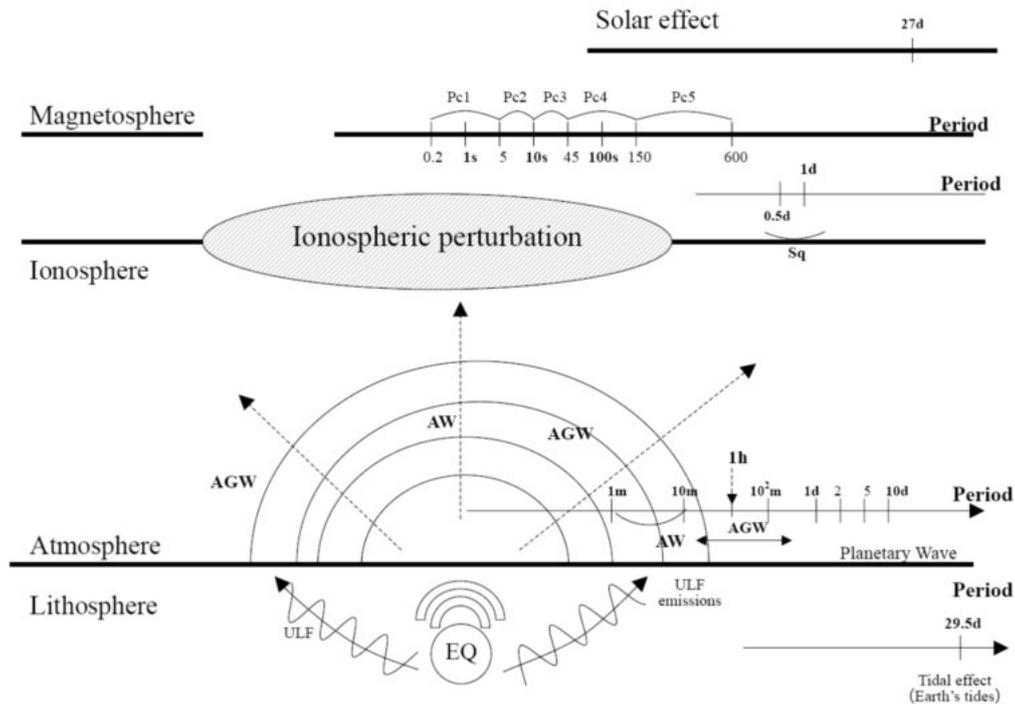
$$\text{TEC} = \int n_e(s) ds, \quad \Delta_{Iono} = \frac{40.3}{f^2} \text{TEC}, \quad (4.1)$$

(die Beziehung gilt für den MHz-Bereich und höhere Frequenzen) der TEC ist definiert als die gesamte Anzahl an Elektronen  $n_e$  integriert entlang eines geraden Signalpfades (Querschnitt  $1 \text{ m}^2$ ) zwischen Satellit und Empfänger in der Einheit TEC-Unit (TECU; Elektronenflächendichte;  $1 \text{ TECU} = 10^{16}$  Elektronen pro  $\text{m}^2$ ). Die Ionosphäre ist ident für Pseudo-Range and Trägerphase, allerdings ist das Vorzeichen unterschiedlich (siehe Seite 188). Für eine beliebige Sichtlinie wird der Gesamtelektronenanteil geneigter TEC (slant TEC, sTEC) bezeichnet, der vertikale TEC (vTEC) berechnet sich mittels einer Mapping-Funktion,  $s\text{TEC} = f(\chi) \cdot v\text{TEC}$  mit  $f(\chi) = 1/\cos(\chi')$  und  $\sin(\chi') = (R_e/(R_e + H)) \sin(\chi)$ , mit Zenitwinkel  $\chi$  beim Beobachter und  $\chi'$  der Zenitwinkel am ionosphärischen Durchdringungspunkt (ionospheric pierce point, IPP), die Kreuzung der Linie Satellit-Empfänger mit einer Sphäre der Höhe  $H$ . In der Nacht zeigt der TEC nur geringe Variationen, ganz im Gegensatz zur Tageszeit. Die Tagesvariation kann größer als der Wert für Präkursoren im Bereich 2 – 5 TECU sein, Szintillationen und Plasma-Bubbles können ebenfalls eine Rolle spielen, die TEC Auflösung ist somit limitiert (speziell bei geringer Elevation). Ein typisches Präkursor-Signal sollte einige Tage vor einem Erdbeben auftreten.

Plattentektonik ist in der Seismik eine Eigenschaft der Lithosphäre, dem oberen Teil der festen Erde. Die Lithosphäre ist in mehrere Teile gespalten – den Platten – eine Unterteilung erfolgt in kontinentale- (dick, geringere Dichte, Alter bis zu 3 Milliarden Jahre) und ozeanische (dünn, starr, Alter  $\lesssim 250$  Millionen Jahre) Platten. Diese Platten werden angetrieben durch Strömungen im Mantel mit Ausweitung an der Meeresboden-Aufweitung und Kontakt an den Kollisionszonen. Im Allgemeinen sind Erdbeben zusammen mit Vulkanismus häufig an den Kontaktzonen. Große Bruchlinien befinden sich an Rändern der Platten (Grenzzonen). Erdbeben sind ein plötzlicher Spannungsabbau an Bruchstellen wo viskoelastische Massen zusammentreffen. Selbst wenn Erdbeben als Punkt-Ereignisse charakterisiert werden, beschrieben durch Hypozentrum (Erdbebenherd), Epizentrum, Tiefe und Herdmechanismus, muß berücksichtigt werden, daß Kräfte i. d. R. über mehrere Kilometer freigesetzt werden. Aus diesem Grund ist die Momenten-Magnitude  $M_w$  der geeignete Wert um die Energie des Bebens zu beschreiben, die Magnitude nach Richter ist nur geeignet für Beben unter Stärke 6.5 und Entfernungen unter 1000 km. Um Magnituden mit dem TECU zu vergleichen ist  $M_w$  die geeignete Wahl, diese Parameter sollten letztlich korrelieren. Bei Präkursoren gilt es zu unterscheiden zwischen solchen die unmittelbar erfolgen, im Maximum einige Tage vorher, und jenen die längerzeitlichen Warn-Charakter besitzen, z. B. Spannungsaufbau, größerer Wärme fluß oder stärkere Gasabgabe. Es kann ein langanhaltender Einfluß in einer Erdbeben-Region (geomorphologische und tektonische Szenarien) gegeben sein, darunter – um einige Punkte der Gefährdungen zu nennen und die Kaskade zu beschreiben – zahlreiche Erdrutsche (Hangrutschungen, z. B. verbunden mit massiven Regenfällen) und ein aufstauen von Flüssen (ad hoc Dämme, verlegen des Flußbettes) mit beträchtlichem Flutrisiko.

**Satellitenbasierte Beobachtung von Einzelparametern** Transionosphärische VLF Beobachtungen mit dem DEMETER Satelliten fanden im Zeitraum 2004 – 2010 statt. Die Kombination von boden- und weltraum-basierten Beobachtungen ist unumgänglich um lokal und global seismische Aktivität umfassend beurteilen zu können. Messungen des elektrischen Feldes vom Instrument Champ Electrique (ICE) auf dem Mikro-Satelliten DEMETER wurden speziell über seismischen Regionen durchgeführt. Wissenschaftliche Zielsetzung ist die Detektion und Charakterisierung von ionosphärischen Störungen verbunden mit natürlichen Phänomenen, darunter Erdbeben, Vulkanausbrüchen und Tsunamis. Der Frequenzbereich erstreckt sich von DC bis 3.175 MHz, im Erfassungsmodus wird das dynamische Spektrum (d. h. Flußdichte vs. Beobachtungszeit und Frequenz) gespeichert ( $\Delta f = 19.53 \text{ Hz}$  Frequenzauflösung, Mittelung 2.048 s). Wie erwähnt gibt es zahlreiche Hypothesen über den Entstehungsmechanismus von seismo-elektromagnetischen Störungen, meist wird ein prä-mechanischer Vorgang in der Präparations-Zone des Erdbebens

angenommen. Der Spannungsabbau im Gestein erzeugt freie Elektronen und elektrische Ladung kann an der Erdoberfläche weitere Prozesse freisetzen, z. B. eine Änderung der atmosphärischen Leitfähigkeit und damit eine Modifikation der Kopplung Atmosphäre-Ionosphäre. Die regelmäßige Beobachtung der drei Schichten Lithosphäre, Atmosphäre und Ionosphäre ist grundlegend um ein umfassendes Verständnis der Mechanismen zu erhalten. Der China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES), geplanter Start 2018, soll vorwiegend Erdbeben-Phänomene untersuchen, Bahn und Nutzlast sind ähnlich DEMETER, in der Nutzlast kommen Magnetometer hinzu (darunter das CDSM), z. B. für ULF Untersuchungen. Abbildung 4.13 illustriert nochmals mögliche Kopplungsmechanismen mit charakteristischen Perioden.



**Abbildung 4.13:** Illustration von seismo-elektromagnetischen (SEM) Koppelmechanismen in unterschiedlichen Regionen – Lithosphäre, Atmosphäre, Ionosphäre, Magnetosphäre (Pulsationen) und solare periodische Effekte (keine transienten Flares, Kap. 4.1.3) – mit charakteristischen Perioden gemäß [Hayakawa, 2011]. Siehe ebenfalls das Schichtenmodell Abb. A.16.

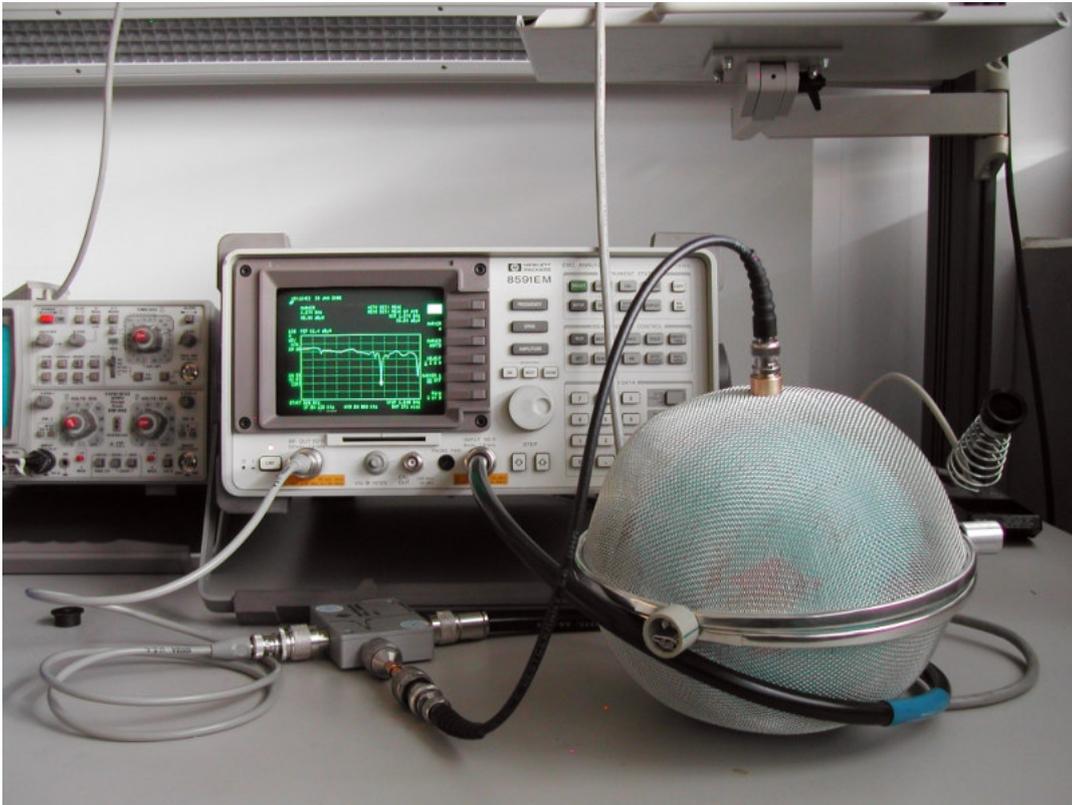
**Einflüsse nicht-seismischer Natur** Atmosphärische/Ionosphärische Störungen haben eine Vielzahl an Ursachen, z. B. geomagnetische Stürme, solare Aktivität oder Wettererscheinungen in der Troposphäre (lokale Blitze, Regen). Die Eigenschaften des sub-ionosphärischen Wellenleiters sind gegeben durch dessen Geometrie, elektrische Parameter des Pfades (Leitfähigkeit, Elektronendichte, Stoßfrequenz), Distanz zum Erdbeben und dessen Eigenschaften (Magnitude, Tiefe, Typ). Zu berücksichtigen sind ebenfalls Artefakte des Senders (ON/OFF oder Änderung der Sendeleistung) und Empfängers, darunter die Temperaturdrift des Vorverstärkers. Tabelle 4.3 zeigt eine Zusammenstellung dieser Faktoren.

Faktoren zur Berücksichtigung bei SEM		
Nr.:	Ursprung	Nicht-seismischer Einfluss
1	Atmosphäre	Wetter Troposphäre, Gezeiten, Planetare-, Schwere-, (Infra)Schall-Wellen
2	Blitze	Ionisierte Atmosphäre mit Whistler, Sprites, Elves, Blue-Jets
3	Sonne	Ionisierende Strahlung und Variationen: Flares, CME, SEP, 27 d, 11 y
4	Weltraum-Wetter	geomagnetische Stürme, Teilstürme, energetischer Teilcheneinfall
5	$\gamma$ -ray Bursts	Transiente Vorgänge aus der Milchstraße und Galaxien
6	GEC	Elektrischer Kreislauf mit Bezug zu Schönwetter $\sim 100 - 300$ V/m
7	Künstlich	Zivilisatorischer Ursprung, orts- und zeitabhängig (Ort des Empfängers)

**Tabelle 4.3:** Nicht-seismische Einflüsse ([Wolbang et al., 2013], [Wolbang, 2014]), kurz- oder langzeitlich, kontinuierlich oder intermittierend, siehe Abb. 4.13, entweder endogenisch (Lithosphäre und Atmosphäre) oder exogenisch (solar, galaktisch, aus Universum mit hoher Rotverschiebung  $z$ ).

## 4.2 Modell für Schumann-Resonanz

Das Modell – Abb. 4.14 zeigt den Meßaufbau – dient zur Demonstration von Schumann Resonanzen, für die historische Entwicklung siehe [Besser, 2007], wie sie auf der Erde kontinuierlich gemessen und für andere Objekte des Sonnensystems, z. B. Mars oder Titan, postuliert werden. Die ionosphärische Wellenausbreitung in der Atmosphäre des Saturnmondes Titan in Zuge der Mission Cassini-Huygens wird berechnet in [Schwingenschuh et al., 2001] und [Molina-Cuberos et al., 2004], Schumann Frequenzen wären ein Indikator für Entladungen, siehe die Arbeit [Besser et al., 2002]. Numerische Simulationen für Mars, siehe [Morente et al., 2003] und [Molina-Cuberos et al., 2003], zeigen ebenfalls die Möglichkeiten dieser lokalen Messungen für globales Vorhandensein von elektrischen Entladungen. Für die Erde liegen die Frequenzen  $\omega_l = c/R_E(l+1)^{1/2}$  im ELF Band, die ersten drei ergeben sich zu  $\{7.8, 14, 20\}$  Hz, die wesentlich geringeren mechanischen Abmessungen des Modells transferieren die Frequenzen in den GHz Bereich, siehe [Besser et al., 2006]. Der Aufbau besteht aus einem handelsüblichem Globus mit 15 cm Durchmesser. Um die hohe Leitfähigkeit der Erde für den niedrigen Frequenzbereich nachzubilden, wurde die Kugel auf der Innenseite durch Aufbringung von leitfähigen Klebebändern metallisiert. Die Ionosphäre wird mit zwei halbkugelförmigen, handelsüblichen Sieben mit je 20 cm Durchmesser nachgebildet. Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen wird der Spektralanalysator (HP8591EM) mit eingebautem Signalgenerator und ein Richtkoppler (SWR Brücke Rohde & Schwarz ZRB2) verwendet, [Eichelberger et al., 1996b], [Eichelberger et al., 1996c]. Der Signalgenerator speist über ein 50  $\Omega$  Koaxkabel den Eingang des Richtkopplers und liefert in weiterer Folge das Signal für das Erdmodell, bestehend aus innen-metallisiertem Globus als leitfähige Erde und zwei Sieben als Ionosphäre. Bei den Schumann Frequenzen wird die reflektierte Leistung ein Minimum (Streuparameter  $S_{11}$ ), der Spektralanalysator misst diese und zeigt eine Spitze zu niedrigeren Werten. Außerhalb der Eigenfrequenzen kann im Raum zwischen Globus und Sieb kein stehendes Feldbild aufgebaut werden, die volle eingespeiste Leistung wird reflektiert und gelangt über den Ausgang des Richtkopplers zum Signalanalysator, der während des Frequenzsweeps im Trackingmode läuft. Die Display Fotos vom Analysator in Abb. 4.15 zeigen die markante Spitze und die Variation der Resonanzkurve durch mechanische Verformung. Weitere theoretische Untersuchungen und numerische Simulationen (Transmission Line Method, TLM) sind dargelegt in [Molina-Cuberos et al., 2002], [Morente et al., 2002], [Morente et al., 2004], [Besser et al., 2002], [Besser et al., 2013b].



**Abbildung 4.14:** Messung der Schumann Frequenzen am Modell, bestehend aus metallisiertem Globus, entsprechend der Erdoberfläche, zwei Sieben zur Nachbildung der Ionosphäre, Signalanalysator mit Frequenzgenerator im Trackingmode und Richtkoppler.



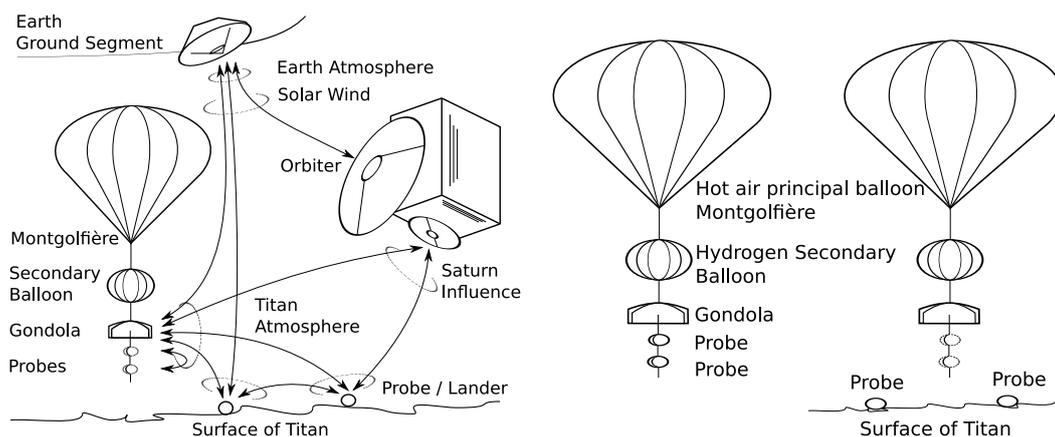
**Abbildung 4.15:** Schumann Frequenzen und Variation der Eigenfrequenz bei 1.37 GHz, hervorgerufen durch geringfügige mechanische Verformung an den Sieben, der leitfähigen äußeren Berandung – d. h. durch Veränderung der "Ionosphäre" des Modells.

## Kapitel 5

# Projektstudien – TandEM/TSSM und Demon

### 5.1 TandEM / TSSM – Multi-Mikrophon Instrument ACU

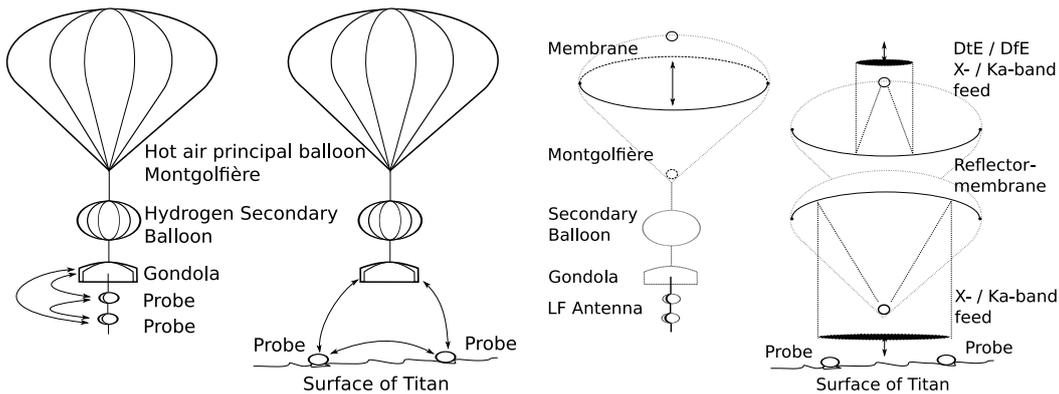
Bei Titan and Enceladus Mission (TandEM) Titan / Saturn System Mission (TSSM) handelt es sich um ein vorgeschlagenes ESA / NASA Projekt im Zuge der ESA Cosmic Vision, zugleich eine Nachfolge von Cassini-Huygens (Cassini endete am 15 Sep. 2017, Abbruch des Trägersignals um 13:55:46 CEST, durch verglühen in der Saturnatmosphäre, d.h. Cassini fungiert als Eintrittsprobe in die oberen Saturnschichten, das ergibt 13 Jahre – 2004 bis 2017 – oder 2 Saturn-Saisonen von Winter- bis Sommersonnenwende; unmittelbar davor waren noch 22 Orbits zwischen Saturn und den Ringen zur genauen Bestimmung der Ringmasse). Das TandEM Space-Segment besteht aus Orbiter, Ballon und Proben / Lander, dargestellt in Abb. 5.1, für akustische Untersuchungen und Instrumente, z. B. im Zusammenhang mit äolischen Strukturen (Dünen) und troposphärischen Entladungen, siehe [Schwingenschuh et al., 2008b], [Eichelberger et al., 2008], [Besser et al., 2008], [Schwingenschuh et al., 2008a], und zwei weitere Artikel [Schwingenschuh et al., 2010] und [Eichelberger et al., 2010]. Ein Space-Segment mit mehreren Elementen



**Abbildung 5.1:** TandEM / TSSM Weltraumsegmente mit akustischen, optischen und RF Links in Konfigurationen während der wissenschaftlichen Phase in der dichten, kryogenischen und optisch dicken  $N_2 - CH_4$  Atmosphäre von Titan.

erlaubt verschiedene Kommunikationsmöglichkeiten, siehe [Eichelberger et al., 2008]. Als Verstärker für die RF-Strecke verwendet man solid-state power amplifier (SSPA) oder Wanderfeldröhren (traveling wave tube, TWT) verbunden mit entsprechenden Antennen. Nebenbei bemerkt – die Erfindung resp. Paten-

tierung der Wanderfeldröhre mit einem Elektronenstrahl im Zentrum der helikalen Elektrode geht zurück auf Rudolf Kompfner (1909 – 1977), der – bemerkenswerter Weise – ein gelernter Architekt war. Erste Meßtechnik im Hochfrequenz-Bereich führt zu Arbeiten von Ernst Lecher (1856 – 1926), bekannt unter der Bezeichnung Lecher-Leitung, und Robert von Lieben (1878 – 1913) war maßgebend bei der Entwicklung von Verstärker-Röhren (Lieben-Röhre) mit weitreichenden Anwendungen in der Telefonie. Die Charakterisierung der Atmosphäre im optischen Bereich erfolgt durch (i) die Signaldämpfung, (ii) Kodierungsarten und (iii) Modulationen, letztere sind enorm wichtig für den optischen Kanal und haben höhere Priorität verglichen mit Radiofrequenzen (RF). Verschlechterungen in der optischen Freiraumausbreitung (Free space optical – FSO – communication) sind gegeben durch (i) Nebel, bei weitem die dominierende Ursache, weiters (ii) Szintillation, verursacht Fading und ein "wandern" des Strahls, (iii) Abschattungen und (iv) Ausrichtung des Strahls. Das Potential in der Kombination von RF und FSO ist allerdings durch deren Komplementarität in unterschiedlichen Anwendungen enorm, siehe [Leitgeb and Plank, 2015]. Laser-Kommunikation vom Mond erreicht in einem Demonstrationsprogramm eine Rate vom 40 Mbit/s, mit dem Laser Communication Terminal (LCT) des European Data Relay Satellite System (EDRS) sind GBit/s-Raten möglich. Erwähnt in diesem Zusammenhang seien ebenfalls Herwig Kogelnik (1932–), seine Arbeiten sind im Bereich Laser und optische Kommunikation, Gottfried Ungerböck (1940–), der Erfinder der Trellis-Kodierung und Ernst Weber (1901 – 1996) mit Arbeiten im Bereich Richtfunk, er war der erste Präsident des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Abb. 5.2 zeigt mögliche Synergien in der Kommunikation zwischen den einzelnen Elementen während der Ballonphase am Titan verbunden mit einem Direct-to-Earth (DtE) Szenario, Abb. 5.3 ein erweitertes Konzept. Bestimmend sind die 3R's, ein Dreieck bestehend

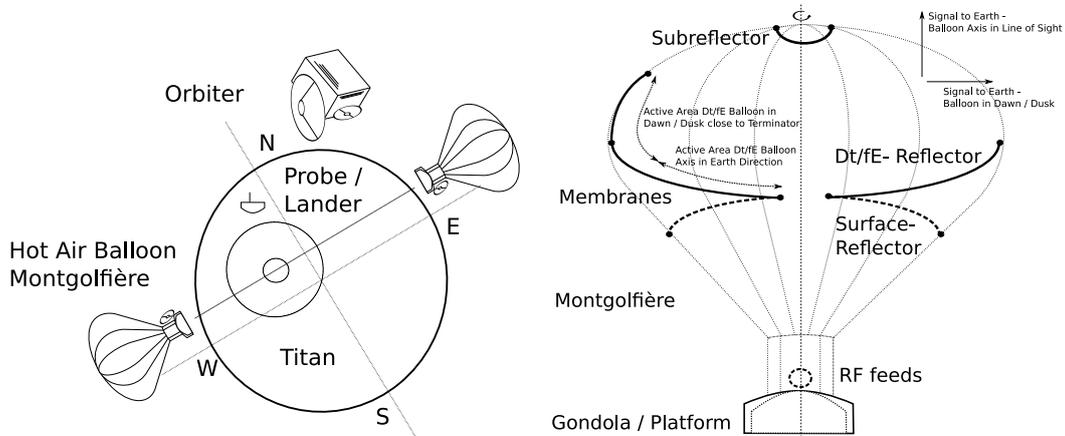


**Abbildung 5.2:** Tandem/TSSM Ballonphase in der Titanatmosphäre und Direct-to /from-Earth Link zwischen Ballon und Bodenstationen mit Kommunikations- und wissenschaftlichen Aufgaben. Eine ähnliche Symbiose gibt es bei Tiefseekabeln in Ozeanen mit höchsten Übertragungsraten in Verbindung mit der Messungen chemischer und physikalischer Parameter von Meeresströmungen.

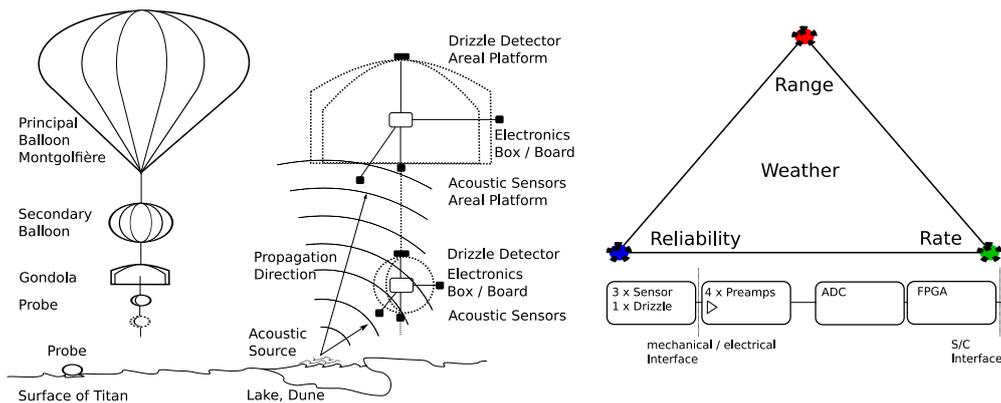
aus Range - Reliability - Rate, im Zentrum steht das Wettergeschehen, besonders Nebel mit  $\gtrsim 450$  dB/km spezifischer Dämpfung, [Muhammad et al., 2007], siehe ebenfalls Abb. 5.4. FSO Messungen bei 830 nm und 1550 nm über einen Zeitraum von 5 Monaten zeigen die Notwendigkeit einer Datenbank mit lokalen Umgebungsbedingungen, speziell Dämpfung verbunden mit Nebel, siehe [Khan et al., 2012]. Der Arbeitspunkt erfolgt durch Optimierung des Dreiecks, z. B. eine hohe Übertragungsrate hat geringere Entfernung und kleinere Zuverlässigkeit zur Folge. Die Lokalisierung akustischer Quellen erfolgt mit Hilfe der "time-delay-estimation" (TDE) mit 2 Sensorarrays. In weiterer Folge ergibt sich mit "direction-of-arrival" (DOA) Richtung und Entfernung des Quellgebietes. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich mit

$$c^2 = \kappa p / \rho, \quad (5.1)$$

dabei ist  $\kappa = C_p / C_V > 1$  der adiabatische Exponent,  $\kappa \sim 1.4$ ,  $C_p$  ( $C_V$ ) die spezifischen Wärmen bei konstantem Druck (Volumen). Für die Titanoberfläche mit Druck  $p = 1.5 \times 10^5$  Pa, Dichte  $\rho = 1.88$  kg/m<sup>3</sup> und Temperatur  $T = 94$  K (somit ähnlich der minimalen Temperatur auf der Nachtseite des Mondes  $\mathcal{C}$ ) resultiert daraus  $c_{\text{Titan}} \sim 195$  m/s. Die Transmission  $\tau$  ist gegeben durch das Beer-Lambert'sche Gesetz



**Abbildung 5.3:** TandEM / TSSM Konfiguration und erweiterte Ballonstudie mit Direct-to / from-Earth Link realisiert durch integrierte Reflektor-Membranen [Eichelberger et al., 2010]. Unter den Antennentopologien liefert der Reflektor (i) höchste Bandbreite, (ii) höchste Verstärkung und (iii) hervorragende Winkelauflösung verbunden mit (iv) geringen Kosten. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Kombination aus Hauptreflektor, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Reflectarray (geringes Gewicht, flache Struktur, Kompensation von Störungen, Phasenkontrolle) und einem einzelnen Antennenhorn. Mit sphärischen Reflektoren kann – im Gegensatz zur parabolischen Form – der Strahl leicht geschwenkt werden. Generell gilt es die Antenne in die Struktur zu integrieren.



**Abbildung 5.4:** TandEM Montgolfière akustische Konfiguration mit Blockschaltbild und 3R's Kommunikation Freiraumübertragung mit den drei Eckpunkten Range, Reliability, Rate mit dem Wetter (Nebel) als bestimmenden Einflussfaktor. Im kommerziellen Umfeld haben Carrier-class Kunden eine Verfügbarkeit von "5 nines", d. h. 99.999 %, Firmenkunden sind "2 nines" mit 99 %.

$$\tau = P_{rec}/P_{em} = \exp^{-\gamma L}, \quad (5.2)$$

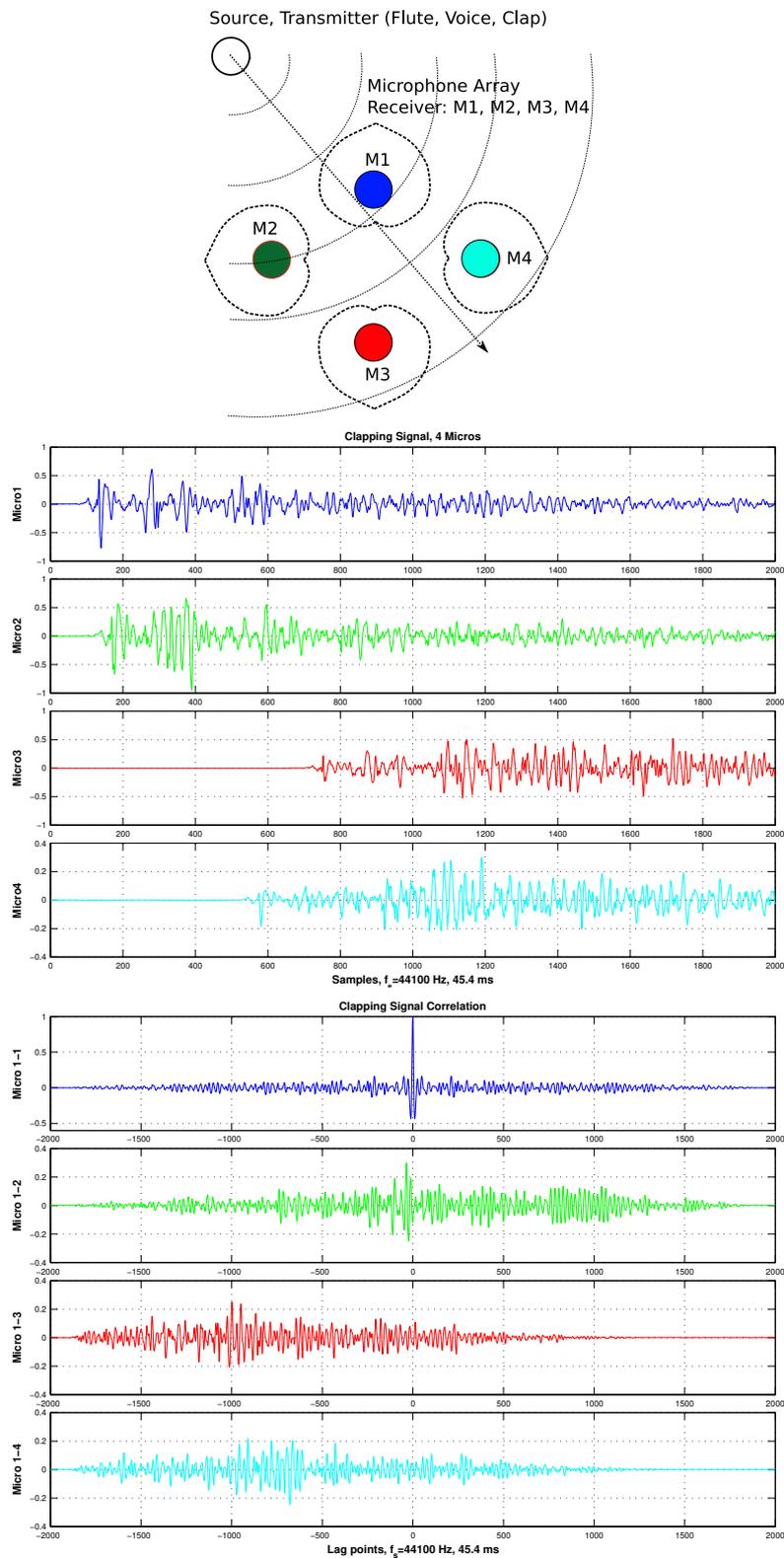
mit  $P_{rec}$ ,  $P_{em}$  als Empfänger- und Sendeleistung,  $\gamma$  dem Dämpfungskoeffizienten und  $L$  der Entfernung zwischen Sender und Empfänger. Die Titanatmosphäre hat bei IR-Wellenlängen einige durchlässige Frequenzbereiche und die Oberfläche des Mondes ist in diesen mit Teleskopen zugänglich.

Im RF Bereich ergibt sich die Datenrate  $R$  in dBHz über das Linkbudget

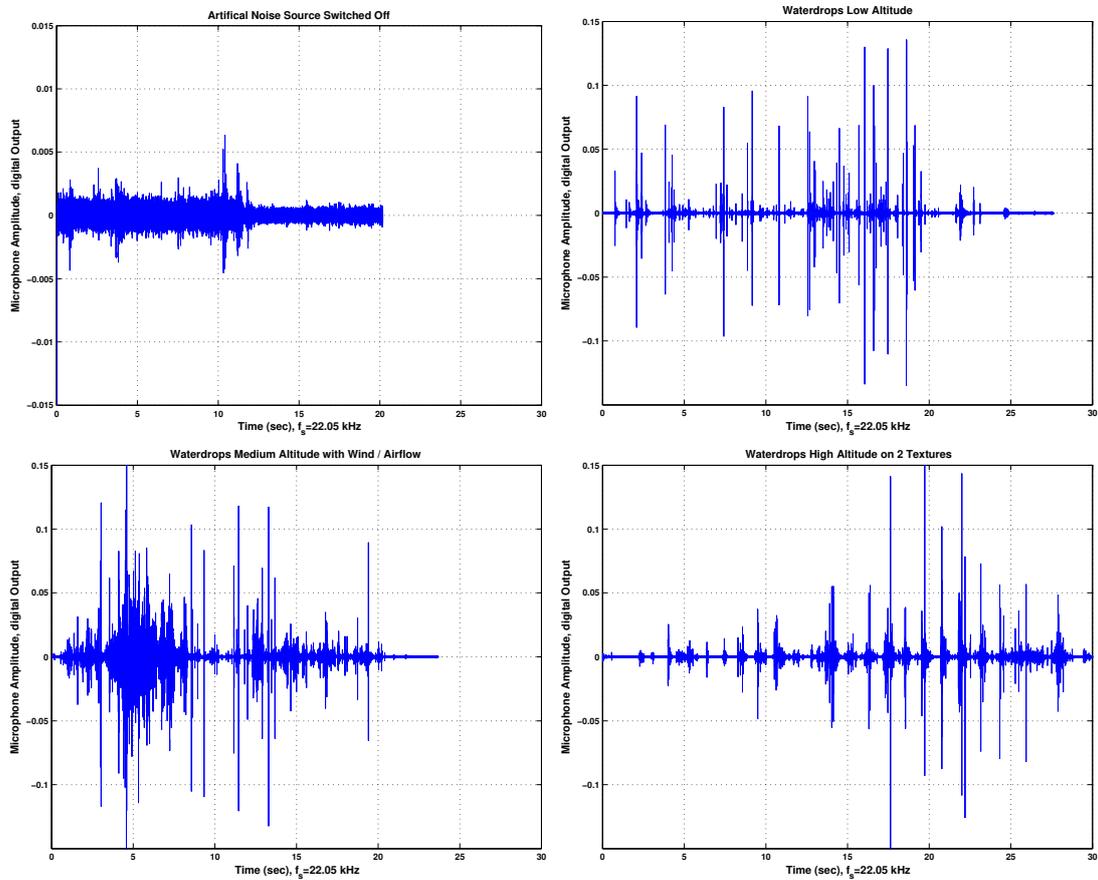
$$\begin{aligned} C/N_o &= EIRP + L_{fs} + G/T - k, \\ C/N_o &= R + L_{mod} + E/N_o + M, \end{aligned} \quad (5.3)$$

mit der effektiven isotropen Strahlungsleistung (emitted isotropic radiated power)  $EIRP$  – inkludiert Verstärkungen (Ausgang und Antenne) und Verluste – in dBW, Freiraumverluste  $L_{fs}$  gegeben durch  $L_{fs} = 20 \log(\lambda/4\pi d)$  in dB mit Wellenlänge  $\lambda$  und Entfernung  $d$ , die "figure of merit"  $G/T$  in dB/K inkludiert den Antennengewinn und die Rauschtemperatur des Empfangssystems und  $k = -228.6$  in dBW/Hz/K ist die Boltzmann Konstante. Zusätzliche Verluste ergeben sich wenn das Signal durch die Atmosphäre propagiert. Die Modulations / Demodulations-Verluste sind  $L_{mod}$  in dB,  $E/N_o$  ist die notwendige Energie pro Bit zu Rauschleistungsdichte in dBHz (steht in Bezug zur Bitfehlerrate BER) und  $M$  der Margin in dB um die Unsicherheiten im Linkbudget zu berücksichtigen. Der Antennengewinn ohne Verluste ist gegeben durch  $G = 17.9 + 20 \log d_A + 20 \log f$  in dB, mit  $d_A$  der Apertur in m und  $f$  der Frequenz in GHz. Die "half power beam width" in deg ist  $\Theta_3 = 21/(d_A f)$ .

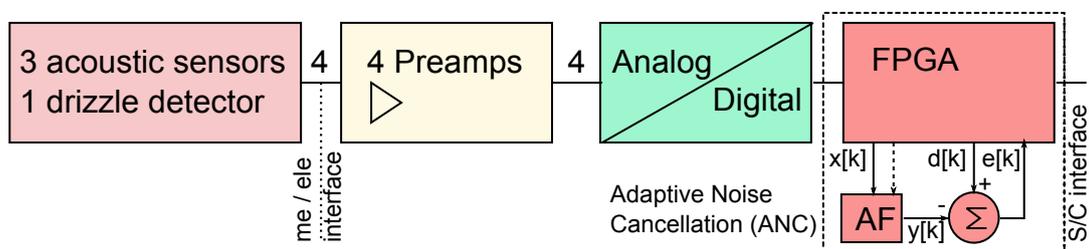
Auf der Erde ergibt sich durch das große Dipolmoment von  $H_2O$  in der Neutralatmosphäre eine starke Absorption, die nichtpolaren Moleküle  $N_2$  und  $CH_4$  von Titan haben nur geringe durch Kollisionen induzierte Absorption. Typische Werte zwischen Oberfläche und Orbiter bei einem Zenitwinkel  $< 45^\circ$  ergeben sich für das S-band  $\lesssim 0.01$  dB, X-band  $\lesssim 0.15$  dB und Ka-band  $\lesssim 2$  dB. Die Veränderung von Kanaleigenschaften sind gegeben durch (i) Signaldämpfung (molekulare Resonanzen, Ionosphäre), (ii) Erhöhung der Rauschtemperatur durch Absorption, (iii) Fading, (iv) Übersprechen (Depolarisation durch fallende nicht-sphärische Regentropfen), (v) Brechung (Variation in der Ankunftsrichtung des Signals) und (vi) Inter-system Interferenzen. Fadingfaktoren ergeben sich durch (i) verstärkte Dämpfung durch Regen, Nieseln oder Wolken und (ii) Szintillation, sie steht im Zusammenhang mit atmosphärischer Turbulenz. Adaptive Kanalkodierungen und Modulation können das Fading des Kanals ausgleichen oder zumindest minimieren. Abb. 5.5 aus [Eichelberger et al., 2009] zeigt eine Konfiguration für Sonden und Landeeinheiten zur Bestimmung akustischer Kenngrößen bei extra-terrestrischen Planeten und Monden mit Atmosphären, z. B. Titan (für nichtlineare Phänomene im Zusammenhang mit elektrischen Ladungen siehe die Ausführungen in [Schwingenschuh et al., 2008c]), Mars ♂, Venus ♀ mit klimatischen Implikationen [Prattes et al., 2009]. Resultate von terrestrischen akustischen Außenmessungen [Eichelberger et al., 2011] sind dargestellt in Abb. 5.6. Abb. 5.7 zeigt ein Multi-Mikrophon Instrument (Acoustic Sensor Package, ACU) für planetare Atmosphären und Oberflächen [Eichelberger et al., 2011]. Die wissenschaftlichen Ziele dieses in-situ Experimentes, sei es auf Ballonen oder Landeeinheiten, sind (i) die Lokalisierung von akustischen Quellen, z. B. Seen, Dünen oder Kryovulkane durch Messung des zeitlichen Versatzes über Korrelation (direction of arrival, DOA) und (ii) Charakterisierung der Schallquellen im Zeit- und Frequenzbereich, darunter Geschwindigkeit und Richtung von Winden, atmosphärische Turbulenzparameter und Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Diese Nutzlast ist komplementär zu Messungen des elektrischen Feldes, z. B. Variationen gegeben durch Blitzenentladungen. Technisch besteht ACU aus 4 Mikrophonen (3 akustische Sensoren und einen Nieselregen-Detektor, ein Sensor mit Prallplatte), 4 Vorverstärkern, einen Mehrkanal-ADC und einem Field Programmable Gate Array (FPGA) mit Eventlogik, Ringbuffer, Korrelationseinheit für DOA und der Schnittstelle zur S/C. Ein wichtiger Teil in der Digitaleinheit ist die adaptive Filterung (Adaptive Noise Cancellation, ANC) von Eigengeräuschen am Ballon. Empfangen zumindest zwei (räumlich weit entfernte) Bodenstationen gleichzeitig S/C Signale einer Deep-Space Mission kann über den zeitlichen Versatz, das "differential one-way ranging" (DOR), die Entfernung und Position bestimmt werden. Verfeinerungen durch Beseitigung von Fehlerquellen (Sonnenwind, Ionosphäre, Troposphäre) mittels bekannter Quasar-Positionen führen zur interferometrischen Technik des Delta-DOR und damit zu einer verbesserten Navigationslösung. Abbildung 5.8 zeigt die Möglichkeit von Fernerkundungen der Wechselwirkung von Teilchen und Strahlung mit kryogenen Oberflächen von Objekten im äußeren Sonnensystem und Abb. A.21 zwei terrestrische Anlagen für Kommunikation und Luftraumüberwachung im zivilen und militärischen Bereich.



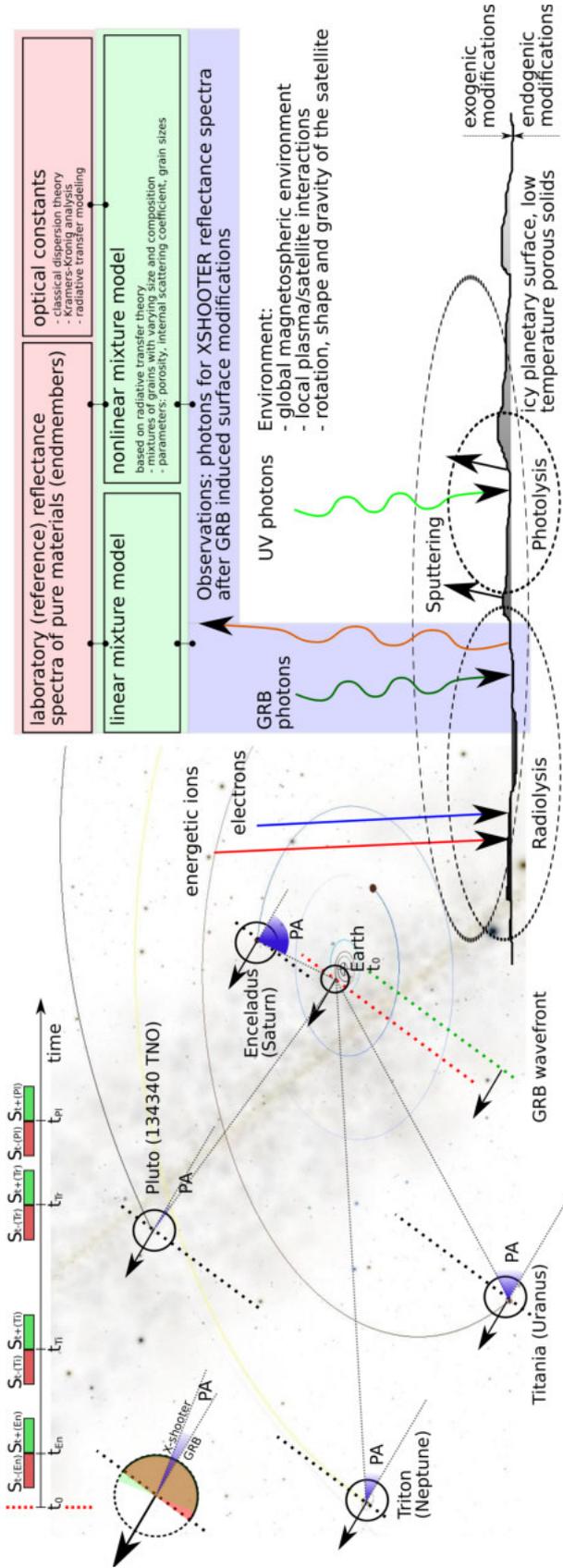
**Abbildung 5.5:** TandEM akustisches Instrument mit vier Mikrofonen versetzt um  $90^\circ$  und herzförmiger Richtcharakteristik zur Bestimmung der Richtung der akustischen Welle. Die Signale und Korrelationen (auto:  $M_{11}$ , kreuz:  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{14}$ ) zwischen den einzelnen Mikrofonen sind in der mittleren und unteren Grafik dargestellt.



**Abbildung 5.6:** Terrestrische akustische Außenmessungen: Von links oben nach rechts unten erkennt man (i) zwei unterschiedliche Rauschquellen, der künstliche Störer wird nach 11 s abgeschaltet, (ii) Zeitreihe von fallenden Wassertropfen aus geringer Höhe, (iii) Wassertropfen aus mittlerer Höhe mit überlagerten Windgeräuschen, (iv) Wassertropfen aus größerer Höhe auf zwei unterschiedliche Texturen.



**Abbildung 5.7:** Blockschaltbild des Multi-Mikrophon Instrumentes (Acoustic Sensor Package, ACU) auf TandEM für akustische Messungen in der Atmosphäre von Titan [Eichelberger et al., 2011].



**Abbildung 5.8:** Fernerkundung der Wechselwirkungen von Ionen, Elektronen und Photonen (speziell von  $\gamma$ -ray Bursts) mit kalten, dünnen Atmosphären und eisigen Oberflächen von Objekten im äußeren Sonnensystem. Die hochenergetische, impulsive Natur der  $\gamma$ -ray Burst Emission verursacht radiolytische und photolytische Prozesse im Niedertemperatur-Festkörper der Oberfläche. Diese Prozesse können mit entsprechenden Teleskopen spektroskopisch (UV-optisch-IR) beobachtet werden. Im Residuum der Spektren, aufgenommen unmittelbar vor und nach einem impulsiven Ereignis, erkennt man die  $\gamma$ -ray Burst induzierten Variationen (Differenz-Spektroskopie). Diese messtechnischen Ergebnisse werden in weiterer Folge durch theoretische Modelle validiert. Im Modellszenario trifft der  $\gamma$ -ray Burst auf die Erde, wird dort erstmalig detektiert, breitet sich durch das Sonnensystem aus und gibt danach die Photonen-Energie bei Kollision (Querschnitt) Teleskop aus Sicht des Objektes, Titan, Triton und Pluto ab. Maßgeblich zur Umsetzung ist der Phasenwinkel, d. h. der Bereich zwischen  $\gamma$ -ray Burst Front und dem Monaten und mindestens 2 Objekten (Einzel-Burst und mehrere Oberflächen).

## 5.2 Demon – Missionsstudie für kosmologische Untersuchungen

Nachfolgende Überlegungen basieren auf Arbeiten zu einer Satellitenmission – speziell der gemeinsame Artikel [Berciano Alba et al., 2006] des Teams – zum Verständnis von Dunkler Energie (DE) und Dunkler Materie (DM). Es sind somit kosmologische Fragestellungen betroffen, siehe dazu [Demon Team, 2005], [Eichelberger, 2007b] und [Lerchster and Eichelberger, 2007] mit Bezug zur ESA Cosmic Vision Kap. 4, [ESA, 2005]: "How did the Universe originate and what is it made of?".

Der generelle Hintergrund dazu ist gegeben im Anhang Kap. A.1. Das weltraumbasierte Teleskop verbindet zwei komplementäre Methoden um sich dieser Fragestellung zu widmen, (i) schwacher Gravitationslinsen-Effekt, siehe Kap. A.1.2 und (ii) statistische Untersuchungen mit Galaxienhaufen, erläutert in Kap. A.1.3.

## Kapitel 6

# Schlußbetrachtungen, Zukunftsperspektiven, Ausblick

Diese Arbeit hat eine ähnliche Gliederung wie Hannes Alfvéns Buch "Cosmic Plasma" [Alfvén, 1981], d. h. sie umspannt sowohl Weltraum-Plasmaphysik, speziell Experimente auf wissenschaftlichen Satelliten, als auch ein Kapitel über Kosmologie, hervorgegangen aus einem Projekt über Dunkle Materie und Dunkle Energie – Alfvéns Publikationen dienten oft als Inspiration und Antrieb. Grundlage waren ebenfalls die frühen Studien und Arbeiten meines ursprünglichen Betreuers Prof. Willibald Riedler im Zusammenhang mit Polarlichtern [Riedler, 1966], nur eine Veröffentlichung unter seinen mehr als 330 Publikationen, siehe [Besser et al., 2012]. Er hat durch sein späteres Wirken in Graz die Teilnahme an Projekten der Weltraumforschung ermöglicht und maßgeblich beeinflußt [Besser et al., 2007]. Durch die breite Palette von Beteiligungen an diversen Missionen über die Jahre hinweg, war es dem Autor möglich, vielfältige Forschungen in einem hochinteressanten, technisch-wissenschaftlichen Bereich durchzuführen. Darunter sind, um nur einige unter der Fülle von Projekten (siehe ebenfalls Abb. 1.1) mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Eckpfeilern zu nennen:

- Demon – Missionsstudie im Bereich Dunkle Energie - Dunkle Materie (Röntgenbereich und Instrument für schwachen Gravitationslinseneffekt),
- Mars 96, MMS und BepiColombo – EMV Messungen an MAREMF, ASPOC und PICAM (zusätzlich Software-Simulationen),
- Cluster – FGM ADC Board Messungen, Kalibration und wissenschaftliche Software,
- DeepSpace 1 – ADC Board Design und Tests,
- Rosetta – Kalibration und Software für RPC-Mag, magnetische Reinheit bei MIDAS und Breadboard Design bei MUPUS auf Rosetta-Lander (Philae),
- DoubleStar – Kalibration und Software für TC1 / TC2 FGM,
- Chimag – Software für die Magnetometerkette,
- Netlander – wissenschaftliche Untersuchungen (Exobiologie; Wasser am Mars),
- Venus Express – Software, Kalibrierung und Datenarchivierung für das Magnetometer,
- Cassini-Huygens und Seismo-elektromagnetische Studien – Schumann Resonanzen, Wellenausbreitung in der Ionosphäre der Erde und im VLF-Wellenleiter, Web-Software,
- TandEM/TSSM – Akustisches Experiment ACU, Systemstudien und Direkt-to-Earth Link Budget.

Zukünftige europäische Weltraummissionen mit Fokus auf die Schwerpunkte (i) Sonnensystem/Plasma-, (ii) Fundamental- und (iii) Astrophysik werden in ESA's "Cosmic Vision" angedacht, manche von ihnen danach in der einen oder anderen Form letztlich realisiert. In jedem Bereich sind Nutzlasten höchster Leistung notwendig um die hochgesteckten Ziele zu erreichen – keine Phantasmagorien – alles im Rahmen des finanzierbaren ohne Ressourcen zu verpulvern. Bei den gesteckten Anforderungen und Erwartungen darf man keinesfalls in vorhandene Zwickmühlen geraten, in der Weltraum-Plasmaphysik werden Multi-S/C-Missionen, aufbauend auf der Erfahrung beginnend mit Cluster – nach mehr als 17 Jahren operativem Einsatz – eine zentrale Rolle einnehmen.

Als Resümee für Cluster, DoubleStar und Rosetta (Orbiter mit Philae) – die FGMs dieser Missionen werden in dieser Arbeit erörtert – läßt sich ziehen, daß (i) der getätigte Schritt zur Multi-S/C-Mission mit koordinierten Mehrpunktmessungen goldrichtig war, (ii) die wissenschaftlichen Zielsetzungen nach wie vor gelten, d. h. neue Erkenntnisse in der Weltraum-Plasmaphysik vorwiegend nur durch den erswerlichen Weg von Netzwerken an Satelliten erzielt werden können und (iii) die Instrumente diese Erwartungen über den langen Zeitraum bereits erfüllen oder erfüllt haben. Bodenbasierte Längstwellen-Messungen zeigen wie wichtig und notwendig ergänzende, komplementäre Datensätze sind – und damit einhergehend hochgenaue Kalibration – diese Synergien erlauben es konsistente Ergebnisse bei Studien der Lithosphäre und Atmosphäre der Erde (D/E-Schicht der Ionosphäre, seismo-elektromagnetische Untersuchungen) zu erzielen. Dieses Konzept sollte konsequenterweise auf Magnetosphären und Atmosphären anderer Planeten erweitert werden.

Der Verfasser hält eine aktive Teilnahme an der Entwicklung von Experimenten und am Bau von Instrumenten in aktuellen und zukünftigen wissenschaftlichen Kampagnen für unverzichtbar – erwähnt sei PICAM/BepiColombo oder ACU – wenn ein Maximum an technischer Innovation und wissenschaftlicher Ausbeute von einem Projekt erzielt werden soll. Besonders wenn es sich beim Aufbruch in "Die Welt von Morgen" um Experimente der Grundlagenphysik handelt und ein Bündel an Technologien notwendig wird, eine kritische Beurteilung – siehe die Ausführungen in [Lichtenegger, 1993] – ist aber sicherlich notwendig, damit es möglicherweise (und im Idealfall) zum Glanz der Morgenröte einer aufgehenden technisch-wissenschaftlichen Disziplin kommen kann und ein Himmelfahrtskommando vermieden wird.

Bei den Experimenten handelt es sich generell um ingenieurtechnische Spitzenleistungen, meist ohne unmittelbares Vorbild (neue Missionsziele), man weiß Methoden und Techniken zu perfektionieren und kann prometheische Leistungen mit mathematischer Präzision erzielen. Technisches Know-how, Tüftelei, Können, Anmut, Einfachheit, Finesse, Enthusiasmus und schöpferische Qualitäten sind hier im Spiel und prägen die Entwicklung um auch weiterhin der Technik, Wissenschaft und dieser Art von Kunst freien Lauf zu lassen.

Ähnliches kennt man aus der Vergangenheit, man denke nur an zahlreiche astronomische Kunstuhren, z. B. am Prager Rathaus oder die Imsseruhr, den Planetensaal von Schloß Eggenberg (17. Jhd.), oder an Leonardo da Vinci (1452 – 1519), ein begnadeter, begeisterter Wissenschaftler, Techniker (Erfinder), Ingenieur (von "ingenium" – "sinnreiche Erfindung", "Scharfsinn", ursprünglich nur im mil. Zusammenhang in Verwendung) und Künstler, weiters an Darstellungen von Jan Vermeer van Delft (1632 – 1675) (Globen oder Karten im Hintergrund der Bilder, z. B. bei "Die Malkunst" oder "Lautenspielerin am Fenster" mit einer Europakarte) oder eines Vincent Willem van Gogh (1853 – 1890), siehe die "Sternennacht" Abb. 6.1, dem "Paradebeispiel eines Autodidakten" mit seiner "markanten, expressiven Formensprache und leuchtenden Farben". Von da Vinci sind nur wenige Gemälde erhalten, neben anatomischen und militärischen Studien skizzierte der Meister der Renaissance unter zahlreichen anderen Entwürfen auch einen Fallschirm (um 1485), ein Fluggerät (um 1508), eine Brücke über das Goldene Horn von Stambul nach Galata (um 1502/03) und machte u. a. Studien zu Wasserwirbeln (um 1513), siehe abermals Abb. 6.1, heute würde man Hydrodynamik sagen (käme das magnetische Feld dazu landet man bei der MHD).

Durch gemeinsame Grundlagen stehen viele Forschungsgebiete in engem Bezug zueinander, jeder Teil ist aber dermaßen komplex, daß eine Spezialisierung notwendig erscheint. Retrospektiv betrachtet braucht es die Courage eines Generalisten um auf mehreren Gebieten gleichzeitig zu arbeiten – sei es durch Innovation oder auch kontroversielle Standpunkte – um fachkundig und interdisziplinär zwischen den Feldern eine Brücke herzustellen und Gegensätzlichkeiten/Dichotomien erkennen und überwinden zu können.



**Abbildung 6.1:** Oberes Bild: Sternennacht, Juni 1889, Vincent van Gogh, The Museum of Modern Art, New York. Unteres Bild: Alter, sinnierender Mann, Darstellung und Notizen zu Wasserwirbeln, ~ 1513, Leonardo da Vinci, Royal Collection Trust, RL 12579.

# Anhang A

## Theoretische Betrachtungen

### A.1 Dunkles Universum, Lichtablenkung, Magnetfeld und Techniken

#### A.1.1 Dunkle Energie, Dunkle Materie

Nach unseren gegenwärtigen empirischen und theoretischen Kenntnissen – also keineswegs ad libitum – ist die Entstehung der heutigen Welt, unseres Universums, in einem Urknall, dem "Big-Bang", am plausibelsten. Kosmologie – die Lehre von der Welt – ist allerdings durch Religion und Philosophie in praktisch allen Kulturen vorhanden und zumeist tief verwurzelt. Aktuelle Messungen, z. B. von Supernovae des Typs Ia (SNIa), legen eine beschleunigte Expansion des Universums nahe, hervorgerufen durch eine Substanz bezeichnet als Dunkle Energie – bei genauerem Hinsehen eine epochale Umwälzung seit der Entdeckung 1998. Sie erscheint als dominierende Komponente im physikalische Universum, trotzdem gibt es zur Natur der Dunklen Energie keine überzeugende Erklärung. Im Gegensatz zu jeder bekannten Form von Materie und Energie wirkt Dunkle Energie der Gravitation entgegen, eine Art negativer Druck. Boden- und weltraumbasierte empirische Untersuchungen legen innerhalb das Standardmodells der Kosmologie den Anteil der Dunklen Energie auf 73 % (Strahlung 0.02 %, sichtbare Materie 0.10 %, Neutrinos 0.10 %, dunkle Neutronen und Protonen 3.78 %, d. h. Atome in Summe 4 %, kalte Dunkle Materie 23 %), prima facie, es ist aber bis dato keine Aussage möglich ob es sich dabei um (i) Einsteins Kosmologische Konstante, (ii) ein dynamisches Fluid oder um eine (iii) Modifikation der Allgemeinen Relativitätstheorie handelt. Für einen aktuellen Zugang zur Literatur siehe [Linder, 2008]. Ein einfaches kosmologisches Modell – zugleich eine immense Herausforderung – mit nur (i) 6 primären Parametern (Baryonendichte  $\Omega_b$ , Dichte der kalten dunklen Materie  $\Omega_c$ , Maß für den Schallhorizont bei der letzten Streuung  $\Theta_{MC}$ , Steigung im Spektrum der skalaren Störung  $n_s$  bei  $0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ , optische Dicke bei Reionisation  $\tau$  und  $\Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0)$  Amplitude der Störungen in der Krümmung  $\mathcal{R}$ ) und (ii) abgeleiteten Parametern (Amplitude der Materie-Fluktuationen  $\sigma_8$  bei  $8h^{-1} \text{ Mpc}$ , Hubblekonstante  $H_0$ , Gesamtmaterie-Dichte  $\Omega_m$ , Dichte der Dunklen Energie  $\Omega_\Lambda$ , Rotverschiebung der Reionisation  $z_{\text{reion}}$ , Alter des Universums  $t_0$ ) bestimmt nicht nur die Planck S/C (sehr ähnlich den Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP) Temperatur- und Polarisations-Daten, sondern auch kleinskalige kosmische Mikrowellen Hintergrundstrahlung (CMB) Daten, Menge der leichten Elemente, Beobachtungen großräumiger Strukturen und Supernovae Helligkeits / Entfernungs Relationen, [Planck Collaboration et al., 2016]. Der Fit (runde Klammer 68 % statistische Unsicherheit in den Nachkommastellen) wenn man Planck Daten ("TT+lowP+lensing") zur Bestimmung der kosmologischen Parameter mit Potenzansätzen für ein Universum mit kosmologischer Konstante und kalter Dunkler Materie verwendet ( $\Lambda$ CDM) ergibt sich in toto zu ad(i)  $\{100\Omega_b h^2, 100\Omega_c h^2, 100\Theta_{MC}, n_s, \tau, \ln(10^{10} \Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0))\} = \{22.26(23), 11.86(20), 1.04103(46), 0.9677(60), 0.066(16), 3.062(29)\}$ , ad(ii)  $\{\sigma_8, H_0, \Omega_m, \Omega_\Lambda, z_{\text{reion}}, t_0\} = \{0.8149(93), 67.81(92) \text{ km/s/Mpc}, 0.308(12), 0.692(12), 8.8(+1.7 - 1.4), 13.799(38) \text{ Gyr}\}$ .

Thomas Gold (1920 – 2004):

*For every complex natural phenomenon there is a simple, elegant, compelling, but wrong explanation.*

Vier prinzipiell unterschiedliche Beobachtungstechniken dominieren momentan die Suche nach einer genauen Erklärung zur Natur der Dunklen Energie bzw. beschleunigten Expansion: (i) Baryon-akustische Oszillationen, (ii) Galaxienhaufen, (iii) Supernovae Typ Ia Durchmusterungen, (iv) Schwacher Gravitationslinseneffekt. Kombinationen dieser vier grundlegenden Techniken haben (i) eine wesentlich höhere statistische Aussagekraft, (ii) liefern bessere Unterscheidungsmerkmale zwischen den einzelnen Modellen der Dunklen Energie und sind (iii) wesentlich robuster in Hinsicht auf systematische Unsicherheiten verglichen mit einer Einzelmethode.

Abbildung A.1 zeigt die ab-initio Betrachtung im Zusammenhang mit Kosmologie und Weltraumforschung.

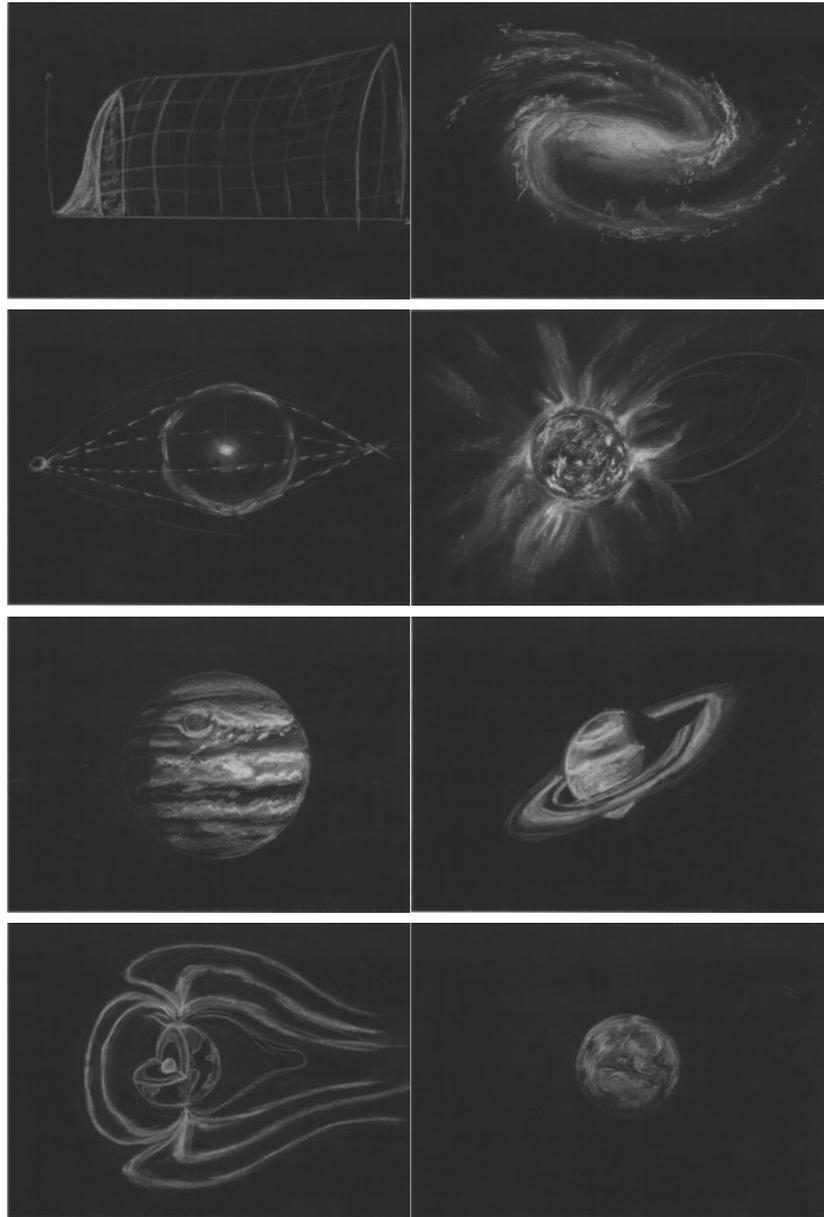
Verschiedene kosmologische Modelle liefern Unterschiede in den Parameterbereichen. Die meisten Instrumente der beobachtenden Weltraumforschung erreichen die geforderte statistische Unsicherheit, der Schlüssel zum Erfolg liegt allerdings in den systematischen Limits, d. h. in der systematischen Unsicherheit (= Genauigkeit) der Messungen. Die Suche nach Antworten gleicht oftmals der nach einer "Nadel im Heuhaufen", bestimmte Thesen werden gestützt, avansieren zu erfolgreichen Modellen (epistemisch, d. h. erkenntniszentriert und nicht ontisch, also seiend und damit unabhängig vom Bewusstsein) und allmählich zeichnen sich Konturen ab die ein konsistentes Bild ergeben sollen, siehe [Eichelberger, 2008]. Um aber auch mit Boltzmann's "Populäre Schriften" zu sprechen: Manches könnte ebenfalls ein "Lehrgebäude aus Phrasen und Hirngespinsten, pardon, ich wollte sagen aus logischen Schlüssen und Vernunftsbegriffen" sein.

Einige Themen/Fragen können nur nach praktischen Gesichtspunkten und als Sache von Konventionen behandelt werden, die nicht alle gleich zweckmäßig sein müssen. Gewisse Erfahrungen schlagen sich in Arbeitsmethoden nieder, die sich möglicherweise etablieren (siehe Kap. C.1). Für gewöhnlich ist vieles in mathematischen Lettern geschrieben, sei es in der Geometrie mit griechischem Ursprung oder Algorithmus und Algebra mit Wurzeln aus dem arabischen Bereich (al-Chwarizmi (~ 780 – 850, er wirkte im "Haus der Weisheit" in Bagdad); erinnert sei hier an das Algebra-Buch von Christoph Rudolff (1499 – 1545). Wissen – und das ungebremste Streben danach, durchaus als Prozeß um der Erkenntnis willen – entsteht im Dialog über Kulturen und Grenzen hinweg durch kontinuierliches übersetzen, sammeln und umsetzen. Einst mußte man zu den Zentren der Wissenschaft pilgern, heute kommt das Wissen entgegen, d. h. Wissen – oder zumindest Information – bewegt sich auf den Menschen zu.

Ohne Betrachtung (i) des in der fernen Vergangenheit liegenden und vorgeschichtlichen Ursprungs der Astronomie, (ii) europäischer Megalithkulturen, (iii) ägyptischer Einflüsse mit dem Kalenderwesen im Zusammenhang mit Nilüberschwemmungen, (iv) chinesischer und (v) indischer Vorstellungen ergibt sich folgendes (grobe) kosmologisch-astronomische Bild. Dabei zeigen sich in zahlreichen Epochen Widersprüchlichkeiten und scharfe Kontraste, d. h. Glanz und Abgründe liegen eng beieinander.

Präkolumbische Kulturen in Amerika – als loses Exzerpt ausgeführt – hatten oftmals umfangreiche kosmologische Betrachtungen, z. B. die Astronomie der Maya (lange Zählung, Sonnen- und Mond-Finsternisse, Sonnenkalender mit  $18 \times 20 + 5$  Tagen, Ritualkalender mit 260 Tagen), das Sonnen-Observatorium von Chankillo (13 Türme um ~ 400 v. Chr.; ohne inhaltlichen Zusammenhang, das Aussehen von der Ferne erinnert an die Bienenkorbgräber von Bat, Al-Khutm und Al-Ayn – ~ 3000 v. Chr. – in der Nähe des Berges Dschabal Mischt im Hadschar-Gebirge, Oman), das Observatorium bei Copacabana am Titicaca-See (Bolivien), Monte Albán (Zapoteken; Oaxaca, Mexiko, durch Olmeken beeinflusst), die Pyramide von El-Tajín ("der Blitz", siehe Seite 208; Totonaken) mit 365 Nischen (Bezug zu Sonnenkalender), die Tempel-Pyramide von Chichén Itzá (91/92 Stufen  $\leftrightarrow$  365 Tage) oder in der Sepulturas Region nahe Copañ (Honduras) mit der Ausrichtung des Schreiberhauses. Teobert Maler (1842 – 1917) lieferte u. a. wertvolle Fotografien von Maya-Bauten, Arthur Posnansky (1873 – 1946) machte archäologische Untersuchungen in Südamerika, z. B. Tiahuanaco in Bolivien.

Zwischen Mesopotamischer Hochblüte und Spätrenaissance ergibt sich im europäischen Raum nachstehendes Bild; grundlegende wissenschaftshistorische Arbeiten (besonders Mesopotamien und Ägypten) gehen zurück auf Otto Neugebauer (1899 – 1990). Vom Mesopotamischen Raum (~ 2700 v. Chr.; Zweistromland – Euphrat und Tigris) geht eine Kontinuität von Vorstellungen bis in unsere Zeit aus (Tierkreiszeichen, in enger Verwandtschaft mit ägyptischen Symbolen; Sternbilder sind mythologische Erzählungen und Kulturerbe ohne naturwissenschaftliche Grundlage), systematische Beobachtungen und Vorstellungen von langen Zeiträumen sind in Keilschriften niedergelegt (Gestirnstafeln, Ephemeriden). Das babyloni-



**Abbildung A.1:** *Ab-initio Grafik Kosmologie und Weltraumforschung, hervorgegangen aus sorgfältigen methodischen Beobachtungen unterschiedlichster Missionen und theoretischer Überlegungen. Zu den empirischen Techniken gehören Nahbereichsaufnahmen von weit entlegenen Objekten durch Langzeitbeobachtung, Schnappschüsse bei Vorbeiflügen oder Beobachtung im Orbit über längere Zeiten hinweg. Die stilisierte Darstellung beschreibt die kosmologische Entwicklung bis zur Strukturbildung im lokalen Universum mit transienten und stationären Einflußfaktoren auf unterschiedlichen räumlichen Skalen, zugleich ein "kunterbunter", qualitativer Blick in längst vergangene Epochen mit – im wahrsten Sinne des Wortes – grellen Kontrasten voller Licht und Schatten. Es sind Skizzen von Einzelobjekten dargestellt wie sie in dieser Arbeit auftreten (Zeichnungen von Eva-Maria Slonek): (i) Das kosmologische Raum-Zeit Gitter (die Abszisse entspricht der Zeitachse  $t$ , die Ordinate dem Skalenfaktor  $a(t)$ ), (ii) (Spiral-)Galaxie(n), (iii) Gravitationslinsen-Effekt, (iv) aktive Sonne, (v) zwei äußere Planeten mit Jupiter ("roter Fleck" ausnahmsweise "oben"; erwähnt sei ebenfalls das Pendant am Neptun, der "große dunkle Fleck") und (vi) Saturn, (vii) die Erde im Schnittbild mit stilisierter Magnetosphäre und (viii) ein kleineres Objekt (Mond) im Sonnensystem, siehe zusätzlich Abb. A.16.*

sche Weltbild speist sich z. B. durch Überlieferung vom Atrahasis- oder Gilgamesch-Epos (Die große Flut; Sintflutvorstellung mit Weltuntergang und Neuanfang). Die Mesopotamische Astronomie hat keine dynamischen, kinematischen Vorstellungen. Ausgehend von Hemerologien ("Tagwählereien" für Tätigkeiten an günstigen/ungünstigen Zeitpunkten) entstehen die ersten Kalender.

Grundlegend prägend für das lateinische Abendland – ausgehend von den Pythagoräern mit (i) der Welt entspricht Harmonie (zahlenbestimmtes Verhältnis) und (ii) Perfektion in der Harmonie (Kugel, Kreis, ...) – ist das Weltbild des Herakleides Pontikos (390 – 322) in Übereinstimmung mit Platons (427 – 347) (Dialektik) Dialog "Gesetze". Dieses Standardmodell regierte bis ins 17. Jhd., kommt somit aus der Philosophie heraus und Beobachtungen die abweichen werden "wegerklärt" um die Theorie zu retten. Philolaos (~ 470 – 400) erklärte, der Kosmos sei eine Kugel, in deren Zentrum sich das Zentralfeuer (Sonne) befinde und die außen vom Feuer des grenzenlosen Olymp (→ CMB) umschlossen sei, Heraklit (~ 520 – 460) hatte die Vorstellung eines Weltenfeuers. Es gab (i) geozentrische, (ii) heliozentrische (Aristarch von Samos (~ 310 – 230); Seleukos von Seleukia (um 190 v. Chr.), er hält das Weltall für unendlich) und auch (iii) Mischsysteme. Claudius Ptolemäus (~ 120 – 175) war "die" Autorität – die Erde steht im Mittelpunkt – teilweise scharf kritisiert und bezichtigt Daten absichtlich verfälscht zu haben (Rettung der Phänomene), dies ändert aber nichts an seiner Wirkmächtigkeit mit dem Almagest (13 Bücher klar gegliedert). Probleme ergaben sich weil Beobachtung und Modell einander nicht entsprechen, z. B. die Rückläufigkeit der Venus (Regression). Das Sphärenmodell des Eudoxos von Knidos (408 – 355) mit 27 Sphären wurde von Aristoteles (384 – 323) (Logik) auf 55(!) konzentrische Sphären erweitert. Abhilfe brachte die Epizykeltheorie von Apollonios von Perge (~ 260 – 190) und in weiterer Folge die Einführung von Exzentrizität, Deferenten und Äquant durch Ptolemäus. Es sind Bahnen mit Epizykel und sogar Epizykel auf Epizykel vorhanden. Ein technisches Meisterwerk aus dieser Zeit ist der Mechanismus von Antikythera, siehe Abb. A.2. Die



**Abbildung A.2:** Der Antikythera Mechanismus ist ein mechanischer Analogrechner (links – Nachbau, rechts – mechanischer Aufbau: Räderwerk, Achsen) aus den 2 Jhd. v. Chr., gefertigt aus Bronze und mit umfangreichen Aufschriften versehen. Er berechnet mit seinem Zahnradwerk Sonnen- und Mondfinsternisse, die Mondbewegung und bestimmte soziokulturelle Ereignisse (Datum der antiken Olympischen Spiele). Relevant sind der Saros Zyklus (223 Monate, Wiederholung der Sonnen- und Mondfinsternisse, 223 ist Primzahl), der Metonische Zyklus (235 Mondmonate gleich 19 Jahre), der Kallippische Zyklus (76 Jahre) und Exeligmos Zyklus (3-facher Saros Zyklus). Ausstellung "Der Mechanismus von Antikythera, ein astronomischer und kalendarischer Computer", Okt./Nov. 2011, Schloss Pöllau, Steiermark.

Muslimischen Astronomen (ab ~ 800) durchliefen 2 Phasen: Eine (i) Periode der Rezeption antiken Wissens, also Übersetzung der philosophisch wissenschaftlichen Literatur bis zum Augenblick der Kritik am Rezipieren. Angelpunkte sind Ptolemäus und Alhazen (al-Haytham) (965 – 1040) durch seine Kritik an Ptolemäus und an der Wissenschaft insgesamt. In einer (ii) zweiten Periode erfolgte die kritische Auseinandersetzung mit dem Überlieferten, es entstanden bessere Hypothesen und Theorien aufgrund verfeinerter

Beobachtungen. Die Frage eines heliozentrischen oder geozentrischen Weltbilds war für die Muslime nicht maßgeblich.

Das Abendland war bis zur Hochscholastik (1200–1340) ziemlich "finster" – ein Universalgelehrter dieser Zeit war allerdings Engelbert von Admont (~1250 – 1331) – es galt die mittelalterliche geozentrische Vorstellung mit dem Primum Mobile, der äußersten bewegten Sphäre. John von Holywood's (Johannes de Sacrobosco, ~ 1195 – 1256) Lehrbuch "De Sphaera" wirkte bis ins 17. Jahrhundert. Robert Grosseteste (ca. 1175 – 1253) entwickelte Mitte des 13. Jhd. eine Kosmologie aus Licht mit einem gewissen Urknall (Big-Bang) Charakter.

Eine erste Säkularisierung ab dem 13. Jhd. (Thomas von Aquin, ~ 1224 – 1274) führt zur rein rationalen Betrachtungsweise eines William von Ockham (~ 1285 – 1347) und zur Grundlage freier Naturwissenschaft (siehe Kap. C.2.1 und Abb. C.5). Averroës / Ibn Rushd (1226 – 1298) liefert zur gleichen Zeit u. a. umfangreiche Kommentare zu Werken Aristoteles, er spricht von "2 Wahrheiten" – (i) der Offenbarung (Religion, Riten, Symbole) und (ii) eigenes Nachdenken (Philosophie, Intuition, abstrakter Weg), Auseinandersetzungen gipfeln in den Pariser Verurteilungen von 1270 und 1277. Weitere Entwicklungen der Mathematik ermöglichten eine rationale Erfassung physikalischer Phänomene und einer Loslösung der (Natur-) Philosophie von der Theologie. Bei diesen Erwartungen an die Welt bleiben Differenzen zwischen Fides und Ratio bis heute bestehen. Zu erwähnen ist hier die Wiener mathematisch astronomische Schule mit Tafelwerken, Arbeiten in der Trigonometrie und Verbesserung von Instrumenten (siehe Abb. A.3) verknüpft mit Johannes von Gmunden (~ 1380/84 – 1442), Georg von Peurbach (1423 – 1461) und Regiomontanus (1436 – 1476). Mit Nikolaus Kopernikus (1473 – 1543) – durch seine Studien und Aufent-



**Abbildung A.3:** Modell eines Astrolabiums mit Alhidade (Lineal) aus der Zeit Peurbachs; Georg von Peurbach Symposium, Okt. 2010, Pöllau, Steiermark.

halte in Italien (Bologna, Rom, Padua, Ferrara) von der Renaissance beeinflusst – und seinem vorerst nicht öffentlich publizierten Werk "Commentariolus" (kleiner Kommentar, die Grundlage seiner Lehre, eine Einführung ins neue Weltbild; wichtiges Werk für darin enthaltene Überlegungen zur Kalenderreform,

Papst Clemens VII. (1478 – 1534) ließ sich 1533 darüber unterrichten; aus der Heilsberger Zeit, ca. 1506 bis 1512 entstanden) war der Übergang zum heliozentrischen System gegeben, "De Revolutionibus Orbium Coelestium" (Von den Drehungen der Himmelskugeln, Drucklegung 1543, Papst Paul III. (1468 – 1549) gewidmet), in Verbindung mit seinem Schüler Georg Joachim Rheticus (1514 – 1574), vollzog die Kopernikanische Wende. Nicht der unbewegte Beweger (Gott) bewegt (Primum Mobile), sondern die Rotation der Erde ist verantwortlich.

Tycho Brahe (1546 – 1601) steigert die Qualität der Beobachtungen bis an die physiologisch mögliche Grenze, er verwendet nicht das kopernikanische sondern sein tychonisches (altes ägyptisches) System. Die Rudolfinischen-Tafeln basieren auf Tychos Messungen (Tafeln der Ilchane → Toledanische-Tafeln → Alfonsinische-Tafeln → Rudolfinische-Tafeln → Ephemeriden).

Johannes Kepler (1571 – 1630) legte mit seiner "Astronomia Nova" im Jahre 1609 (1606 fertig, 3 Jahre Drucklegung) den Anfang und zugleich krönenden Abschluß – der Schlußstein der Astronomie ohne Fernrohr. Kepler hat sich der kopernikanischen Grundidee angeschlossen, diese aber modifiziert. Gab es noch dicke Sphären bei Kopernikus so schrieb Kepler Ellipsen ein. Zudem hat er alles 3-fach gerechnet, im (i) ptolemäischen-, (ii) tychonischen- und (iii) kopernikanischen System. Das "Mysterium Cosmographicum" aus 1596, ein Werk, daß er zeitlebens verfolgt hat, beschreibt die Grundideen Keplers (19. Juli 1595 – Idee, wie es zu machen sei): Erklärungen sind ex causis (aus den Urgründen, unmittelbar aus Anschauung, ursächlich begründet), die harmonische Grundvorstellung besteht aus den 5 platonischen Körpern, der Planetenbecher gibt die Proportionen (nicht die Radien) auf Basis der platonischen Körper (nur in diesen kann man Kugeln ein- und umschreiben). Diese spekulative, harmonische Grundvorstellung hat lange weitergelebt, z. B. in der Titus Bode Reihe. Die Natur (als Werk Gottes) ist das zweite Buch Gottes, die Bibel (Wort Gottes) das erste Buch. Nach der zweiten und entgeltigen Vertreibung aus Graz – siehe Denkmäler und Inschriften Abb. A.4 – geht Kepler im Jahr 1600 nach Prag (zugleich das Jahr der Verurteilung von Giordano Bruno (1548 – 1600) [Giordano Bruno and Schultz (Hsg.), 1994] als Ketzer; Nikolaus von Kues (1401 – 1464), ein Neuplatoniker der Frührenaissance, sprach bereits zuvor von einer Vielfalt der Welten) zu Tycho Brahe an den Hof Rudolf II. (1552 – 1612). Kepler hatte große Schwierigkeiten an Tychos Daten zu kommen, letztlich gelang es ihm nicht mit Hilfe der Marsbahn und 10 Orte aus Tychos Beobachtungen exakter Orte diese auf einem Kreis zu vereinigen. Die Differenz von nur 8 Bogenminuten (!) konnte Kepler nicht tolerieren, seine Schwelle lag bei 2 Bogenminuten. Kepler vertraut auf die Exaktheit von Tychos Daten, sein Ziel war der Kreis (Macht der Grundvorstellung, Harmonie), er nähert sich der Ellipse, findet nach langen Rechnungen sein 2<sup>tes</sup>- und danach sein 1<sup>tes</sup> Gesetz. Nach der Berechnung der Marsbahn in der "Astronomia Nova" bekam er ein paar Monate später von Galileo Galilei (1564 – 1642) den "Sidereus Nuncius" (Sternenbote) mit Teleskopbeobachtungen: (i) der Mond ist keine ideale Kugel, (ii) 4 Jupitermonde, (iii) Planeten und Sterne sind unterschiedlich, (iv) die Milchstraße besteht aus unzähligen Sternen und (v) es gibt mehr Sterne als mit freiem Auge zu sehen sind. Kepler fehlt die Vorstellung von Trägheit, die es allerdings in der Antike bereits gab. Die Diskrepanz bestand zwischen den Harmonie-Ideen und der Struktur im Kosmos (Kepler war auch Theologe). Der Welterschöpfer ist als Uhrmacher mechanistisch tätig, eine (allerdings magnetische, siehe Gilbert's "De Magnete" Kap. A.1.4) Kraft bewirkt die Bewegung der Planeten um die Sonne (anima motrix) – eine erhebliche Vorwegnahme von Gravitationsvorstellung. "Harmonices Mundi" von 1619, sein astronomisches Lebenswerk, entspricht der Fortsetzung der ptolemäischen Harmonie (Sphärenmusik, Planetenharmonie, Sphärenharmonie), dort findet sich im fünften Buch das 3<sup>te</sup> Kepler'sche Gesetz. Abbildung A.5 zeigt dazu passend die 25 Euro Silber-Niob Münze mit dem Thema Kosmologie (Münze Österreich, Ausgabedatum 21. Jan. 2015). Erwähnt in diesem Zusammenhang sei ebenfalls der Schwazer Silber-Bergbau in Tirol (siehe Seite 103) und der Europa-Taler von Maximilian I. (HRR) (1459 – 1519) aus der Haller-Münze (dessen Vater war Friedrich III. (HRR), 1415 – 1493, bekannt durch den Wahlspruch A.E.I.O.U.; der Großvater war Ernst der Eiserne, 1377 – 1424).

### Universum – naturwissenschaftlicher Status, aktueller Konsensus und Fragestellungen

Primär gilt es folgende grundlegende Fragestellungen zu beantworten: (1) Wie ist die physikalische Struktur des Universums, inter alia die (i) Zusammensetzung von astronomischen Objekten, (ii) Verteilung von Galaxien, (iii) kosmische Mikrowellenhintergrund-Strahlung, (iv) gravitativer Linseneffekt, etc., bestimmt durch weltraum- und bodenbasierte Beobachtungen. Diese experimentellen Daten liefern das Grundgerüst



**Abbildung A.4:** Inschriften und Denkmäler in Graz die an Johannes Kepler's Leben und Werk erinnern. Links oben die Tafel im Paradeishof, daneben die Inschrift auf dem Haus Keplerstraße 2 gegenüber dem Keplergymnasium, in der zweiten Reihe Kunst im öffentlichen Raum, das Denkmal (1990) am Beginn der Keplerbrücke auf der Schloßbergseite mit seinen 4 + 1 Elementen in Eisenoxid-Patina (vulgo Rost) – Schriften auf den Cortenstahl-Vitrinen von Gerhard Lojen (1935 – 2005): "Die Planeten bewegen sich in elliptischen Bahnen in deren einem Brennpunkt die Sonne steht", "Die Strecke Planet-Sonne (Radiusvektor) bestreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen", "Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben ihrer grossen Bahnachsen", "Johannes Kepler (1571-1630) wirkte ein Graz von 1594 bis 1600" – darunter die Darstellung im Stadtpark mit Büste auf Stele aus 1963 von Alfred Pirker (1910 – 1986) und Granitplatten der Kepler'schen Gesetze mit Stilisierung der Planetenbewegung (Ergänzung 1989).

für theoretische Modelle zur Beschreibung der Raumzeit. (2) Wie entwickeln sich diese Strukturen?

Der gravitative Linseneffekt (Kap. A.1.2), die Messung von Gravitationswellen (erstmalig direkte Detektion am 14. Sep. 2015) und der Lense-Thirring Effekt (frame dragging; Josef Lense 1890 – 1985, Hans Thirring 1888 – 1976; er kann u. U. mit terrestrischen Ringlaser-Systemen – ebenfalls relevant für Erdbebenstudien, siehe Kap. 4.1.4 – in naher Zukunft verifiziert werden, frühere Messungen gab es u. a. mit den Missionen Gravity Probe B oder LAGEOS) sind wichtige Methoden um Strukturen auf unterschiedlichen Skalenlängen zu bestimmen.

Die Form der Raumzeit kann (i) lokal flach oder gerippt, (ii) global (bestimmt durch CMB Messungen) flach, positiv oder negativ gekrümmt sein, oder auch komplexere topologische Strukturen zeigen.

Die Stringtheorie, und ihre Verallgemeinerung, die Membran (M) Theorie ersetzt Punktteilchen mit höherdimensionalen Objekten wie Strings und Membranen. "Branes" sind Ableitungen von Membranen. Die Stringtheorie ergibt sich durch versagen von klassischen Gravitationstheorien bei sehr kleinen Distanzen, oder äquivalent, bei sehr hohen Energien, wenn quantenmechanische Effekte nicht vernachlässigt werden können. Allgemeine Relativitätstheorie (ART) und String (M) Theorie müssen auf großen Skalen und bei niedrigen Energien, z. B. in der Kosmologie, idente Resultate liefern. Spätestens auf der Planckskala und darunter verliert der Begriff der Raumzeit die Bedeutung.

Das Hierarchie Problem – die Fragestellung, warum die Gravitation so außerordentlich schwach ist – ergibt sich aus dem Vergleich zwischen elektroschwacher Massenskala im TeV ( $10^3$  GeV,  $1 \text{ GeV} \equiv 10^{-14} \text{ cm}$ ) Bereich (Skala, auf der das Standard-Modell Teilchenmassen von Quarks und Leptonen bestimmt) und der Planckskala ( $10^{19}$  GeV), der Massenskala die Newton's Gravitationskonstante bestimmt ( $\propto$  zur Inversen der Planckmasse zum Quadrat) und die Skala auf der quantenmechanische gravitative Effekte neue physikalische Erscheinungen sichtbar werden läßt:  $l_p = (hG/c^3)^{1/2} \sim 10^{-35} \text{ m}$ ,  $t_p = (hG/c^5)^{1/2} \sim 10^{-43} \text{ s}$ ,  $m_p = (hc/G)^{1/2} \sim 10^{19} \text{ GeV}/c^2$ ,  $T_p = m_p c^2 / k$  (Planck'sche Temperatur).

Der Raum ist eine dynamische (:= d. h. explizit zeitabhängige) Einheit mit Krümmung und Fluktuation. Messungen (CMB, grav. Lichtablenkung, SNIa, LSS,  $\text{Ly}\alpha$ , stellare Dynamik, Röntgen-Binärsysteme) über 22 Größenordnungen räumlicher Skala bestimmen Eigenschaften der Raumzeit und geben ein konsistentes Bild aus  $\{73 / 23 / 4\} \% = \{\text{DE} / \text{DM} / \text{Baryonen}\}$  und zumindest zwei unterschiedlichen Populationen von Schwarzen Löchern. Um eine Vorstellung zu haben, das entspricht ungefähr dem Verhältnis  $\{71 / (25 + 4) / 4\} \% = \{\text{Wasserfläche} / \text{Landfläche} / \text{doppelte Fläche Europas}\}$  zur Gesamt-Oberfläche der Erde.

Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie Kap. A.1.9 ist der Begriff der Raumzeit etwas das Mathematiker als Mannigfaltigkeit bezeichnen, charakterisiert durch (i) Metrik und (ii) Topologie. Die Metrik bestimmt die lokale Form der Raumzeit, d. h. Entfernungen und Zeitintervalle. Topologie bestimmt die globale Struktur und umfaßt beispielsweise Fragestellungen ob der Raum in allen Richtungen unendlich ist oder mehrfach zusammenhängend.

Der aktuelle Konsensus ist bestimmt durch eine extrem glatte, homogene und isotrope (translatorisch und



**Abbildung A.5:** Münze Österreich, Kosmologie (linke Seite der Abbildungen) und Mikrokosmos (rechte Seite); Silber-Niob 25 Euro Nennwert; Bildseite: Planeten, Begriffe (Sonnensystem, Galaxie, Universum, Multiversum) und European Extremely Large Telescope (E-ELT); Wertseite: Sterne, Saturn, Rosetta Raumsonde, Wellenzüge, Lagrange-Punkte, Fluchtgeschwindigkeit und Boltzmann'sche Entropie-Formel  $S = k \ln W$ . Die Mikrokosmos-Münze zeigt ein Atom-Symbol, Moleküle aus der Chemie und biologische Strukturen (Zelle, Viren, etc.) und als Insekten Biene & Schmetterling.

rotatorisch invariante) Raumzeit auf großen Skalen ( $\sim 10^{23} - 10^{26}$  m) mit kleinen Fluktuationen, die im Laufe der Zeit anwachsen und Objekte wie Sterne, Galaxien und andere Formen hervorgebracht haben.

Messungen der CMB zeigen, daß der Raum auf der Skala des kosmischen Horizontes ( $\sim 10^{26}$  m) mit Fluktuationen von einer Richtung zur anderen im Verhältnis  $1/10^5$  nahezu vollständig isotrop ist. Das kosmologische Prinzip besagt, daß nichts spezielles unseren Beobachtungspunkt auszeichnet, eine postulierte generelle Isotropie  $\rightarrow$  daraus ergibt sich zusätzlich, daß der Raum homogen ist.

In (i) nullter Ordnung, d. h. Fluktuationen sind vernachlässigt, ist damit die globale Metrik auf die Form der Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) Metrik festgelegt. Die FLRW ist bis auf den Krümmungsparameter und eine freie Funktion für die Expansion komplett spezifiziert. In (ii) erster Ordnung wachsen die Dichtestörungen aufgrund von gravitativen Instabilitäten und Gravitationswellen (GW) propagieren durch den FLRW Raumzeit-Hintergrund, alles beschrieben durch lineare Gleichungen. Bei (iii) höheren Ordnungen ( $\leq 10^{23}$  m) werden die Fluktuationen groß und die nichtlineare Dynamik kommt ins Spiel, in der Realisation durch Galaxien, Sterne und Schwarze Löcher.

Die generelle Form/Gestalt (:= strukturelle Mannigfaltigkeit) der Raumzeit ist wie vorhin erwähnt durch die Krümmung und Topologie bestimmt. Die Expansion der Raumzeit zeigt sich durch Messungen von SNIa Ereignissen und durch die Lage der Spitzen (Maxima/Minima) im CMB-Spektrum. Beides zusammen ergibt des Wissen zur nullten Ordnung (Krümmung, Topologie und Expansion). Das Wachstum von kosmischen Strukturen, (empirisch) bestimmt durch Gravitationswellen und Dichtefluktuationen (CMB, grav. Linseneffekt, Cluster von extragalaktischen Objekten) ergibt das Wissen zu Fluktuationen in erster Ordnung. Fluktuationen erster Ordnung in der Dichte sind durch eine einzige Funktion spezifiziert, durch das Leistungsspektrum  $P(k, z)$ . Das Leistungsspektrum gibt die Varianz der Fluktuationen als Funktion von Rotverschiebung  $z$  und Wellenzahl  $k$ , es hängt ab von drei Faktoren: (i) der vorhandenen kosmischen Materie, (ii) den ursprünglichen Fluktuationen im frühen Universum und (iii) der Galaxienbildung. Die Herausforderung liegt darin diese drei Bereiche durch robuste Methoden zu trennen.

(ad i) Das Konkordanz Modell ergibt sich durch Messung der Expansionshistorie  $H(z)$  und des Leistungsspektrums  $P(k, z)$  der CMB und von LSS Beobachtungen (in guter Übereinstimmung mit  $\text{Ly}\alpha$ , Linseneffekten und SNIa) mit 73 % Dunkle Energie, 23 % Dunkle Materie (1/10 % heiße DM Neutrinos) und 4 % gewöhnliche baryonische Materie. (ad ii) Die initialen Fluktuationen  $\delta T/T \sim 1/10^5$  sind in Übereinstimmung mit Vorhersagen der Inflationsperiode mit der einfachen Relation  $P(z, k) \propto k^n$ ,  $n = 0.9 \pm 0.1$ . (ad iii) Es scheint, daß die Reionisation des Universums (erstmalig 1965 durch Quasar-Beobachtungen erkannt [Gunn and Peterson, 1965]) nicht lange vor  $z \sim 6$  stattgefunden hat, basierend auf  $\text{Ly}\alpha$  Messungen.

Die Leistungsspektren  $P(k, z)$  gemessen von CMB, LSS, Linseneffekten,  $\text{Ly}\alpha$  sind das Produkt von drei Termen: (a) dem primordialen Leistungsspektrum, (b) der sogenannten Transferfunktion, sie quantifiziert das nachfolgende Wachstum der Fluktuationen und (c) dem Biasfaktor (nur für LSS und  $\text{Ly}\alpha$ ). Er berücksichtigt, daß die gemessenen Galaxien und Gaswolken sich unterschiedlich verhalten in bezug zur umgebenden "darunterliegenden" (Dunklen) Materie.

Auf kleineren Skalen geschieht das nichtlineare Wachstum und die Dynamik von Schwarzen Löchern. Der lineare Störungsansatz in der Expansion gilt nicht mehr wenn Dichtefluktuationen eine Größenordnung von Eins erreichen, der Kollaps erzeugt eine ganze Fülle an unterschiedlichen astrophysikalischen Objekten.

Zusammen ergibt sich somit die Unterteilung in drei Skalen: (i) DM in Galaxien und Galaxienhaufen ( $\sim 10^{20} - 10^{23}$  m), (ii) Supermassive Schwarze Löcher in Galaxienkernen ( $\sim 10^{10} - 10^{13}$  m) und (iii) stellare Schwarze Löcher ( $\sim 10^4 - 10^5$  m). Möglicherweise enthält die Spiralgalaxie ESO 243-49 (neben anderen Kandidaten) ein dazwischenliegendes Schwarzes Loch mit einem unteren Massenlimit von  $\sim 500 M_{\odot}$ . Alle Schlußfolgerungen über DE, DM und Schwarze Löcher basieren auf der Annahme der Gültigkeit der Einstein'schen Feldgleichungen der ART, siehe Kap. A.1.9.

## Inflation, Kosmologische Konstante

**Inflation** Während der Phase der kosmischen Inflation  $\ddot{a} > 0$  (in unterschiedlichen Ausprägungen postuliert) ist die Energiedichte bestimmt durch die Wirkung eines skalaren Quantenfeldes, dem Inflaton  $\phi$  mit einer Lagrangedichte  $\mathcal{L} = 1/2\partial^{\mu}\phi\partial_{\mu}\phi - V(\phi)$ . Das Feld ist charakterisiert durch die effektive En-

ergiedichte  $\rho c^2$  und dem Druck  $p$  abhängig von der Form eines Interaktions-Potentials  $V(\phi)$

$$\rho = \dot{\phi}^2/2 + V(\phi), \quad p = \dot{\phi}^2/2 - V(\phi). \quad (\text{A.1})$$

Die Evolution des Feldes ist gegeben durch die Bewegungsgleichung  $\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \phi' = 0$ , das Anführungszeichen  $'$  bedeutet Differentiation bezüglich  $\phi$ . Sind die kinetischen Terme wesentlich kleiner als die Potentiale,  $V \gg \dot{\phi}^2$ , denn ergibt sich eine Zustandsgleichung der Form  $p \approx -V(\phi) \approx -\rho$  ähnlich der Situation mit DE im späteren Universum. Erlaubt man dem Universum einen Phasenübergang bei dem das Feld in einen neuen Vakuum-Zustand rollt, dann kann für sehr kurze Zeit ein exponentielles Wachstum des Skalenfaktors erfolgen,  $a(t) \sim e^{Ht}$ ,  $H^2 \sim (8\pi G/3)V$ . Nach dieser Hyperexpansion befindet sich das Universum in einer strahlungsdominierten Phase. Inflation als dynamischer Mechanismus (ohne Feinabstimmung von Parametern) erlaubt einem weiten Spektrum von Anfangsbedingungen den Endzustand von (i) räumlicher Flachheit und (ii) ein hohes Maß an Isotropie und Homogenität, beides Eigenheiten unseres beobachtbaren Universums.

**Kosmologische Konstante** Beobachtungen beginnend mit 1997 (SNIa) legen nahe, daß das Universum durch eine (physikalisch schwer erklärbare) homogene Energiedichte mit negativem Druck dominiert wird. Der abstoßende Effekt einer positiven kosmologischen Konstante  $\Lambda$  kann aus den Einstein'schen Feldgleichungen mit einem zeitabhängigen Skalenfaktor  $a(t)$  mit  $\ddot{a} = -4/3\pi G(\rho + 3p)a + 1/3\Lambda a$  berechnet werden,  $p$  ist der Druck von allen Formen an Materie. Es stellen sich grundlegende Fragen: (i) Warum ist die kosmologische Konstante derart klein, (ii) warum ist sie nicht exakt null und (iii) warum ist in der heutigen Epoche die Energiedichte der Dunklen Energie (DE) von der gleichen Größenordnung wie die der Materie? Die effektive (beobachtbare) kosmologische Konstante  $\Lambda_{\text{eff}} \equiv \Lambda + 8\pi G\langle\rho\rangle$  ist nahe null ( $\Lambda$  ist der unbekannt "bare" Wert),  $\Lambda_{\text{eff}} \lesssim \mathcal{O}(10^{-84}) \text{ GeV}^2$ . Als Vergleich, die empirische obere Grenze der Masse eines Photons (quadiert) von terrestrischen Messungen des magnetischen Feldes ergibt sich mit  $m_\mu^2 \lesssim \mathcal{O}(10^{-50}) \text{ GeV}^2$ . Durch Beobachtung der CMB ist es unmittelbar möglich abzuleiten wie das Universum zur Zeit der Rekombination ausgesehen hat. Das Spektrum ist hohen Grades Planck'scher Struktur, die Fluktuationen ( $\sim 1/10^5$ ) über die "kosmische Photosphäre" bei einer Rotverschiebung von  $z \approx 1089$  legen Modell-Parameter auf enge Grenzen fest. Vor der Rekombination, bei Temperaturen  $T \gtrsim 6000 \text{ K}$ , waren Photonen, Elektronen und Baryonen stark gekoppelt, diese Komponenten konnten als ein einziges Fluid betrachtet werden, zusätzlich gab es die Dunkle Materie. Diese beiden Komponenten wechselwirken für alle praktischen Anwendungen nur gravitativ, d. h. es ist ein Fluid aus zwei Komponenten vorhanden. Zu einem späteren Zeitpunkt entkoppeln die Komponenten, die Näherung bricht zusammen weil die mittlere freie Weglänge der Photonen nach der Rekombination größer und letztlich "unendlich" wird. Die Elektronen und Baryonen können zu diesem Zeitpunkt nach wie vor als gemeinsames Fluid betrachtet werden, die Photonen und ihre Kopplung mit den Elektronen werden beschrieben durch die allgemein relativistische Boltzmann Gleichung. Eine charakteristische Skala in den beobachteten CMB Anisotropien ist der Schallhorizont ("sound horizon") bei der letzten Streuung ("last scattering"), d. h. die Entfernung über die eine Druckwelle sich ausbreiten kann bis  $\eta_{\text{Entkopplung}}$ . Innerhalb des Schallhorizontes, d. h.  $\eta < \eta_{\text{Entkopplung}}$ , kombinieren akustische Dopplereffekte, gravitative Rotverschiebung und Photon-Diffusionseffekte zum Spektrum der kleinwinkligen Anisotropien. Dies resultiert aus gravitativ getriebenen akustischen Oszillationen des Photon-Baryon-Fluids, welches durch Photonendiffusion gedämpft wird.

Die konzeptionelle Betrachtungsweise der Rotverschiebung  $z$  besteht in einer Ausdehnung des Raumes während Licht durch diesen Raum sich ausbreitet. Der Betrag der Rotverschiebung, oder in anderen Worten – die Ausdehnung der Wellenlänge – gibt Auskunft um wie viel sich das Universum ausgedehnt hat während Licht durchpropagiert ist. Die momentane Temperatur der CMB beträgt  $T = 2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$ , gleichbedeutend mit einer (handlichen) Photonenzahl von  $\sim 411 \text{ cm}^{-3}$ . Im Gegensatz dazu sind bei allen beobachteten Sternen und Gasmengen im Universum im Mittel nur  $0.2 \text{ Atome/m}^3$  vorhanden, somit in etwa  $2 \times 10^9$  weniger als die Photonendichte. Summa Summarum: Einige Debatten über kontroverielle Themen wurden beigelegt, gleichzeitig neue Fragestellungen durch Beobachtungen aufgeworfen, d. h. diese aktuellen Forschungsthemen sind ein lohnendes Puzzle das es zu bearbeiten/lösen gilt. Zu den Fragen von vorhin (Antwort aus der Empirie): Einige der bedeutendsten Resultate in der Physik, Astronomie, Technik und anderen Bereichen wurden durch Synergien zwischen unterschiedlichsten Instrumenten, in verschiedenen Umgebungen und bei hohen Sensitivitäten in einem breiten Frequenzbereich erzielt.

### Frühes Universum, erste Sterne und Galaxien

Die erste Sternengeneration entstand  $\sim 200$  Mill. Jahre nach dem Urknall mit einem breiten Massenspektrum, Eigenschaften der ersten Galaxien wurden von [Partridge and Peebles, 1967] publiziert. Das Fehlen von schweren Elementen im primordialen Gas erlaubt die Bildung von massereichen, heißen Sternen, verbunden mit starker UV Strahlung und damit einer graduellen (Re-)Ionisation im Rotverschiebungsbereich  $6 \lesssim z \lesssim 17$  der umgebenden interstellaren Materie, eine Art "globale Erwärmung des Universums".

Lyman Alpha Emittierer (LAE) sind junge Galaxien mit einer Sternbildungsrate von  $1 - 10 M_{\odot}$  pro Jahr. Heiße massereiche Sterne mit ihrer starken UV Strahlung ionisieren das interstellare Gas, dieser ionisierte H rekombiniert und kühlt durch Emission eines Lyman Alpha Photons. Die Anzahl solcher Sterne ist eher gering, das Spektrum ist charakterisiert durch starke  $Ly\alpha$  Emissionslinien mit asymmetrischem Profil.

Der Nachthimmel zeigt sehr starke Bänder von OH Emissionslinien, atmosphärische Lücken zwischen diesen Bereichen sind astronomische Fenster für Untersuchungen bei hohen Rotverschiebungen (narrow band surveys). Umfangreiche (Galaxien-) Durchmusterungen werden z. B. vom Sloan Digital Sky Survey (SDSS) durchgeführt.

Neutraler Wasserstoff absorbiert und streut  $Ly\alpha$  Photonen, nicht aber das UV Kontinuum. Population III Sterne in LAEs, gefolgt von Population II Sternen, erzeugen  $Ly\alpha$  Emissionen.

Lyman Break Galaxien (LBG) sind massereichere Galaxien mit älterer Sternpopulation, die Kontinuumsstrahlung ist wesentlich stärker als bei LAEs. Die Spektren dieser Galaxien haben ein charakteristisches Kontinuum im blauen Bereich der  $Ly\alpha$  Linie, verursacht durch intrinsische stellare Absorption von Sternatmosphären und durch intergalaktische Absorption durch neutralen Wasserstoff. Sie sind deshalb sichtbar in Bändern rötlicher als die  $Ly\alpha$  Linie, aber nicht erkennbar in Bändern auf der blauen Seite der  $Ly\alpha$  Linie. Galaxienhaufen sind die größten natürlichen Teleskope des Universums, mit einem Durchmesser von  $\sim 1$  Mpc ( $1 \text{ Mpc} = 3.1 \times 10^{24} \text{ cm} = 3.3 \times 10^6 \text{ Lj}$ ). Das frühe Universum gliedert sich – in Klammern die momentan entferntesten Objekte – in (i) diskrete Punktquellen, darunter ( $i_1$ ) Quasare ( $z = 7.085$ ), ( $i_2$ ) GRBs ( $z \sim 9.4 \rightarrow \sim 520$  Myr nach dem Urknall) und (ii) Galaxien mit ( $ii_1$ ) LAE's ( $z = 8.55 \rightarrow 13.1$  Gyr) und ( $ii_2$ ) LBG's ( $z = 10.7$ ), z. B. bestimmt durch das Very Large Telescope (VLT, 8.2 m) von der Europäischen Organisation für astronomische Forschung in der südlichen Hemisphäre (European Southern Observatory, ESO), dem Hubble Weltraumteleskop oder dem Keck Observatorium (z. B. Galaxien via  $Ly\alpha$  bei  $z = 8.68$ ,  $z = 7.73$  oder  $z = 7.51$  mit einer Sternbildungsrate SFR von  $330 M_{\odot}/\text{yr}$ , siehe ebenfalls A.1.5).

Zur Bestimmung von neutralem Wasserstoff im intergalaktischen Raum siehe [Gunn and Peterson, 1965], zunehmend an Bedeutung gewinnen Radio-Bursts im Millisekunden Bereich (fast radio bursts, FRBs, erstmals 2007 beobachtet) als Mittel zur Untersuchung des intergalaktischen Mediums.

### A.1.2 Gravitative Lichtablenkung, Gravitationslinsen

Hervorragende Arbeiten bezüglich des schwachen Gravitationslinsen-Effektes mit umfangreichen Betrachtungen sind [Bartelmann and Schneider, 2001], [Mellier, 1999] und [Réfrégier, 2003], diese Artikel liegen diesem Abschnitt zugrunde. Bei gravitativer Lichtablenkung ist die Ausbreitung von Licht durch Massenverteilungen im Universum beeinflusst. Ein Bonmot in der Historie dazu ist die Konversation zwischen Albert Einstein und Rudi W. Mandl, durch seine Hartnäckigkeit konnte er Einstein zu einer Notiz dazu (Linsenwirkung eines Sterns) in der Zeitschrift "Science" (1936) veranlassen. Die ersten Messungen gehen zurück auf die Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919, die Resultate waren wie von der Allgemeinen Relativitätstheorie (siehe Kap. A.1.9) theoretisch vorausgesagt. Der Ablenkwinkel  $\delta\Theta$  ergibt sich zu  $\delta\Theta = 1/2 \times (1 + \gamma) \times (4GM_{\odot}/c^2d) \times (1 + \cos(\Phi))/2$ , mit Sonnenmasse  $M_{\odot}$ , Gravitationskonstante  $G$ , Lichtgeschwindigkeit  $c$ ,  $\gamma = 1$  für ART,  $d$  Entfernung in der der Lichtstrahl die Sonne passiert, Winkel zwischen der Linie Sonne-Erde und der Photonenrichtung  $\Phi$ ; bei einem Vorbeigang in der Entfernung des Sonnenradius –  $\Phi \sim 0$ ,  $d \sim R_{\odot}$  – ergibt sich  $\delta\Theta \sim 1/2 \times (1 + \gamma) \times 1.7505''$ . Für gewöhnlich wird zwischen (i) starker- (Baryonische- und Dunkle Materie (Sub)Strukturen in Galaxien und Galaxienhaufen; kosmische Teleskope; Distanzmessungen im Universum; Charakterisierung der gravitativen Linsen), (ii) schwacher- (Massenverteilungen von Galaxienhaufen; Bestimmung kosmologischer Parameter; mittlere Massenverteilung von hintereinander liegenden, "gestapelter" Galaxien := Galaxy-Galaxy lensing) und (iii) Mikro-Ablenkung (zeitlich kurze Aufhellungen des kombinierten Signals Quelle-Linse, z. B. Suche nach

Dunkler Materie in der Milchstraße und nach Exoplaneten) unterschieden. Lichtstrahlen werden abgelenkt wenn sie sich in einem inhomogenen Gravitationsfeld ausbreiten. Nimmt man an, daß sich Licht wie eine Strom aus Teilchen (Photonen) verhält, kann die Ablenkung mittels Newton'scher Theorie der Gravitation (Isaac Newton, 1643 – 1727) berechnet werden – die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) sagt allerdings einen doppelt so großen Effekt voraus, siehe [Will, 1988], [Bodenner and Will, 2003], [Ishak et al., 2008]. Eine Quelle kann mehrfach abgebildet werden, z. B. durch ein Gravitationslinsensystem, die Formulierung der ART spricht dabei von mehr als einer Nullgeodäte die Weltlinien von Quelle und Beobachtungsereignis verbindet. Gravitative Gezeitenfelder führen zu differentieller Ablenkung von Lichtbündeln. Die Größe und Form ihres Querschnittes wird somit verändert, d. h. der gemessene Fluß von einer Quelle verändert sich. Nachdem Photonen bei der gravitativen Lichtablenkung weder emittiert noch absorbiert werden bleibt die Oberflächen-Helligkeit von Quellen in Linsensystemen unverändert. Das gravitative Gezeitenfeld kann aus den sichtbaren kohärenten Verformungen aus Bildern ferner Galaxienpopulationen rekonstruiert werden und daraus kann das Dichteprofil der dazwischenliegenden Galaxienhaufen (clusters of galaxies) bestimmt werden.

### Prelude – Schwacher Gravitationslinseneffekt

Ein gemeinsamer Aspekt aller Studien zum schwachen Gravitationslinseneffekt liegt in der statistischen Natur der Effekte bei Messungen. Der schwache Linseneffekt ("weak lensing" – WL, "cosmic shear" := WL Signal bei statistischer Bestimmung von Massenverteilungen in Strukturen die für sich alleine nicht massereich genug sind um individuell bestimmt zu werden, d. h. WL in kosmologischen Untersuchungen) zeigt sich nur über Ensembles von Quellen. Verstärkungs- und Verzerrungs-Effekte aufgrund WL können verwendet werden um statistische Eigenschaften von Materieverteilungen zwischen dem Beobachter und einer Ansammlung von fernen Quellen zu bestimmen, vorausgesetzt einige Annahmen über die Quelleigenschaften treffen zu (die Orientierung von lichtschwachen, fernen Galaxien sei stochastisch). Dann ergibt sich aus jeder kohärenten Ausrichtung auf Bildern die Anwesenheit von dazwischenliegenden gravitativen Gezeitenfeldern. Eine kohärente Anordnung lichtschwacher, ferner Galaxien kann (i) aufgrund des dazwischenliegenden gravitativen Gezeitenfeldes sein, könnte (ii) ebenfalls aufgrund von Ausbreitungseffekten in der Erdatmosphäre verursacht werden (bei  $1\mu m$  Infrarot-Wellenlänge liefert das 2.4 m Hubble-Weltraumteleskop 0.11 Bogensekunden Auflösung, mittel Laser-Stern und adaptiver Optik bei den 8.2 m ESO VLT Spiegeln liegt die Grenze bei 0.03") oder (iii) teleskopbedingte Gründe haben. Eine Variation in der Anzahldichte von Hintergrundquellen rund um ein gleichförmiges Objekt kann (i) aufgrund des Verstärkungseffektes sein, (ii) könnte aber ebenso der ungleichmäßigen Photometrie zugeschrieben werden. Als wesentliche Forderung müssen somit potentiellen systematischen Eigenschaften auf einem Niveau weit unterhalb der erwarteten WL-Effekte kontrolliert werden.

**Linsengleichung** Die Linsengleichung setzt die wahre Position der Quelle in Relation zur beobachteten Position, Abb. A.6 zeigt die definierten Quell- und Linsen-Ebenen senkrecht zur optischen Achse,  $\eta$  ist die 2D Position der Quelle in der Quellebene. Die geometrischen Zusammenhänge ergeben sich über die Winkel-Durchmesser Distanz zu

$$\eta = \frac{D_s}{D_d} \zeta - D_{ds} \alpha(\zeta), \quad (\text{A.2})$$

nach Einführung von Winkelkoordinaten durch  $\eta = D_s \beta$  und  $\zeta = D_d \theta$  transformiert sich Gl. A.2 zu

$$\beta = \theta - \frac{D_{ds}}{D_s} \alpha(D_d \theta) \equiv \theta - \alpha(\theta), \quad (\text{A.3})$$

der skalierte Ablenkwinkel ist dabei definiert durch  $\alpha(\theta)$ . Die Interpretation der Linsengleichung A.3 sagt aus, daß eine Quelle mit der wahren Beobachter-Position  $\beta$  in Winkel-Position  $\theta$  gefunden wird. Hat die Linsengleichung A.3 für fixes  $\beta$  mehr als eine Lösung, dann kommt es für dieses  $\beta$  zu mehreren Positionen  $\theta$ , d. h. die Linse erzeugt mehrfache Abbildungen. Dieser starke Gravitationslinsen-Effekt ist quantifiziert durch die dimensionslose Oberflächen-Massendichte  $\kappa(\theta) = \sum(D_d \theta) / \sum_{cr}$  mit  $\sum_{cr} = c^2 / (4\pi G) \times D_s / (D_d D_{ds})$  der kritischen Oberflächen-Massendichte und abhängig von der Rotverschiebung von Quelle und Linse ( $\sum_{cr}$  ist der charakteristische Wert um zwischen starken und schwachen Linsen zu

unterscheiden). Die Relation  $\kappa \geq 1$  ist hinreichend aber nicht unbedingt notwendig um mehrere Abbildungen zu erzeugen, in Termen von  $\kappa$  ergibt sich der skalierte Ablenk Winkel zu

$$\alpha(\theta) = \frac{1}{\pi} \int_{R^2} d^2\theta' \kappa(\theta') \frac{\theta - \theta'}{|\theta - \theta'|^2}, \quad (\text{A.4})$$

d. h. Gl. A.4 beinhaltet, daß  $\alpha(\theta)$  als Gradient eines Ablenkpentials geschrieben werden kann,

$$\psi(\theta) = \frac{1}{\pi} \int_{R^2} d^2\theta' \kappa(\theta') \ln |\theta - \theta'|, \quad (\text{A.5})$$

mit  $\alpha = \nabla\psi$ . Das Potential ist das 2D-Analogon zum Newton'schen Gravitations-Potential und erfüllt die Poissongleichung  $\nabla^2\psi(\theta) = 2\kappa(\theta)$ .

**Verzerrung und Verstärkung** Die Lösung  $\theta$  der Linsengleichung liefert die Winkel-Position des Bildes der Quelle bei  $\beta$ . Die Form des Bildes ist unterschiedlich zu der Form des Quellbildes, Grund ist die differentielle Ablenkung der Lichtbündel. Am auffälligsten ist diese Verzerrung durch das Auftreten von großen leuchtenden Bögen bei Galaxienhaufen. Ganz allgemein muß die Form des Bildes durch Lösung der Linsengleichung für alle Punkte einer ausgedehnten Quelle bestimmt werden. Liouville's Theorem zusammen mit Abwesenheit von Emission und Absorption der Photonen bei gravitativer Lichtablenkung impliziert die Erhaltung der Oberflächen-Helligkeit (spezifische Intensität). Ist  $I^{(s)}(\beta)$  die Verteilung der Oberflächen-Helligkeit in der Quellebene ergibt sich die beobachtete Verteilung der Oberflächen-Helligkeit in der Linsenebene zu  $I(\theta) = I^{(s)}[\beta(\theta)]$ . Ist die Quelle wesentlich kleiner als die Winkelskala auf der sich die Linseneigenschaften ändern, dann kann die Linsenabbildung lokal linearisiert werden. Die Verzerrung des Bildes ist dann durch die Jakobimatrix gegeben

$$A(\theta) = \frac{d\beta}{d\theta} = \delta_{ij} - \frac{d^2\psi(\theta)}{d\theta_i d\theta_j} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.6})$$

dabei wurden die Komponenten der Scherung  $\gamma \equiv \gamma_1 + i\gamma_2 = |\gamma|e^{2i\psi}$ ,  $\gamma_1 = (\psi_{,11} - \psi_{,22})/2$ ,  $\gamma_2 = \psi_{,12}$  eingeführt,  $\kappa$  steht in Beziehung zu  $\psi$  mittels Poissongleichung. Ist somit  $\theta_0$  ein Punkt des Bildes, korrespondierend mit dem Punkt  $\beta_0 = \beta(\theta_0)$  innerhalb der Quelle, ergibt sich unter Verwendung der lokal linearisierten Linsengleichung  $I(\theta) = I^{(s)}[\beta_0 + A(\theta_0) \cdot (\theta - \theta_0)]$ . Gemäß dieser Gleichung sind Bilder einer kreisförmigen Quelle Ellipsen. Das Verhältnis der Halbachsen solcher Ellipsen zum Radius der Quelle ist gegeben durch die Inverse der Eigenwerte von  $A(\theta_0)$ , somit  $1 - \kappa \pm |\gamma|$ , und das Verhältnis der Winkel gegenüber Bild und Quelle ist die Inverse der Determinante von  $A$ . Die beobachteten Flüsse des Bildes und der Quelle sind gegeben als Integral über die Helligkeitsverteilungen  $I(\theta)$  und  $I^{(s)}(\beta)$ , deren Verhältnis ist die Verstärkung  $\mu(\theta_0)$ . Von Gl. A.6 erhält man

$$\mu = \frac{1}{\det(A)} = \frac{1}{(1 - \kappa)^2 - |\gamma|^2}. \quad (\text{A.7})$$

Die Bilder sind somit in Form und Größe verändert. Die Verzerrung in der Form ist aufgrund des gravitativen Gezeitenfeldes, beschrieben durch die Scherung  $\gamma$ , die Verstärkung hat als Ursache sowohl die isotrope Fokussierung durch die lokale Massendichte  $\kappa$  als auch anisotrope Fokussierung durch die Scherung. Nachdem die Scherung als spurfreier Teil der symmetrischen Jakobimatrix  $A$  definiert ist hat sie zwei unabhängige Komponenten, weiters existiert eine 1-zu-1 Abbildung von symmetrischen spurfreien  $2 \times 2$  Matrizen auf die komplexen Zahlen. Die Scherung transformiert sich unter Rotation des Koordinatensystems mit  $e^{2i\varphi}$ , sie ist somit kein Vektor. Gleichung A.5 impliziert, daß die komplexe Scherung geschrieben werden kann als

$$\gamma(\theta) = \frac{1}{\pi} \int_{R^2} d^2\theta' D(\theta - \theta') \kappa(\theta') \quad (\text{A.8})$$

mit  $D(\theta) \equiv (\theta_2^2 - \theta_1^2 - 2i\theta_1\theta_2)/|\theta|^4 = -1/(\theta_1 - i\theta_2)^2$ . Punkte auf der Linsenebene mit singulärer Jakobimatrix  $A$ , d. h.  $\det(A) = 0$ , formen geschlossene ("kritische") Kurven, die Bildkurven in der Quellebene

heißen Kaustiken. Die Gezeitenkomponente des gravitativen Feldes verzerrt die Formen der Galaxien-Bilder, die Verstärkung im Zusammenhang mit gravitativer Lichtablenkung verändert die scheinbare Helligkeit. Die Oberflächen-Helligkeit bei gravitativer Lichtablenkung bleibt erhalten, die Verstärkung vergrößert das Bild der Galaxie bei fixierter Oberflächen-Helligkeit. Die reduzierte Scherung

$$g(\theta) \equiv \frac{\gamma(\theta)}{1 - \kappa(\theta)}, \quad (\text{A.9})$$

oder Funktionen davon, sind die einzigen Größen die durch Messung der Elliptizität zugänglich sind. Man erkennt es unmittelbar wenn  $A$  geschrieben wird als

$$A = (1 - \kappa) \begin{pmatrix} 1 - g_1 & -g_2 \\ -g_2 & 1 + g_1 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.10})$$

der Vorfaktor  $(1 - \kappa)$  beeinflusst nur die Größe und nicht die Form des Bildes. Eine mögliche Polarisation des Lichts der fernen Galaxien (oder schwachen Radio-Galaxien) eröffnet einen weiteren, unterschiedlichen Zugang zur Scherung. Die Orientierung der Polarisation ist unverändert bei Lichtablenkung durch schwache Felder, gravitative Scherung dreht das geometrische Bild, nicht aber die Polarisation der Galaxie.

Verstärkung kann sowohl einen Anstieg als auch einen Abfall der Anzahl der lokalen Galaxiendichte verursachen, abhängig von der Form der linsenfrenen Anzahl-dichte-Funktion. Diese Änderung in der Anzahl-dichte wird Vergrößerungs-Bias ("magnification bias") genannt, zugleich ein wichtiger Effekt bei der gravitativen Lichtablenkung von Quasaren QSOs. Die Verstärkung ermöglicht somit die Beobachtung von lichtschwachen Quellen, bei Bereichen hoher Verstärkungen wird die Rotverschiebungs-Verteilungsfunktion verändert.

Sowohl die Anzahl- als auch die Größen-Messung (bei fixer Oberflächen-Helligkeit) erfordert exakte Photometrie, diese ist von geringerer Stellung bei Messung der Scherung. Generell sind die Bilder verrauscht aufgrund der endlichen Anzahl von Photonen pro Pixel. Eine weitere Schwierigkeit für die Bestimmung der lokalen Scherung ist das atmosphärische "Seeing", siehe ebenfalls Seite 160. Aufgrund atmosphärischer Turbulenz ergibt sich aus einer Punktquelle auf der Aufnahme ein ausgedehntes Bild, die Quelle ist verschmiert. Mathematisch kann dies durch eine Faltung beschrieben werden. Wenn  $I(\theta)$  die Oberflächen-Helligkeit vor dem passieren der Erdatmosphäre ist, dann ergibt sich die beobachtete Helligkeits-Verteilung  $I^{(obs)}(\theta)$  zu

$$I^{(obs)}(\theta) = \int d^2\delta I(\delta)P(\theta - \delta), \quad (\text{A.11})$$

mit  $P(\theta)$  der "point spread function" (PSF), sie beschreibt die Helligkeits-Verteilung einer Punktquelle auf dem CCD. Die PSF inkludiert nicht nur Effekte der Erdatmosphäre, sondern ebenfalls Fehler des Teleskops, z. B. Windlast und der CCDs selbst. Die PSF hat damit ein leicht anisotropes Verhalten, somit hat "Seeing" zwei wichtige Auswirkungen auf die beobachteten Elliptizitäten: (i) Die Abbildungen werden runder, (ii) die Anisotropie der PSF erzeugt systematische, unechte Elliptizitäten. Die PSF kann direkt vom CCD bestimmt werden wenn eine Anzahl von isolierten Sternen identifiziert werden kann. Die Scherung der Sterne – sie fungieren als Punktquellen – widerspiegelt die PSF.

**Lineare Inversion von Scherungskarten** Gleichung A.8 zeigt, daß sich die Scherung  $\gamma$  aus einer Faltung der Oberflächen-Massendichte  $\kappa$  mit dem Kernel  $D$  ergibt. Dieser Zusammenhang kann durch Fouriertransformation invertiert werden, es ergibt sich die Oberflächen-Massendichte als lineares Funktional der Scherung. Kann somit die Scherung aus der Bildverzerrung bestimmt werden, dann ergibt sich somit direkt die Oberflächen-Massendichte. Als finales Ergebnis – d. h. die Massenrekonstruktions-Beziehung – erhält man

$$\kappa(\theta) - \kappa_0 = \frac{1}{\pi} \int_{R^2} d^2\theta' D^*(\theta - \theta')\gamma(\theta') = \frac{1}{\pi} \int_{R^2} d^2\theta' R[D^*(\theta - \theta')\gamma(\theta')], \quad (\text{A.12})$$

die Konstante  $\kappa_0$  in Gl. A.12 tritt auf, weil eine konstante Oberflächen-Massendichte keine Scherung verursacht und ist somit durch  $\gamma$  nicht festgelegt. Gl. A.12 kann angewandt werden für (i) den Fall daß alle Quellen gleiche Rotverschiebung  $z$  haben, dann sind  $\kappa$  und  $\gamma$  dimensionslose Oberflächen-Massendichten,

oder, (ii) wenn die Quellen in der Rotverschiebung verteilt sind, dann werden  $\kappa$  und  $\gamma$  interpretiert als Konvergenz und Scherung für eine hypothetische Quelle bei unendlicher Rotverschiebung. Im Falle einer schwachen Linse ( $\kappa \ll 1$ ,  $|\gamma| \ll 1$ ) ergibt sich die Scherungs-Karte direkt aus der Beobachtung. Die beschriebene Methode der Massenrekonstruktion ist eine direkte: Die lokal gemittelten beobachteten Elliptizitäten werden in die Inversions-Beziehung eingesetzt um die Massenkarte  $\kappa(\theta)$  zu erhalten. Vorteil ist Einfachkeit und die Geschwindigkeit in der Berechnung. Inverse Methoden eröffnen dazu eine Alternative: Angenommen die Massenverteilung eines Galaxienhaufens ist parametrisiert durch eine Anzahl an Modellparametern. Die Modellparameter werden variiert bis ein bester Fit für die Beobachtungen erzielt wird. Die erhaltene Massenverteilung hängt von der Parametrisierung ab, eine Nachteil zu parameterfreien Alternativen. Um ein "überfitten" des Rauschens zu vermeiden kann die Maximum-Likelihood Methode durch einen Regularisierungsterm ergänzt werden.

Technisch ist das Bild einer Galaxie ein statistisch signifikanter Fluß-Anstieg auf dem CCD der mehrere benachbarte Pixel betrifft. Das Faktum, daß die Linsenwirkung sensitiv in Bezug zur Rotverschiebung ist, ist nicht nur eine Quelle der Unsicherheit, es ermöglicht die Bestimmung der Verteilung von Galaxien die ansonsten zu lichtschwach sind um spektroskopisch untersucht zu werden.

### Anwendung gravitativer Lichtablenkung

Gravitative Lichtablenkung ist in der Zwischenzeit ein vielseitiges Werkzeug bei (i) Beobachtungen in der Kosmologie und (ii) Suche nach Exoplaneten, dafür gibt es mehrere Hauptgründe.

(1) Der Ablenkwinkel eines Lichtstrahls ist bestimmt durch des Gravitationsfeld der Materieverteilung entlang seines Pfades. Gemäß Einsteins ART (Seite 140 ff.) ist des Gravitationsfeld bestimmt durch den Energie-Impuls-Tensor  $T_{\mu\nu}$  der Materieverteilung. Für den astrophysikalisch wichtigsten Fall der nichtrelativistischen Materie ist  $T_{\mu\nu}$  allein charakterisiert durch die Dichteverteilung. Somit hängt das Gravitationsfeld und damit der Ablenkwinkel weder von der Natur der Materie noch von deren physikalischem Zustand ab. Lichtablenkung reagiert auf die Gesamtmateriedichte ohne Unterscheidung zwischen normaler "baryonischer" Materie und dunkler Materie (DM). Im Gegensatz zu anderen dynamischen Methoden zur Bestimmung des Gravitationsfeldes muß keine Annahme über den dynamischen Zustand der Materie getroffen werden. Linsensysteme messen nur die projizierte Masseverteilung entlang der Sichtverbindung, sie sind deshalb insensitiv zu Ausdehnung von Massenverteilungen entlang der Lichtstrahlen, so lange als diese Ausdehnung klein verglichen mit der Distanz zwischen Beobachter und Quelle zur ablenkenden Masse ist. Bleiben diese Bedingungen erhalten dann sind Massenbestimmungen über Linseneffekte nicht von Symmetrieanahmen abhängig.

(2) Sobald der Ablenkwinkel als Funktion des Impaktparameters gegeben ist reduzieren sich gravitative Linsensysteme auf einfache Geometrie, siehe Abb. A.6. Nachdem die meisten Systeme aus Quellen und Linsen bei hohen oder moderaten Rotverschiebungen  $z$  bestehen kann die Geometrie des Universums untersucht werden. Nachdem das Volumenelement pro Einheit Rotverschiebungs-Intervall und Einheit Raumwinkel ebenfalls von der Geometrie der Raumzeit abhängt, gilt gleiches für die Anzahl der Linsen darin. Infolgedessen ist die Wahrscheinlichkeit von Linsenereignissen für ferne Quellen abhängig von kosmologischen Parametern. Um Bedingungen für kosmologische Modelle mit dieser Methode ableiten zu können benötigt man die Evolution der Linsenpopulationen mit der Rotverschiebung.

(3) Bei der Suche nach Exoplaneten ist (i) Mikrolensing die einzige Methode um "free-floating" Planeten zu entdecken, weiteres werden aktuell die (ii) Transitmethode, (iii) Doppler-Spektroskopie, (iv) direkte Detektion (mehrere mögliche Typen von Koronografen), (v) Astrometrie (speziell mit ESA's Gaia Mission; als Nebenbezug in Verbindung mit dem Hubble Teleskop siehe [Jefferys, 1999]; Heinrich Karl Eichhorn, 1927 – 1999) und Kombinationen davon verwendet.

**Theorie zur Gravitationslinse** Breitet sich der Lichtstrahl fern ab des starken Gravitationsfeldes eines Schwarzen Lochs aus, d. h. der Impaktparameter  $\zeta$  ist wesentlich größer als der Schwarzschild-Radius  $R_s$ , somit  $\zeta \gg R_s = 2GM/c^2$ , dann liefert die ART einen Ablenkwinkel  $\alpha$  von

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2\zeta}. \quad (\text{A.13})$$

Gemäß der Ungleichung  $\zeta \gg R_s$  ergibt sich ein extrem kleiner Ablenkwinkel  $\alpha \ll 1$ . In schwachen Gravitationsfeldern bei Punktmassen ist  $\alpha$  die vektorielle Summe aller Ablenkungen der individuellen Linsen. Bei einer 3D Massenverteilung mit Dichte  $\rho(\vec{r})$ , Zellgröße  $dV$ , Masse  $dm = \rho(\vec{r})dV$  und Beschreibung der Trajektorie mit  $(\zeta_1(\lambda), \zeta_2(\lambda), r_3(\lambda))$  – die Koordinaten wurden so gewählt, daß der einfallende Lichtstrahl fern der ablenkenden Masse sich entlang  $r_3$  ausbreitet – kann der geringe Ablenkwinkel in der Nähe der Ablenkmasse als gerade Linie betrachtet werden, d. h.  $\zeta(\lambda) = \zeta$  (zudem ist  $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2)$  ein 2D Vektor) und ist somit unabhängig vom affinen Parameter  $\lambda$  (Born'sche Näherung). Der Impaktvektor des Lichtstrahls relativ zum Massenelement  $dm$  bei  $\vec{r} = (\zeta_1, \zeta_2, r_3)$  ist dann  $\zeta - \zeta'$ , unabhängig von  $r_3$ , der 2D Gesamtablenkwinkel ergibt sich zu

$$\alpha(\zeta) = \frac{4G}{c^2} \sum dm(\zeta_1', \zeta_2', r_3') \frac{\zeta - \zeta'}{|\zeta - \zeta'|^2} = \frac{4G}{c^2} \int d^2\zeta' \int dr_3' \rho(\zeta_1', \zeta_2', r_3') \frac{\zeta - \zeta'}{|\zeta - \zeta'|^2}. \quad (\text{A.14})$$

Nachdem dieser Faktor unabhängig von  $r_3'$  ist kann die  $r_3'$ -Integration durchgeführt werden, es ergibt sich eine Oberflächen-Massendichte  $\Sigma(\zeta) = \int dr_3' \rho(\zeta_1, \zeta_2, r_3)$ , sie ist die projizierte Massendichte auf eine Ebene senkrecht zum einfallenden Lichtstrahl. Der Ablenkwinkel ergibt sich damit zu

$$\alpha(\zeta) = \frac{4G}{c^2} \int d^2\zeta' \Sigma(\zeta') \frac{\zeta - \zeta'}{|\zeta - \zeta'|^2}. \quad (\text{A.15})$$

Dieser Ausdruck ist gültig solange die Abweichung des realen Lichtstrahls von der geraden (nicht-abgelenkten) Linie innerhalb der Massenverteilung klein ist verglichen mit der Skala auf der die Massenverteilung massiv ablenkt. Diese Bedingung ist praktisch unter allen astrophysikalischen Bedingungen gegeben, besonders beim Lensing durch Galaxien und Galaxienhaufen. Eine Ausnahme stellt kosmische Scherung dar, in diesem Fall erstreckt sich die Ablenkmasse in signifikantem Maße zwischen Quelle und Beobachter. Weiters sind in Linsensituationen die einfallenden Lichtstrahlen nicht parallel, es ergibt sich ein Öffnungswinkel der in etwa gleich dem der Winkelausdehnung der Ablenkmasse ist. Dieser Betrag ist typischerweise bei Galaxienhaufen in der Größenordnung von 1 Bogenminute,  $\sim 2.9 \times 10^{-4}$ , also sehr gering.

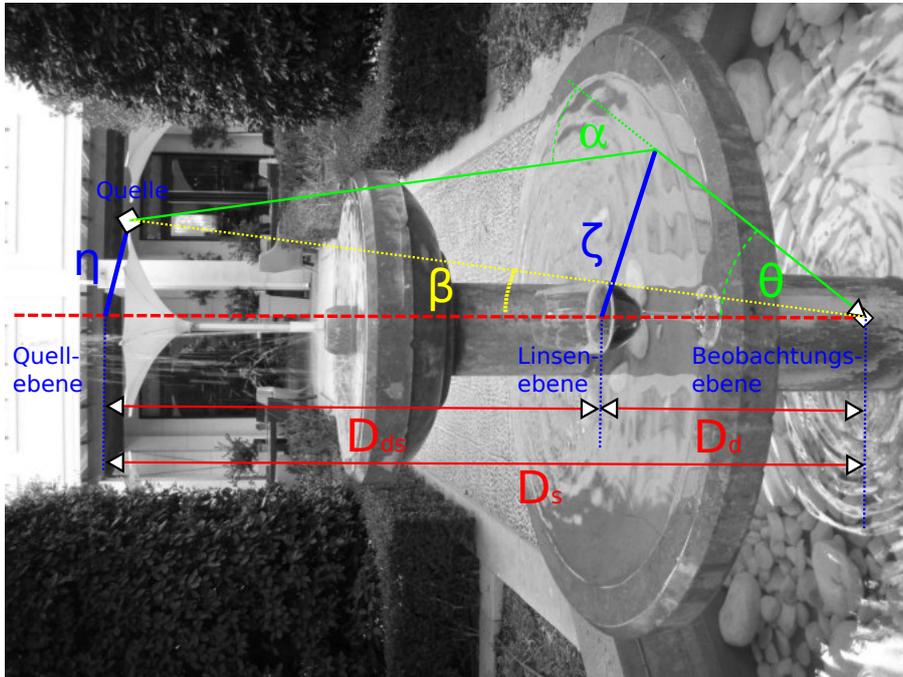


Abbildung A.6: Gravitationslinsen-System.

### Standardmodell der Kosmologie

Das Standardmodell besteht aus (i) der Beschreibung für den kosmologischen Hintergrund, er ist homogen und isotrop in den Feldgleichungen der ART und (ii) aus einer Theorie zur Strukturbildung. Das (i) Hintergrund-Modell wird beschrieben durch die Robertson-Walker Metrik, darin sind Hyperflächen für konstante Zeit homogene und isotrope 3D Räume, entweder flach oder gekrümmt, mit Veränderungen in der Zeit gemäß dem Skalenfaktor  $a(t)$ , er allein ist zeitabhängig. Die Dynamik des Skalenfaktors ist bestimmt durch zwei Gleichungen, erhalten aus den Einstein'schen Feldgleichungen und einer hochsymmetrischen Form der Metrik. Aktuelle Theorien (ii) der Strukturbildung nehmen an, daß Wachstum von Strukturen durch gravitative Instabilitäten von inertialen "Kern"-Störungen verursacht wird.

**Friedmann-Lemaître kosmologische Modelle, Metrik** Zwei Postulate sind fundamental für das Standardmodell der Kosmologie. (i) *Bei Mittelung über ausreichend große Skalen existiert eine mittlere Bewegung von Strahlung und Materie im Universum zu dem alle gemittelten observablen Eigenschaften isotrop sind.* (ii) *Alle fundamentalen Beobachter, d. h. vorstellbare Beobachter die dieser mittleren Bewegung folgen, nehmen die selbe Historie des Universums wahr, d. h. die selben gemittelten observablen Eigenschaften, vorausgesetzt sie haben ihre Uhren entsprechend gesetzt.* Solch ein Universum bezeichnet man als homogen für den Beobachter.

Die ART beschreibt die Raumzeit als vierdimensionale Mannigfaltigkeit deren metrischer Tensor  $g_{\alpha\beta}$  als dynamisches Feld betrachtet wird. Die Dynamik der Metrik wird bestimmt durch die Einstein'schen Feldgleichungen, sie setzen den Einstein-Tensor in Relation zum Energie-Impuls-Tensor der enthaltenen Materie in der Raumzeit. Zwei Ereignisse in der Raumzeit mit Koordinatenunterschied  $dx^\alpha$  sind separiert um  $ds$ , mit  $ds^2 = g_{\alpha\beta}dx^\alpha dx^\beta$ . Griechische Indizes gehen von  $\{0, 1, 2, 3\}$ , lateinische über die räumlichen Indizes  $\{1, 2, 3\}$ . Die Eigenzeit (proper time) eines Beobachters der  $ds$  zurücklegt ändert sich um  $c^{-1}ds$ . Die zwei Postulate von vorhin schränken die erlaubte Form des metrischen Tensors beträchtlich ein. Räumliche Koordinaten die für fundamentale Beobachter konstant sind werden als mitbewegte (comoving) Koordinaten bezeichnet. In diesen Koordinaten ist die mittlere Bewegung beschrieben durch  $dx^i = 0$ , somit gilt  $ds^2 = g_{00}dt^2$ . Wenn man fordert, daß die Eigenzeit des fundamentalen Beobachters gleich der kosmischen Zeit sein soll, impliziert das  $g_{00} = c^2$ . Isotropie verlangt, daß die Uhren synchronisiert werden können, die Raum-Zeit Komponenten des metrischen Tensors verschwinden,  $g_{0i} = 0$ . Wäre das unmöglich würden die Komponenten  $g_{0i}$  eine bestimmte Richtung in der Raumzeit festlegen und die Forderung der Isotropie verletzen. Die Metrik kann somit geschrieben werden als

$$ds^2 = c^2 dt^2 + g_{ij} dx^i dx^j, \quad (\text{A.16})$$

mit  $g_{ij}$  der Metrik der räumlichen Hyperflächen. Um Isotropie nicht zu verletzen, kann die räumliche Metrik mit einem Skalenfaktor  $a(t)$  nur isotrop kontrahiert oder expandiert werden, dieser ist nur eine Funktion der Zeit, ansonsten wäre die Expansion unterschiedlich für verschiedene Orte und die Homogenität wäre verletzt. Somit vereinfacht sich die Metrik weiter zu

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2, \quad (\text{A.17})$$

mit  $dl$  als Linienelement des homogenen und isotropen dreidimensionalen Raumes  $\mathbb{R}^3$ . Ein spezieller Fall von A.17 ist die Minkowski Metrik, für sie ist  $dl$  das Euklidische Linienelement und  $a(t)$  ist konstant. Homogenität impliziert ebenfalls, daß alle Gleichungen die Materie des Universums beschreiben, z. B. Dichte und Druck, nur Funktionen der Zeit allein sein können.

Die räumlichen Hyperflächen deren Geometrie beschrieben wird durch  $dl^2$  können entweder flach oder gekrümmt sein. Isotropie verlangt nur, daß sie sphärisch symmetrisch sind, d. h. räumliche Flächen mit konstantem Abstand von einem beliebigen Punkt sind zwei Sphären. Homogenität erlaubt die Wahl von beliebigen Punkten als Koordinatenursprung. Durch die Einführung von zwei Winkeln  $\theta, \phi$  sind Positionen auf der Einheitssphäre rund um den Ursprung eindeutig festgelegt, die radiale Koordinate ist  $w$ . Die allgemeinste zulässige Form des räumlichen Linienelementes ist dann

$$dl^2 = dw^2 + f_K^2(w)(d\phi^2 + \sin^2 \theta d\theta^2) = dw^2 + f_K^2(w) d\omega^2. \quad (\text{A.18})$$

Homogenität bedingt, daß die radiale Funktion  $f_K(w)$  entweder eine trigonometrische, lineare oder hyperbolische Funktion von  $w$  ist, abhängig ob die Krümmung  $K$  positiv, null, oder negativ ist.

$$f_K = \begin{cases} K^{-1/2} \sin(K^{1/2}w) & \text{für } K > 0 \\ w & \dots \quad K = 0 \\ (-K)^{-1/2} \sinh((-K)^{1/2}w) & \dots \quad K < 0 \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

Der Ausdruck  $f_K(w)$  und somit  $|K|^{-1/2}$  hat die Dimension einer Länge. Definiert man den Radius  $r$  der zwei Sphären durch  $f_K(w) = r$  bekommt die Metrik  $dl^2$  eine alternative Form

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\omega^2. \quad (\text{A.20})$$

**Rotverschiebung** Aufgrund der Expansion des Raumes werden Photonen rotverschoben wenn sie von der Quelle zum Beobachter propagieren. Nachdem für Licht  $ds = 0$  gilt, ist für einen rückwärts gerichteten Lichtstrahl die Ausbreitung von der Metrik  $|cdt| = adw$ . Die Rotverschiebung  $z$  ist definiert als die relative Änderung der Wellenlänge, oder mit  $1 + z = \lambda_0 \lambda_e^{-1}$  gelangt man zu

$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t_e)}. \quad (\text{A.21})$$

Das Licht ist also rotverschoben um den Betrag um den sich das Universum zwischen Emission und Beobachtung ausgedehnt hat.

**Expansion** Um die Beschreibung der Raumzeit zu vervollständigen benötigt man die zeitliche Abhängigkeit der Skalenfunktion  $a(t)$  und eine Beschreibung der Krümmung  $K$  in bezug zur Materie, welche die Raumzeit füllt - die Frage also nach der Dynamik der Raumzeit. Die Einstein'schen Feldgleichungen setzen den Einstein Tensor  $G_{\alpha\beta}$  mit dem Energie-Impuls-Tensor  $T_{\alpha\beta}$  der Materie in Beziehung

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta}. \quad (\text{A.22})$$

Der zweite Term proportional zum metrischen Tensor  $g_{\alpha\beta}$  ist eine Verallgemeinerung, eingeführt von Einstein, um statische kosmologische Lösungen der Feldgleichungen zu ermöglichen.  $\Lambda$  wird als kosmologische Konstante bezeichnet. Für die hochsymmetrische Form der Metrik gegeben durch A.17 und A.18 implizieren die Einstein'schen Gleichungen, daß  $T_{\alpha\beta}$  die Form eines Energie-Impuls-Tensors eines idealen, homogenen Fluids haben muß, charakterisiert durch seine Dichte  $\rho(t)$  und Druck  $p(t)$ . Materiedichte und Druck können aufgrund der Homogenität nur zeitabhängig sein. Die Feldgleichungen vereinfachen sich zu zwei unabhängigen Gleichungen:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (\text{A.23})$$

und

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4}{3}\pi G \left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}. \quad (\text{A.24})$$

Der Skalenfaktor  $a(t)$  ist festgelegt sobald ein Wert an einem bestimmten Zeitpunkt fixiert wird. Man wählt  $a = 1$  für den gegenwärtigen Zeitraum  $t_0$ . Gl. A.23 wird bezeichnet als Friedmann'sche Gleichung (Alexander Alexandrowitsch Friedmann, 1888 – 1925). Kombiniert man die Gleichungen A.23 und A.24 erhält man die adiabatische Gleichung

$$\frac{d}{dt}[a^3(t)\rho(t)c^2] + p(t)\frac{da^3(t)}{dt} = 0, \quad (\text{A.25})$$

mit ihrer intuitiven Interpretation. Der erste Term  $a^3\rho$  ist proportional zur enthaltenen Energie in einem fixen mitbewegten Volumen, die Gleichung sagt aus, daß die Änderung der "internen" Energie gleich dem

Druck mal der Änderung des Eigenvolumens ist. Somit ist Gl. A.25 das erste thermodynamische Gesetz ( $dE = -pdV$ ) im kosmologischen Zusammenhang. Eine Form der Metrik gegeben durch die Gleichungen A.17 bis A.19 wird als Robertson-Walker Metrik bezeichnet. Wenn der Skalenfaktor  $a(t)$  der Friedmann'schen Gleichung A.23 und der adiabatischen Gleichung A.25 folgt, wird die Metrik als Friedmann Lemaître Robertson Walker (FLRW) Metrik bezeichnet, oder in Kurzform Friedmann-Lemaître Metrik. Gleichung A.24 kann, abgesehen vom Druckterm in A.24 und der kosmologischen Konstante, ebenfalls aus der Newton'schen Theorie der Gravitation gewonnen werden. Anders als bei Newtons Theorie wirkt in der ART der Druck als Quelle von Gravitation.

**Parameter** Die relative Expansionsrate  $\dot{a}a^{-1} = H$  wird als Hubble Parameter bezeichnet, im gegenwärtigen Zeitraum  $t = t_0$  ist der Wert die Hubble Konstante,  $H(t_0) = H_0$ . Sie hat die Dimension einer inversen Zeit. Der Wert von  $H_0$  ist selbst nachwievor unsicher, aktuelle Messungen (siehe ebenfalls [Planck Collaboration et al., 2016]) fallen in den Bereich  $H_0 = (50 - 80) \sim 70 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$  und die Unsicherheit in  $H_0$  wird für gewöhnlich ausgedrückt als  $H_0 = 100h \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$  mit  $h = (0.5 - 0.8) \sim 0.7$  dem dimensionslosen Hubble Parameter. Somit gilt  $H_0 \equiv 3.2 \times 10^{-18} h \text{ s}^{-1} \equiv 1.0 \times 10^{-10} h \text{ yr}^{-1}$ . Die Zeitskala für die Expansion des Universums ist die inverse Hubble Konstante,  $H_0^{-1} \equiv 10^{10} h^{-1} \text{ yr}$ . Die Kombination

$$\frac{3H_0^2}{8\pi G} \equiv \rho_{cr} = 1.88 \times 10^{-29} h^2 \text{ gcm}^{-3} = 8.10 \times 10^{-47} h^2 \text{ GeV}^4 \quad (\text{A.26})$$

ist die kritische Dichte des Universums und die Dichte  $\rho_0$  in Einheiten von  $\rho_{cr}$  ist der Dichteparameter  $\Omega_0$ ,

$$\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{cr}}. \quad (\text{A.27})$$

In einem Universum mit positiver Krümmung gilt  $\Omega_0 \equiv \rho(t_0)/\rho_{cr} > 1$ , in einem mit negativer  $\Omega_0 < 1$ . Der aktuelle Wert des Krümmungsradius beträgt  $R_{curv} \equiv a/\sqrt{k}$ , er steht in Bezug zu  $\Omega_0$  und  $H_0$  durch  $R_{curv} = H_0^{-1}/\sqrt{|\Omega_0 - 1|}$  und die charakteristische Skala  $H_0^{-1} \sim 3000h^{-1} \text{ Mpc}$  ist der Hubbleradius. Messungen der CMB zeigen ein nahezu räumlich flaches Universum mit  $k = 0$ . Der Verzögerungsparameter  $q_0$  ist definiert durch

$$q_0 \equiv -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} = -\frac{\ddot{a}}{aH^2} = \frac{1}{2} \sum_i \Omega_i(z)[1 + 3w_i(z)] \quad (\text{A.28})$$

zum Zeitpunkt  $t = t_0$ .

**Materie Modelle** Das Universum besteht nach der Inflation aus 3 markanten Epochen, nämlich einer (i) strahlungs-  $z \gtrsim 3000$ , (ii) materie-  $3000 \gtrsim z \gtrsim 0.5$  und (iii) Dunkle Energie  $z \lesssim 0.5$  dominierten Zeitspanne. Zur vollständigen Beschreibung der Expansion des Universums benötigt man die Zustandsgleichung  $p = p(\rho)$ , den Zusammenhang von Druck und Energiedichte der Materie. Gewöhnliche Materie, in diesem Zusammenhang häufig als Staub bezeichnet, hat  $p \ll \rho c^2$ , während  $p = \rho c^2/3$  für Strahlung und andere Arten von relativistischer Materie gilt. Setzt man diese Beziehungen in die adiabatische Gleichung A.25 ein, erhält man

$$\rho(t) = a^{-n}(t)\rho_0 \quad (\text{A.29})$$

mit

$$n = \begin{cases} 3 & \text{für Staub, } p = 0, \\ 4 & \text{für relativistische Materie, } p = \rho c^2/3. \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

Die Energiedichte relativistischer Materie fällt somit stärker mit der Zeit als diejenige der normalen Materie.

**Relativistische Materiekomponenten** Aktuell gibt es zwei klar ersichtliche Kandidaten für relativistische Materie, nämlich Photonen und Neutrinos. Die enthaltene Energiedichte der Photonen ist bestimmt durch die momentane Temperatur der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (cosmic microwave background, CMB),  $T_{CMB} = 2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$ . Nachdem die CMB hervorragend mit dem Spektrum eines schwarzen Körpers (Friedrich Hasenöhr, 1874 – 1915, untersuchte bereits 1904 den Zusammenhang zwischen Strahlungsenergie und träger Masse; zu seinen Studenten zählten u.a. Hans Thirring, Erwin

Schrödinger, 1887 – 1961 (in diesem Bereich erwähnt sei sein Buch "Was ist Leben?", gemäß Schrödinger verbunden mit "negativer Entropie"; Systeme weit entfernt vom thermodyn. Gleichgewicht führen nicht nur zu Turbulenz sondern auch zu Struktur, bzw. Leben; heute aktuell im Bereich des Fluktuationstheorems; Muster können zeitabhängig und unregelmäßig sein, z. B. bei Schneeflocken resp. H<sub>2</sub>O-Molekülen 6-eckig), Philipp Frank 1884 – 1966, Richard von Mises 1883 – 1953, Ludwig Flamm, 1885 – 1964, Karl Ferdinand Herzfeld, 1892 – 1978, Friedrich Kottler, 1886 – 1965) übereinstimmt ist ihre Energiedichte durch das Stefan-Boltzmann Gesetz (Jožef Štefan, 1835 – 1893 und Ludwig Boltzmann, 1844 – 1906)

$$\rho_{\text{CMB}} = \frac{1}{c^2} \frac{\pi^2}{15} \frac{(kT_{\text{CMB}})^4}{(\hbar c)^3} \approx 4.5 \times 10^{-34} \text{ gcm}^{-3} \quad (\text{A.31})$$

bestimmt. In Termen des kosmischen Dichteparameters  $\Omega_0$ , Gleichung A.27, ist die kosmische Dichte hervorgerufen durch den Photonen Hintergrund gegeben durch

$$\Omega_{\text{CMB},0} = 2.4 \times 10^{-5} h^{-2}. \quad (\text{A.32})$$

Ähnlich den Photonen wurden die Neutrinos im thermischen Gleichgewicht der heißen ersten Phase des Universums erzeugt. Durch die schwache Wechselwirkung entkoppelten sie vom kosmischen Plasma als die Temperatur des Universums  $kT \approx 1 \text{ MeV}$  betragen hat, danach war die Zeitskala von Leptonischen Interaktionen größer als die Zeitskala der Expansion des Universums, das Gleichgewicht konnte nicht länger aufrechterhalten werden. Als die Temperatur des Universums unter  $kT \approx 0.5 \text{ MeV}$  fiel, annihilierten Elektron-Positron Paare und erzeugten  $\gamma$ -Strahlung. Diese Paarvernichtung heizte die Photonen, nicht aber die bereits vorher entkoppelten Neutrinos. Somit ist die Neutrino Temperatur niedriger als die Photonen-temperatur um einen Faktor bestimmt durch Entropieerhaltung. Die Entropie  $S_e$  der Elektron-Positron Paare wurde gänzlich in die Entropie des Photonen Hintergrundes  $S_\nu$  gesteckt. Somit gilt

$$(S_e + S_\nu)_{t-} = (S_\nu)_{t+}, \quad (\text{A.33})$$

und  $t-$  (vorher),  $t+$  (nachher) bezieht sich auf die Annihilationszeit. Abgesehen von einigen konstanten Faktoren beträgt die Entropie pro Teilchenspezies  $S \propto gT^3$ , mit  $g$  dem statistischen Gewicht. Für Bosonen ist  $g = 1$  und für Fermionen  $g = 7/8$  pro Spinzustand. Vor der Annihilation erhält man  $g_{t-} = 4 \times 7/8 + 2 = 11/2$ , danach beträgt der Wert  $g = 2$  weil nur mehr Photonen verbleiben. Von Gleichung A.33 erhält man,

$$\left(\frac{T_{t+}}{T_{t-}}\right)^3 = \frac{11}{4}. \quad (\text{A.34})$$

Nach der Annihilation ist die Neutrino Temperatur um einen Faktor  $(11/4)^{1/3}$  kleiner als die Photonen-temperatur. Insbesondere ist die Neutrino Temperatur in der heutigen Epoche

$$T_{\nu,0} = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T_{\text{CMB},0} = 1.95 \text{ K}. \quad (\text{A.35})$$

Obwohl Neutrinos langezeit außerhalb des thermischen Gleichgewichtes standen blieb ihre Verteilungsfunktion seit ihrer Entkopplung unverändert, nur ihre Temperatur ist mit der kosmischen Expansion gefallen. Die Energiedichte berechnet sich mit der Fermi-Dirac Verteilung und einer Temperatur  $T_\nu$  und kann in einen kosmischen Dichteparameter, äquivalent wie bei den Photonen, umgewandelt werden. Als Ergebnis erhält man

$$\Omega_{\nu,0} = 2.8 \times 10^{-6} h^{-2} \quad (\text{A.36})$$

pro Neutrinoart.

Nimmt man drei verschiedene Neutrinoarten an ergibt sich der gesamtrelativistische Dichteparameter in der heutigen Epoche zu

$$\Omega_{R,0} = \Omega_{\text{CMB},0} + 3 \times \Omega_{\nu,0} = 3.2 \times 10^{-5} h^{-2}. \quad (\text{A.37})$$

Nachdem heute die Energiedichte der relativistischen Materie nahezu fünf Größenordnungen unter der Energiedichte der normalen Materie liegt, wenn  $\Omega_0$  in der Größe von eins sich bewegt, ist die Expansion

des Universums in unserer Epoche materiedominiert, oder  $\rho = a^{-3}(t)\rho_0$ . Die Energiedichten von normaler und relativistischer Materie waren gleich als der Skalenfaktor  $a(t)$

$$a_{eq} = \frac{\Omega_{R,0}}{\Omega_0} = 3.2 \times 10^{-5} \Omega_0^{-1} h^{-2} \quad (\text{A.38})$$

betragen hat und die Expansion war strahlungsdominiert, oder  $\rho = a^{-4}\rho_0$ . Diese Zeitspanne der Gleichheit von Materie- und Strahlungsdichte ist für die Evolution von Struktur im Universum von entscheidender Bedeutung.

**Räumliche Krümmung und Expansion** Mit den zuvor definierten Parametern kann die Friedmann'sche Gleichung A.23 geschrieben werden

$$H^2(t) = H_0^2 [a^{-4}(t)\Omega_{R,0} + a^{-3}(t)\Omega_0 - a^{-2}(t)\frac{Kc^2}{H_0^2} + \Omega_\Lambda]. \quad (\text{A.39})$$

Nachdem  $H(t_0) \equiv H_0$  und  $\Omega_{R,0} \ll \Omega_0$  gilt, impliziert Gleichung A.39

$$K = \left(\frac{H_0}{c}\right)^2 (\Omega_0 + \Omega_\Lambda - 1) \quad (\text{A.40})$$

und Gl. A.39 wird zu

$$H^2(t) = H_0^2 [a^{-4}(t)\Omega_{R,0} + a^{-3}(t)\Omega_0 - a^{-2}(t)(1 - \Omega_0 - \Omega_\Lambda) + \Omega_\Lambda]. \quad (\text{A.41})$$

Die Krümmung der räumlichen Hyperflächen ist deshalb bestimmt durch die Summe der einzelnen Dichtebeiträge von Materie,  $\Omega_0$ , und von der kosmologischen Konstante,  $\Omega_\Lambda$ . Wenn  $\Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$  ist, dann ist der Raum flach, entsprechend geschlossen oder hyperbolisch wenn  $\Omega_0 + \Omega_\Lambda$  größer oder kleiner als eins ist. Die räumlichen Hyperflächen eines Universums mit kleiner Dichte sind deshalb hyperbolisch, diejenigen bei hoher Dichte des Universums geschlossen, siehe Gleichung A.19. Ein Friedmann-Lemaître Universum ist somit durch vier Parameter charakterisiert: Der Expansion in unserer Epoche (die Hubble Konstante)  $H_0$ , die Dichteparameter von Materie  $\Omega_0$ , Strahlung  $\Omega_{R,0}$  und der kosmologischen Konstante  $\Omega_\Lambda$ . Dividiert man Gleichung A.24 durch Gleichung A.23 unter Verwendung von A.40 und Vernachlässigung des Druckes  $p = 0$ , dann erhält man den Verzögerungsparameter  $q_0$

$$q_0 = \frac{\Omega_0}{2} - \Omega_\Lambda. \quad (\text{A.42})$$

Das Alter des Universums kann aus Gleichung A.41 bestimmt werden. Nachdem  $dt = da\dot{a}^{-1} = da(aH)^{-1}$  gilt, erhält man, unter Vernachlässigung von  $\Omega_{R,0}$ ,

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \int_0^1 da [a^{-1}\Omega_0 + (1 - \Omega_0 - \Omega_\Lambda) + a^2\Omega_\Lambda]^{-1/2}. \quad (\text{A.43})$$

Es wurde in dieser Gleichung angenommen, daß  $p = 0$  für alle Zeiten  $t$  gilt, Druck ist aber am Anfang nicht vernachlässigbar. Der damit einhergehende Fehler ist allerdings minimal, weil das Universum nur sehr kurze Zeit in der strahlungsdominierten Phase mit  $p > 0$  verbringt. Grundsätzlich kann  $\Omega_\Lambda$  jedes Vorzeichen haben. Die Beschränkung gilt allerdings auf ein nichtnegatives  $\Omega_\Lambda$  weil die kosmologische Konstante für gewöhnlich als die Energiedichte des Vakuums interpretiert wird, diese ist positiv semi-definit.

Die zeitliche Evolution A.41 der Hubblefunktion  $H(t)$  ermöglicht die Bestimmung der Abhängigkeit von  $\Omega$  und  $\Omega_\Lambda$  von der Skalenfunktion  $a$ . Für ein materiedominiertes Universum erhält man

$$\Omega(a) = \frac{8\pi G}{3H^2(a)} \rho_0 a^{-3} = \frac{\Omega_0}{a + \Omega_0(1 - a) + \Omega_\Lambda(a^3 - a)}, \quad (\text{A.44})$$

$$\Omega_\Lambda(a) = \frac{\Lambda}{3H^2(a)} = \frac{\Omega_\Lambda a^3}{a + \Omega_0(1-a) + \Omega_\Lambda(a^3 - a)}. \quad (\text{A.45})$$

Diese Gleichungen zeigen, egal wie die Werte von  $\Omega_0$  und  $\Omega_\Lambda$  zur heutigen Zeit sind,  $\Omega(a) \rightarrow 1$  und  $\Omega_\Lambda \rightarrow 0$  für  $a \rightarrow 0$ . Damit ergibt sich, daß für entsprechend frühe Zeit alle materiedominierten Friedmann-Lemaître Modelluniversen durch Einstein-de Sitter Modelle beschrieben werden können, für sie gilt  $K = 0$  und  $\Omega_\Lambda = 0$ . Für  $a \ll 1$  ist die rechte Seite der Friedmann Gleichung A.41 bestimmt durch Materie- und Strahlungsterme, sie enthalten die stärksten Abhängigkeiten von  $a^{-1}$ . Die Hubblefunktion  $H(t)$  kann approximiert werden durch

$$H(t) = H_0[\Omega_{R,0}a^4(t) + \Omega_0a^3(t)]^{1/2}. \quad (\text{A.46})$$

Unter der Verwendung der Definition von  $a_{eq}$ , nämlich  $a_{eq}^{-4}\Omega_{R,0} \equiv a_{eq}^{-3}\Omega_0$ , kann Gleichung A.46 geschrieben werden als

$$H(t) = H_0\Omega_0^{1/2}a^{-3/2}\left(1 + \frac{a_{eq}}{a}\right)^{1/2}. \quad (\text{A.47})$$

Somit,

$$H(t) = H_0\Omega_0^{1/2}\begin{cases} a_{eq}^{1/2}a^{-2} & (a \ll a_{eq}), \\ a^{-3/2} & (a_{eq} \ll a \ll 1). \end{cases} \quad (\text{A.48})$$

Gleichermaßen reduziert sich der Ausdruck für die kosmische Zeit auf

$$t(a) = \frac{2}{3H_0}\Omega_0^{-1/2}[a^{3/2}(1 - 2\frac{a_{eq}}{a})(1 + \frac{a_{eq}}{a})^{1/2} + 2a_{eq}^{3/2}] \quad (\text{A.49})$$

oder

$$t(a) = \frac{1}{H_0}\Omega_0^{-1/2}\begin{cases} \frac{1}{2}a_{eq}^{-1/2}a^2 & (a \ll a_{eq}), \\ \frac{2}{3}a^{3/2} & (a_{eq} \ll a \ll 1). \end{cases} \quad (\text{A.50})$$

Gleichung A.47 wird als Einstein-de Sitter Limit der Friedmann'schen Gleichung bezeichnet. Wenn nicht anders erwähnt, werden nachfolgend nur mehr kosmische Epochen mit Zeiten wesentlich größer als  $t_{eq}$  betrachtet, d. h. wenn  $a \gg a_{eq}$ , das Universums ist dominiert durch Staub und der Druck kann vernachlässigt werden  $p = 0$ .

**Notwendigkeit eines Urknalls** Ausgehend von  $a = 1$  in der heutigen Zeit und Integration der Friedmann'schen Gleichung A.23 rückwärts in der Zeit zeigt, daß es Kombinationen der kosmischen Parameter gibt mit  $a > 0$  für alle Zeiten. Solche Modelle haben keinen Urknall. Die Notwendigkeit eines Urknalls wird für gewöhnlich gefolgert aus der Existenz der CMB, welche am plausibelsten erklärt wird durch eine frühe heiße Phase des Universums. In der Tat werden durch die Fakten (i) kosmologische Objekte mit Rotverschiebung  $z > 4$  und (ii) kosmischer Dichteparameter der nichtrelativistischen Materie, abgeleitet von Galaxien und Galaxienhaufen mit  $\Omega_0 > 0.02$ , Modelle mit  $a(t) > 0$  für alle Zeiten ausgeschlossen. Deshalb muß, wenn man das Universum im großen durch Friedmann-Lemaître Modelle beschreiben will, ein Urknall angenommen werden, oder  $a = 0$  zu einem Zeitpunkt in der Vergangenheit. Der bereits mehrfach erwähnte Abbé Georges Edouard Lemaître (1894 – 1966) war nicht nur ein Protagonist eines Urknalls (superdichter Ursprungs-Atomkern), er lieferte auch die Interpretation der Rotverschiebung als Expansion (in drei Phasen: Verzögerung, Stagnation, beschleunigte Expansion) des Raumes und erkannte die Wichtigkeit der kosmologischen Konstante. Die Änderung in der Hubble-Expansion wird als Rotverschiebungs-Drift bezeichnet.

**Entfernungen, Distanzen** Die Bedeutung von "Entfernung" ist in gekrümmter Raumzeit nicht mehr eindeutig. Im Gegensatz zur Situation im Euklidischen Raum führen Definitionen von Entfernungen im Sinne von unterschiedlichen Meßanordnungen zu unterschiedlichen Entfernungen. Distanzen sind deshalb als Relationen zwischen meßbaren Größen definiert, analog zum Euklidischen Raum. In Verwendung sind vier verschiedene Skalen, (i) die Eigendistanz (proper distance), (ii) die mitbewegte Entfernung (comoving distance), (iii) die Winkel-Durchmesser Entfernung (angular-diameter distance) und (iv) die Leuchtkraft Entfernung (luminosity distance). Entfernungsmessungen setzen den Emissions- und einen Beobachtungsevent auf zwei separate geodätische Linien, welche auf einen gemeinsamen Lichtkegel fallen, entweder

den vorwärtigen Lichtkegel der Quelle oder den rückwärtigen Lichtkegel des Beobachters, in Beziehung. Sie sind deshalb charakterisiert durch die Zeiten  $t_2$  und  $t_1$  von Emission und Beobachtung und von der Struktur des Lichtkegels. Diese Zeiten können eindeutig ausgedrückt werden durch die Werte  $a_2 = a(t_2)$  und  $a_1 = a(t_1)$  des Skalenfaktors, oder durch die Rotverschiebungen  $z_2$  und  $z_1$  entsprechend  $a_2$  und  $a_1$ . Für gewöhnlich wird die zweite Parametrisierung verwendet weil Rotverschiebungen direkt meßbar sind. Ebenfalls wird angenommen, daß der Beobachter sich im Ursprung des Koordinatensystems befindet. Die Eigendistanz  $D_{prop}(z_1, z_2)$  ist die Entfernung gemessen durch die Laufzeit von einem Lichtstrahl von einer Quelle  $z_2$  zu einem Beobachter bei  $z_1 < z_2$ . Es ergibt sich

$$D_{prop}(z_1, z_2) = \frac{c}{H_0} \int_{a(z_2)}^{a(z_1)} [a^{-1}\Omega_0 + (1 - \Omega_0 - \Omega_\Lambda) + a^2\Omega_\Lambda]^{-1/2} da. \quad (\text{A.51})$$

Die mitbewegte Entfernung  $D_{com}(z_1, z_2)$  ist die Distanz auf einer räumlichen Hyperfläche  $t = t_0$  zwischen den Weltlinien einer Quelle und eines Beobachters mitbewegt mit der kosmischen Strömung. Somit gilt

$$D_{com}(z_1, z_2) = \frac{c}{H_0} \int_{a(z_2)}^{a(z_1)} [a\Omega_0 + a^2(1 - \Omega_0 - \Omega_\Lambda) + a^4\Omega_\Lambda]^{-1/2} da = w(z_1, z_2). \quad (\text{A.52})$$

Die Winkel-Durchmesser Distanz  $D_{ang}(z_1, z_2)$  ist definiert in Analogie zum Euklidischen Raum zwischen physischem Querschnitt  $\delta A$  eines Objektes bei  $z_2$  und dem Raumwinkel  $\delta\omega$  entgegengesetzt für einen Beobachter bei  $z_1$ ,  $\delta\omega D_{ang}^2 = \delta A$ . Somit gilt,

$$D_{ang}(z_1, z_2) = \left( \frac{\delta A}{\delta\omega} \right)^{1/2} = a(z_2) f_K[w(z_1, z_2)] = a(z_2) f_K[D_{com}(z_1, z_2)]. \quad (\text{A.53})$$

Die Leuchtkraft-Entfernung  $D_{lum}(z_1, z_2)$  ist definiert durch die Relation im Euklidischen Raum zwischen der Leuchtkraft  $L$  eines Objektes bei  $z_2$  und dem gemessenen Fluß beim Beobachter  $z_1$ . Sie steht in Bezug zur Winkel-Durchmesser Distanz durch die Relation

$$D_{lum}(z_1, z_2) = \left( \frac{a(z_1)}{a(z_2)} \right)^2 D_{ang}(z_1, z_2) = \frac{a(z_1)^2}{a(z_2)} f_K[D_{com}(z_1, z_2)]. \quad (\text{A.54})$$

Die Entfernung ist größer für niedrige kosmische Dichten und höhere kosmologische Konstanten, der Unterschied bei großen Rotverschiebungen  $z$  ist beträchtlich. Für kleine Rotverschiebungen,  $z \ll 1$ , folgen alle Definitionen dem Hubblegesetz  $v = H_0 D$  (die Fluchtgeschwindigkeit wächst mit der Distanz; G. Lemaître und Edwin Powell Hubble, 1889 – 1953; Entdeckung / spektroskopische Messungen von Radialgeschwindigkeiten an Spiral-”Nebeln” durch Vesto Melvin Slipher, 1875 – 1969, beginnend ab 1912 am Lowell Observatorium), mit der linearen Beziehung zwischen Rotverschiebung und Geschwindigkeit ( $v = cz$ ) ergibt sich

$$D = \frac{cz}{H_0} + O(z^2). \quad (\text{A.55})$$

**Einstein-de Sitter Modell** Um einige Resultate von vorhin darzustellen kann eine Spezialisierung zu einem Modelluniversum mit einer kritischen Dichte an Staub,  $\Omega_0 = 1$ ,  $p = 0$  und keiner kosmologischen Konstante  $\Omega_\Lambda = 0$  erfolgen. Die Friedmann’sche Gleichung reduziert sich auf  $H(t) = H_0 a^{-3/2}$ , das Alter des Universums wird  $t_0 = 2(3H_0)^{-1}$ . Die 4 Distanzen ergeben sich zu

$$D_{prop}(z_1, z_2) = \frac{2c}{3H_0} [(1 + z_1)^{-3/2} - (1 + z_2)^{-3/2}], \quad (\text{A.56})$$

$$D_{com}(z_1, z_2) = \frac{2c}{H_0} [(1 + z_1)^{-1/2} - (1 + z_2)^{-1/2}], \quad (\text{A.57})$$

$$D_{ang}(z_1, z_2) = \frac{2c}{H_0} \frac{1}{1 + z_2} [(1 + z_1)^{-1/2} - (1 + z_2)^{-1/2}], \quad (\text{A.58})$$

$$D_{lum}(z_1, z_2) = \frac{2c}{H_0} \frac{1 + z_2}{(1 + z_1)^2} [(1 + z_1)^{-1/2} - (1 + z_2)^{-1/2}]. \quad (\text{A.59})$$

**Dichtestörungen** Das Standardmodell der Strukturbildung im Universum nimmt an, daß kleine initiale Fluktuationen am Anfang, d. h. zu sehr früher Zeit im Universum, bestehen und diese durch gravitative Instabilitäten wachsen. Solange relative Dichtekontraste der Fluktuationen in der Materie kleiner als eins sind, können sie als geringe Störungen vor der ansonsten homogenen und isotropen Hintergrunddichte betrachtet werden, d. h. lineare Störungstheorie reicht zur Beschreibung aus.

**Horizontgröße** Die Größe von kausal verbundenen Gebieten im Universum wird als Horizont (horizon size) bezeichnet. Er ist bestimmt durch die Distanz die ein Photon in der Zeit  $t$  seit dem Urknall zurücklegen kann. Die geeignete Zeitskala ist gegeben durch den inversen Hubble-Parameter  $H^{-1}(a)$ , die Horizontgröße ist  $d'_H = cH^{-1}$  und die mitbewegte Horizontgröße

$$d_H = \frac{c}{aH(a)} = \frac{c}{H_0} \Omega_0^{-1/2} a^{1/2} \left(1 + \frac{a_{eq}}{a}\right)^{-1/2}, \quad (\text{A.60})$$

mit dem eingefügten Einstein - de Sitter Limit A.47 der Friedmann'schen Gleichung. Die Länge  $cH_0^{-1} = 3h^{-1}$  Gpc wird als Hubble Radius bezeichnet. Die Horizontgröße bei  $a_{eq}$  spielt eine wichtige Rolle bei der Strukturbildung. Setzt man  $a = a_{eq}$  in Gleichung A.60 ein erhält man

$$d_H(a_{eq}) = \frac{c}{\sqrt{2}H_0} \Omega_0^{-1/2} a_{eq}^{1/2} \approx 12(\Omega_0 h^2)^{-1} \text{ Mpc}, \quad (\text{A.61})$$

dabei wurde  $a_{eq}$  von A.38 eingefügt.

**Lineares Wachstum von Dichtestörungen** Unter Anwendung der üblichen Sichtweise ist die Dichte des Universums dominiert durch schwach-wechselwirkende Dunkle Materie zu späten Zeiten, relevant für den schwachen Gravitationslinseneffekt,  $a \gg a_{eq}$ . Störungen der Dunklen Materie sind charakterisiert durch den Dichtekontrast

$$\delta(\vec{x}, a) = \frac{\rho(\vec{x}, a) - \langle \rho(a) \rangle}{\langle \rho(a) \rangle}, \quad (\text{A.62})$$

mit  $\langle \rho(a) \rangle = \rho_0 a^{-3}$  der mittleren kosmischen Dichte. Relativistische und nicht-relativistische Störungstheorie zeigt, daß lineare Dichtefluktuationen, d. h. Störungen mit  $\delta \ll 1$ , wachsen wie

$$\delta(a) \propto a^{n-2} = \begin{cases} a^2 & \text{vor } a_{eq}, \\ a & \text{nach } a_{eq}, \end{cases} \quad (\text{A.63})$$

solange als das Einstein - de Sitter Limit seine Gültigkeit behält. Zu späteren Zeiten, d. h.  $a \gg a_{eq}$ , wenn das Einstein - de Sitter Limit nicht mehr zutrifft, wenn  $\Omega_0 \neq 1$  oder  $\Omega_\Lambda \neq 0$  ist, wird das lineare Wachstum der Dichtestörungen verändert gemäß

$$\delta(a) = \delta_0 a \frac{g'(a)}{g'(1)} \equiv \delta_0 a g(a), \quad (\text{A.64})$$

mit  $\delta_0$  als linearer Dichtekontrast extrapoliert zur heutigen Zeitspanne und einer dichteabhängigen Wachstumsfunktion  $g'(a)$  exakt bestimmt durch

$$g'(a; \Omega_0, \Omega_\Lambda) = \frac{5}{2} \Omega(a) \left[ \Omega^{4/7}(a) - \Omega_\Lambda(a) + \left( \frac{1 + \Omega(a)}{2} \right) \left( \frac{1 + \Omega_\Lambda}{70} \right) \right]^{-1}. \quad (\text{A.65})$$

Die Abhängigkeit von  $\Omega$  und  $\Omega_\Lambda$  vom Skalenfaktor  $a$  ist gegeben durch die Gleichungen A.44, A.45. Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund zeigt relative Temperatur Fluktuationen in der Größenordnung  $10^{-5}$  auf großen Skalen. Streng nach dem Sachs-Wolfe Effekt reflektieren diese Fluktuationen in der Temperatur Dichtefluktuationen in der gleichen Größenordnung. Der kosmische Mikrowellen-Hintergrund hat den Ursprung bei  $a \approx 10^{-3} \gg a_{eq}$ , lange nachdem das Universum materiedominiert wurde. Gleichung A.63 beinhaltet, daß aktuelle Dichtefluktuationen, erwartet von Fluktuationen in der Temperatur bei  $a \approx 10^{-3}$ , nur einen Betrag von  $10^{-2}$  erreichen sollten. Hingegen werden Strukturen, z. B. Galaxien, beobachtet mit

$\delta \gg 1$ . Diese Diskrepanz kann dahingehend interpretiert werden, daß die CMB nur Fluktuationen der baryonischen Materie widerspiegelt. Wenn eine zusätzliche Materiekomponente mit schwacher Kopplung vorhanden wäre, dann würden Fluktuationen in dieser Komponente wachsen sobald die Entkopplung vom kosmischen Plasma stattfindet, lange bevor Photonen von Baryonen entkoppeln und die CMB freisetzen. Solche Fluktuationen könnten leicht die heutigen großen Amplituden erreichen und gleichzeitig die offensichtliche Diskrepanz zwischen Amplituden der Temperaturfluktuation in der CMB und vorhandenen kosmischen Strukturen erklären. Das ist eines der stärksten Argumente für die Existenz einer Dunklen Materie Komponente im Universum, ein direkter Nachweis, z. B. mit Flüssig-Xenon Detektoren (sensitiv im Bereich  $\sim 10 - 100$  GeV), konnte bis dato allerdings nicht erbracht werden.

**Unterdrückung von Strukturwachstum** Es ist zweckmäßig den Dichtekontrast  $\delta$  in Fouriermoden zu zerlegen. In linearer Störungstheorie entwickeln sich individuelle Fourierkomponenten unabhängig voneinander. Eine Störung der (mitbewegten) Wellenlänge  $\lambda$  "betritt den Horizont" wenn  $\lambda = d_H(a)$ . Wenn  $\lambda < d_H(a_{eq})$  betritt die Störung den Horizont und Strahlung ist noch immer dominierend in der Expansion. Bis  $a_{eq}$ , die Zeitskala der Expansion beträgt  $t_{exp} = H^{-1}$ , ist bestimmt durch die Strahlungsdichte  $\rho_R$ , welche kleiner als die Zeitskala des Kollapses der Dunklen Materie  $t_{DM}$  ist:

$$t_{exp} \sim (G\rho_R)^{-1/2} < (G\rho_{DM})^{-1/2} \sim t_{DM}. \quad (\text{A.66})$$

Anders ausgedrückt, die rasche strahlungsgetriebene Expansion verhindert den Kollaps von Störungen in der Dunklen Materie. Licht kann nur Gebiete durchqueren die kleiner als der Horizont sind. Die Unterdrückung von Wachstum aufgrund von Strahlung ist deshalb beschränkt auf Skalen kleiner als der Horizont, großräumige Störungen sind davon unbetroffen. Das erklärt warum die Horizontgröße bei  $a_{eq}$ ,  $d_H(a_{eq})$ , eine wichtige Skala für das Wachstum von Strukturen setzt. Wenn  $k = \lambda^{-1}$  die Wellenzahl der Störung und  $k_0 = d_H^{-1}(a_{eq})$  die Wellenzahl entsprechend der Horizontgröße bei  $a_{eq}$  ist dann kann der Abschwächungsfaktor geschrieben werden als

$$f_{sup} = \left(\frac{k_0}{k}\right)^2, \quad (\text{A.67})$$

und von Gleichung A.61 ergibt sich  $k_0$  in den (inversen) Längeneinheiten Mpc oder Hubbleradius

$$k_0 = 1/12(\Omega_0 h^2) \text{ Mpc}^{-1} \approx 250(\Omega_0 h) \text{ Hubbleradii}^{-1}. \quad (\text{A.68})$$

**Dichte Leistungsspektrum** Die angenommenen Gauß'schen Dichtefluktuationen  $\delta(\vec{x})$  an der mitbewegten Position ( $\vec{x}$ ) können vollständig durch ihr Leistungsspektrum  $P_\delta(k)$  charakterisiert werden, es ist definiert durch

$$\langle \hat{\delta}(\vec{k}) \hat{\delta}^*(\vec{k}') \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta_D(\vec{k} - \vec{k}') P_\delta(k), \quad (\text{A.69})$$

mit  $\hat{\delta}(\vec{k})$  als Fouriertransformation von  $\delta$ , der Stern symbolisiert komplexe Konjugation. Genaugenommen ist Fourierzerlegung nur gültig im flachen Raum. Jedoch ist zu frühen Zeiten in allen kosmologischen Modellen der Raum flach, zu späten Zeiten ist die interessante Skala  $k^{-1}$  der Dichtestörungen wesentlich kleiner als der Krümmungsradius des Universums. Fourierzerlegung kann demnach in diesem Zusammenhang angewendet werden. Ein skalen-invariantes Spektrum bezeichnet man als Harrison-Zel'dovich Spektrum. Kombiniert man das mit der Unterdrückung von kleinskaligen Moden A.67, dann erhält man

$$P_\delta(k) \propto \begin{cases} k & \text{für } k \ll k_0, \\ k^{-3} & \text{für } k \gg k_0. \end{cases} \quad (\text{A.70})$$

Eine zusätzliche Komplikation tritt auf, wenn Dunkle Materie aus Teilchen mit Geschwindigkeiten vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit bestehen würde. Um sie gravitativ gebunden zu halten, muß eine gravitative Störung eine gewisse minimale Masse haben, oder äquivalent eine gewisse minimale Größe. Alle Störungen kleiner als diese Größe werden weggedämpft durch freiströmende Teilchen. Folglich hat das Dichtestörungs-Spektrum von solchen Teilchen einen exponentiellen Grenzbereich (cut-off) bei großem  $k$ . Dies erklärt die Unterteilung zwischen heißer und kalter Dunkler Materie. Heiße Dunkle Materie (HDM) besteht aus schnellen Teilchen die kleinräumige Störungen weggedämpft, bei kalter Dunkler Materie (CDM) sind Teilchen langsam genug um signifikante Dämpfung zu verhindern.

**Normierung des Leistungsspektrums** Abgesehen von der Form des Leistungsspektrums muß ebenfalls die Normierung festgelegt werden. Mehrere Methoden sind dazu verfügbar, für gewöhnlich erhält man unterschiedliche Resultate. (i) Normierung durch Mikrowellen-Hintergrund Anisotropien: Zusätzlich messen CMB Fluktuationen die Amplitude von Skalar- und Tensorstörungsmoden, das Wachstum von Dichtefluktuationen ist ausschließlich bestimmt durch die fluktuierende Amplitude der Skalarmoden. (ii) Normierung durch lokale Varianz von Galaxienzählungen: Bei Galaxien wird angenommen, daß sie ideale Marker der zugrundeliegenden DM Fluktuationen sind. (iii) Normierung durch lokale Anzahl von Galaxienhaufen: Galaxienhaufen formen sich durch gravitative Instabilitäten von DM Dichtestörungen. Nachdem gravitative Lichtablenkung durch großräumige Strukturen im allgemeinen sensitiv auf Skalen vergleichbar mit  $k_0^{-1} \sim 12(\Omega_0 h^2)$  Mpc ist, erscheint die Normierung mittels Galaxienhaufen die bevorzugte Methode für Anwendungen beim schwachen Gravitationslinseneffekt.

**Nichtlineare Evolution** Zu späteren Zeiten im Zuge der Evolution und auf kleinen Skalen beginnt das Wachstum der Dichtefluktuationen vom linearen Verhalten gemäß Gleichung A.64 abzuweichen. Dichtefluktuationen wachsen nichtlinear und Fluktuationen unterschiedlicher Größe interagieren. Es zeigt sich, daß die nichtlineare Evolution der Dichtefluktuationen wesentlich ist um genaue Berechnungen von schwachen Gravitationslinseneffekten bei großräumigen Strukturen durchführen zu können. Nichtlineare Evolution der Dichtefluktuationen sind nicht mehr alleine vollständig bestimmt durch das Leistungsspektrum, es entwickeln sich dann nicht-gauß'sche Eigenschaften.

**Poisson'sche Gleichung** Lokale Dichtestörungen, welche wesentlich kleiner als der Horizont sind und deren Pekuliar-Geschwindigkeiten relativ zur mittleren Bewegung im Universum wesentlich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind, können durch die Newton'sche Gravitation beschrieben werden. Ihr Gravitationspotential folgt der Poisson'schen Gleichung

$$\nabla_r^2 \Phi' = 4\pi G \rho, \quad (\text{A.71})$$

mit  $\rho = (1 + \delta)\langle\rho\rangle$  der Gesamtdichte der Materie und  $\Phi'$  ist die Summe der Potentiale des glatten Hintergrundes  $\langle\Phi\rangle$  und dem Potential der Störung  $\Phi$ . Der Gradient  $\nabla_r$  wirkt mit bezug auf physikalische, oder Eigenkoordinaten. Nachdem die Poisson'sche Gleichung linear ist kann der Anteil des Hintergrundes  $\nabla_r^2 \langle\Phi\rangle = 4\pi G \langle\rho\rangle$  aufgrund des Superpositionsprinzips subtrahiert werden. Führt man den Gradienten mit bezug auf die mitbewegten Koordinaten  $\nabla_x = a \nabla_r$  ein, kann Gl. A.71 in der Form

$$\nabla_x^2 \Phi = 4\pi G a^2 \langle\rho\rangle \delta \quad (\text{A.72})$$

geschrieben werden. In der materiedominierten Epoche gilt  $\langle\rho\rangle = a^{-3}\langle\rho_0\rangle$ . Mit der kritischen Dichte A.26 kann die Poisson'sche Gleichung umgeschrieben werden in

$$\nabla_x^2 \Phi = \frac{3H_0^2}{2a} \Omega_0 \delta. \quad (\text{A.73})$$

**Relevante Eigenschaften von Linsen und Quellen** Eigenschaften und Eigenheiten von individuellen Objekten sind nicht notwendigerweise bekannt, stattdessen sind die Objekte statistisch zu spezifizieren.

**Galaxien** Galaxien können im weitesten Sinne in zwei Populationen gruppiert werden, (i) frühe- und (ii) späte Galaxientypen, oder entsprechend in (i) Elliptische und (ii) Spiralen. Massereiche Galaxien haben in der Größenordnung von  $10^{11} M_\odot$ , oder  $2 \times 10^{44}$  g innerhalb ihres sichtbaren Radius. Solche Galaxien haben Luminositäten im Bereich von  $10^{10}$  der solaren Luminosität. Die Kinematik von Sternen, Gas und Molekülwolken in Galaxien, festgestellt durch spektroskopische Methoden, zeigt, daß es eine Relation zwischen charakteristischen Geschwindigkeiten innerhalb der Galaxie und ihrer Luminosität gibt. Hellere Galaxien tendieren zu größeren Massen. Die Verteilung der differentiellen Luminosität von Galaxien kann sehr gut beschrieben werden durch die Funktion [Schechter, 1976]

$$\Phi(L) \frac{dL}{L_*} = \Phi_0 \left( \frac{L}{L_*} \right)^{-\nu} \exp \left( \frac{-L}{L_*} \right) \frac{dL}{L_*}, \quad (\text{A.74})$$

Die Parameter wurden gemessen mit  $\nu \approx 1.1$ ,  $L_* \approx 1.1 \times 10^{10} L_\odot$ ,  $\Phi_* \approx 1.5 \times 10^{-2} h^3 \text{Mpc}^{-3}$ . Diese Verteilung bedeutet, daß im wesentlichen eine scharfe Grenze in der Galaxienpopulation über Luminositäten  $\sim L_*$  existiert, der mittlere Abstand zwischen  $L_*$ -Galaxien ist in der Größenordnung von  $\sim \Phi_*^{-1/3} \approx 4h^{-1} \text{Mpc}$ . Sterne in elliptischen Galaxien haben stochastisch orientierte Orbits, im Gegensatz dazu haben die meisten Sterne in Spiralgalaxien annähernd koplanare Orbits mit der galaktischen Scheibe. Stellare Geschwindigkeiten sind deshalb charakterisiert durch die Geschwindigkeits-Dispersion  $\sigma_v$  in elliptischen Galaxien und durch die asymptotische zirkulare Geschwindigkeit  $v_c$  in Spiralen. Diese charakteristischen Geschwindigkeiten sind in Bezug zur Luminosität der Galaxien durch Gesetze der Form

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_{v,*}} = \left( \frac{L}{L_*} \right)^{1/\alpha} = \frac{v_c}{v_{c,*}}, \quad (\text{A.75})$$

mit  $\alpha$  im Wertebereich von 4 – 5 ( $v_c, \sigma_v \propto L^{1/4}$ ). Für {Spiralen / elliptische Galaxien} wird Gleichung A.75 als {Tully-Fisher / Faber-Jackson} Relation bezeichnet. Beide Geschwindigkeitsskalen  $\sigma_{v,*}$  und  $v_{c,*}$  sind in der Größe von  $220 \text{ kms}^{-1}$ . Nachdem  $v_c = \sqrt{2}\sigma_v$  gilt, sind elliptische Galaxien mit der gleichen Luminosität massereicher als Spiralgalaxien.

Von hoher Relevanz für den schwachen Gravitationslinseneffekt ist eine Population von lichtschwachen Galaxien mit blauverschobenen Spektren, sogenannte lichtschwache blaue Galaxien. Es sind in der Größenordnung 30 – 50 solcher Galaxien pro Quadrat-Bogenminute, sie können mit bodenbasierten Teleskopen erforscht werden, d. h. es sind  $\approx 20\text{k} - 40\text{k}$  solcher Galaxien auf einer Fläche des Vollmondes. Es ist dieses feinkörnige "Tapetenpapier" Muster am Himmel das viele Studien mittels WL ermöglicht. Es erlaubt die kohärenten Störungen von WL aufgedruckt in Bildern der lichtschwachen blauen Galaxien zu bestimmen. Aufgrund ihrer Lichtschwäche sind Rotverschiebungen dieser blauen Galaxien spektroskopisch schwer zu bestimmen. Die Verteilung in der Rotverschiebung der blauen Galaxien stimmt sehr gut mit der erwarteten, von einer nichtveränderlichen mitbewegten Anzahlichte, überein. Während die Galaxienzahl im blauen Licht wesentlich über denen der extrapolierten der lokalen Anzahl runter bis zu lichtschwachen Magnituden liegt, stimmen diese in den roten Spektralbändern ziemlich gut mit Extrapolationen von lokalen Anzahlichten überein. Weiters ist eine beträchtliche Evolution in der Luminositätsfunktion im blauen, die Luminositätsskala  $L_*$  vom Schechter Typ steigt mit der Rotverschiebung, die Luminositätsfunktion von Galaxien im roten zeigt wenig Anzeichen einer Evolution. Diese Erkenntnisse unterstützen die Sicht, daß die Evolution von Galaxien hin zu höherer Rotverschiebung ersichtlich im blauen Licht stattfindet, resultiert von verstärkter Aktivität in Sternentstehung in Populationen von Galaxien, welche, abgesehen davon, unverändert bleiben bis zu Rotverschiebungen von  $z \gtrsim 1$ . Die Verteilung der Rotverschiebung der lichtschwachen fernen Galaxien ist dann ausreichend genau beschrieben durch

$$p(z) = \frac{\beta}{z^3 \Gamma(3/\beta)} z^2 \exp[-(z/z_0)^\beta] dz. \quad (\text{A.76})$$

Dieser Ausdruck ist normalisiert zu  $0 \leq z < \infty$  und liefert einen guten Fit zur gemessenen Rotverschiebungsverteilung. Die mittlere Rotverschiebung  $\langle z \rangle$  ist proportional zu  $z_0$ , der Parameter  $\beta$  beschreibt die Steilheit des Abfalls über  $z_0$ . Für  $\beta = 1.5$ ,  $\langle z \rangle \approx 1.5z_0$ . Der Parameter  $z_0$  hängt ab von der Magnitudengrenze und der Farbselektion der Galaxienauswahl.

In erster Näherung haben Galaxien eine intrinsische elliptische Form und die Ellipsen sind wahllos orientiert. Diese intrinsische Elliptizität verursacht Rauschen im Gezeitenfeld der gemessenen Elliptizitäten. Um dieses Rauschen zu quantifizieren ist es wichtig zu wissen wie die intrinsische Verteilung der Elliptizitäten aussieht. Es sei  $|\epsilon|$  als die Elliptizität eines Galaxienbildes definiert, so daß für eine Ellipse mit den Achsen  $a$  und  $b < a$ ,

$$|\epsilon| \equiv \frac{a-b}{a+b} \quad (\text{A.77})$$

gilt. Ellipsen haben eine Orientierung, somit hat die Elliptizität zwei Komponenten  $\epsilon_{1,2}$ , mit  $|\epsilon| = (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{1/2}$ . Empirisch stellt sich heraus, daß eine Gauß'sche Verteilung eine gute Beschreibung liefert,

$$p_\epsilon(\epsilon_1, \epsilon_2) d\epsilon_1 d\epsilon_2 = \frac{\exp(-|\epsilon|^2/\sigma_\epsilon^2)}{\pi\sigma_\epsilon^2 [1 - \exp(-1/\sigma_\epsilon^2)]} d\epsilon_1 d\epsilon_2 \quad (\text{A.78})$$

mit einer charakteristischen Breite von  $\sigma_\epsilon \approx 0.2$ .

**Galaxienhaufen, Galaxiengruppen, Aktive Galaktische Kerne** Galaxienhaufen haben per definitionem eine größere Anzahl an Galaxien (bis zu  $\sim 1000$ ) gravitativ gebunden, die Galaxien an sich liefern aber nur einen geringen Beitrag zur Gesamtmasse. Ein beträchtlicher Anteil – in etwa 80 % – ist Dunkle Materie, 10 % ist diffuses, röntgen-emittierendes, intergalaktisches Gas (thermische Bremsstrahlung, "free-free radiation") mit Leuchtkräften von  $10^{43} - 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ , Temperaturen im Bereich  $10^7 - 10^8 \text{ K}$  und einer Dichte von  $\sim 10^{-3} \text{ Teilchen/cm}^3$ . Die Haufenmasse kann unter der Annahme des hydrostatischen Gleichgewichtes des Gases und eines sphärischen symmetrischen Potentials der Gesamtmasse mit Hilfe der Röntgentemperatur und des Flußes ermittelt werden. Eine kompletäre Massenbestimmung erfolgt mit starken und schwachen Gravitationslinsen-Effekten, in diesem Fall ergibt sich die Gesamtmasse, d. h. sowohl dunkle als auch leuchtende Komponente, zudem ohne Annahme von Gleichgewichtsbedingungen oder Symmetrien (diese sind bei kinematischen Massenbestimmungen wiederum erforderlich; Pekuliargeschwindigkeiten bis zu 1000 km/s). Alle drei Methoden liefern ähnliche Ergebnisse, Gesamtmassen von Haufen liegen im Bereich  $5 \times 10^{14} M_{\odot}$ , die Größe beträgt 2 – 10 Mpc. Kleinere Objekte, sogenannte Galaxien-Gruppen, liegen bei  $10^{13} M_{\odot}$ .

Aktive galaktische Kerne (active galactic nuclei, AGN) bezeichnen Galaxien mit nicht-thermischer Strahlung in den Zentren, AGNs sind zudem keine homogene Klasse an Objekten. Eine Einteilung ergibt sich mit Quasaren, Quasi-stellaren Objekten (QSO), Seyfert Galaxien, BL Lacertae Objekten (BL Lacs) und Radiogalaxien. Zusätzlich zur hohen Rotverschiebung  $z$  ist die Anzahl an AGNs wichtig für Gravitations-Linsen Messungen. Helle QSOs mit B-Band Magnituden  $B \lesssim 19$  liefern eine differentielle Anzahl  $n(S) \propto S^{-(\alpha+1)}$ , mit  $n(S)dS$  der Dichte an QSOs pro Raumwinkel und Fluß  $dS$  von  $S$ , der Exponent beträgt  $\alpha \sim 2.6$ . Die Evolution von Galaxienhaufen ist im nachfolgenden Kapitel A.1.3 detailliert dargelegt.

### A.1.3 Kosmische Evolution mit Galaxienhaufen

Die aktuell erfolgreichsten kosmologischen Modelle betrachten Strukturbildung als hierarchischen Prozeß in dem Gravitation ständig Bereiche von Materie anhäuft und somit kontinuierlich größere Strukturen entstehen. Galaxienhaufen sind momentan die massivsten Objekte die unter dem Einfluß ihrer eigenen Gravitation kollabiert sind und bilden damit die relative junge Spitze dieser Hierarchie. Grundlegende Darstellungen und Überlegungen in diesem Kapitel basiert auf [Voit, 2005], zugleich eine wissenschaftliche Basis der Demon-Röntgeneinheit [Berciano Alba et al., 2006].

Die Milchstraße befindet sich im Laniakea Superhaufen (Durchmesser  $\sim 160 \times 10^6 \text{ pc}$ , gleich  $520 \times 10^6$  Lichtjahre; Masse  $10^{17} M_{\odot}$ ), errechnet aus Messungen der Eigengeschwindigkeiten der Galaxien, und ist umgeben von den Shapley und Perseus-Pisces Superhaufen. Zwei Eigenschaften von Haufen prädestinieren sie als Marker für die kosmische Evolution. (i) Erstens, Galaxienhaufen sind die größten Objekte deren Masse zuverlässig bestimmt werden kann. Ihre gravitative Relaxation ist meist nahe dem viralen Gleichgewicht. Die Massenbestimmung von nahen Haufen kann deshalb verwendet werden um die Struktur des Universums auf Skalen  $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$  zu bestimmen. Der Vergleich von heutigen Massenverteilungen von Clustern mit Verteilungen aus vergangenen Epochen kann deshalb verwendet werden um die Rate an Strukturbildung zu bestimmen. (ii) Zweitens, Galaxienhaufen sind im wesentlichen "abgeschlossene Systeme" die ihre Fraktion an Gas in der Materie beibehalten, trotz des enormen Energieeintrages verbunden mit Supernovae ( $\sim 1$  pro 100 Jahre in Galaxien wie der Milchstraße; SN 2014J in M82 ist eine der erdnächsten SNIa in jüngster Vergangenheit) und aktiven galaktischen Kernen. Der Grund liegt im tiefen Gravitationspotential-Topf bei Haufen. Die baryonische Komponente von Haufen enthält damit reichhaltige Information bezüglich Prozessen verbunden mit Galaxienbildung, miteingeschlossen die Physik im Zusammenhang der Kondensation von Baryonen in Sterne und der resultierenden Rückkopplung auf die Galaxienbildung. Der nachfolgende Abschnitt untersucht den theoretischen Zusammenhang sowohl von Dunkler Materie als auch der baryonischen Komponente in Galaxienhaufen und liefert den Kontext für die Interpretation von aktuellen (i) Röntgenbeobachtungen, (ii) optischen Erfassungen und (iii) induzierten Störungen von Haufen auf das Spektrum der CMB.

#### Einführung

Eine Fülle an kosmologischen Beobachtungen untermauert ein spezifisches Modell für die generelle Architektur des beobachtbaren Universums und der Entwicklung von Galaxien und anderen Strukturen darin

(Seite 64). Gemäß diesem Konkordanz-Modell ist die Geometrie des beobachtbaren Universums ununterscheidbar von einer flachen Geometrie. Damit impliziert man gleichzeitig, daß die Gesamtenergie-Dichte sehr nahe der kritischen Dichte sein muß.

Es scheint, daß die beiden dominierenden Komponenten des Universums nichtbaryonischer Natur sind. Dunkle Materie, ihre Gravitation ist maßgeblich für die Strukturbildung, sowie Dunkle Energie, ihr negativer Druck verursacht die beschleunigte Expansion des Universums. Die mittlere Dichte von baryonischer Materie ist  $\sim 15\%$  des gesamten Materieanteils. Die Beobachtung von baryonischer Materie ist nur möglich, weil die gravitative Anziehung von nichtbaryonischer Materie das Gas in tiefen Potentialtöpfen hält. Ein geringer Anteil davon kondensiert in Sterne und Galaxien.

Modelle mit Dunkler Materie liefern zuverlässig die räumliche Verteilung der Masse im Universum, bestimmt durch Galaxienverteilungen, sie erklären allerdings nicht die Details und Eigenschaften der Galaxien selbst. Dichtestörungen im Konkordanz-Modell haben größere Amplituden auf kleinen Skalen, kleine subgalaktische Objekte entkoppeln zuerst, kollabieren und viralisieren. Die Interaktion mit der dunklen Komponente ist rein gravitativ, baryonische Wechselwirkung ist zusätzlich bestimmt durch hydro- und thermodynamische Effekte.

### Beobachtete Eigenschaften von Galaxienhaufen

Haufen enthalten beträchtlich mehr Masse in der Form von heißem Gas, bestimmt durch dynamische Analyse oder/und Messungen mit Röntgen- und Mikrowellen-Instrumenten. Massen von Galaxienhaufen, gemessen mit den nachstehenden Techniken, reichen von  $10^{14} M_\odot$  bis mehr als  $10^{15} M_\odot$ , der überwiegende Anteil davon ist in dunkler Materie, emittiert also keine detektierbare Strahlung.

**Haufen im optischen Licht** Moderne Techniken zur Haufenbestimmung im optischen Bereich sind Erweiterungen und Verfeinerungen von Abell's (George Ogden Abell, 1927 – 1983) ursprünglichem Ansatz. Diese Verbesserungen sind notwendig weil der Kontrast von Haufen gegenüber dem Hintergrund an Galaxien mit zunehmender Entfernung stark abnimmt. Farbliche Eigenschaften von Galaxienhaufen helfen der Identifikation, viele Haufen sind aufgrund der geringen Rate an laufender Sternentstehung wesentlich röter als andere Galaxien bei ähnlicher Rotverschiebung  $z$ .

Abell's Kataloge enthalten diese Information durch Kategorisierung nach Anzahl an Galaxien (richness), entsprechend dem Nettoüberschuß an Galaxien heller als einem Magnitudenlimit zur Bestimmung aller Haufen. Führt man Annahmen bezüglich der Form der Leuchtkraft-Verteilungsfunktion ein, dann verbindet man die Anzahl direkter mit der Gesamtleuchtkraft von Haufen. Galaxienhaufen beinhalten allgemein die Leuchtkraft-Verteilungsfunktion entsprechend der Form [Schechter, 1976]. Die Anzahl der Galaxien im Leuchtkraftbereich  $dL$  um  $L$  ist proportional zu  $L^{-\alpha} \exp(-L/L_*)$  mit  $\alpha \approx 1$ , siehe Gl. A.74.

Nach Jan Hendrik Oort's (1900 – 1992) Folgerungen zur Dunklen Materie [Oort, 1932] war es Fritz Zwicky (1898 – 1974) der die Geschwindigkeitsdispersion eines Haufen gemessen hat [Zwicky, 1933]-[Zwicky, 1937], er fand  $\sigma_{1D} \sim 700$  km/s für das Coma System. Zwicky's Schlußfolgerung basiert auf dem Viralthorem der klassischen Mechanik, angewandt auf stationäre, gravitativ gebundene Systeme. Das Theorem erhält man durch zweifache Differentiation des Trägheitsmomentes  $I = \sum_i m_i r_i^2$  in Bezug auf die Zeit und Nullsetzen des Resultates,

$$\sum_i m_i \ddot{r}_i^2 = - \sum_i m_i \ddot{r}_i \cdot \vec{r}_i. \quad (\text{A.79})$$

Die linke Seite der Gleichung ist das doppelte der kinetischen Energie aller Teilchen des Haufens. In einem sphärischen symmetrischen System mit Masse  $M$  und Gauß'scher Geschwindigkeits-Verteilung ist diese kinetische Energie gleich  $3M\sigma_{1D}^2/2$ . Wenn das System abgeschlossen (isoliert) ist, dann ist die rechte Seite gleich dem Absolutbetrag der gravitativen potentiellen Energie, ausgedrückt durch  $GM^2/r_G$ , mit

$$r_G \equiv M^2 \left( \sum_i \sum_{i<j} \frac{m_i m_j}{r_{ij}} \right)^{-1} \approx \frac{\pi}{2} M^2 \left( \sum_i \sum_{i<j} \frac{m_i m_j}{r_{\perp,ij}} \right)^{-1} \quad (\text{A.80})$$

und  $r_{ij}$  dem Abstand zwischen den Teilchen  $i$  und  $j$ . Die Näherung ergibt  $r_G$  für das sphärisch symmetrische System ausgedrückt durch den projizierten Teilchenabstand  $r_{\perp,ij}$  in der Ebene der Beobachtung.

Entsprechend dem Viralthorem ergibt sich die Masse des sphärischen isolierten Haufens mit

$$M = 3 \frac{\sigma_{1D}^2 r_G}{G}. \quad (\text{A.81})$$

In Zwicky's Artikel über den Coma Haufen [Zwicky, 1937] wird ebenfalls die Möglichkeit der Massenbestimmung mittels gravitativer Lichtablenkung (historische Anmerkungen Seite 74) von Hintergrund-Galaxien erwähnt. Der Ablenkwinkel selbst hängt ab vom Gradienten des Gravitationspotentials im Linsensystem, d. h. eine Massenschale mit konstanter Flächendichte erzeugt keine Scherung und bleibt unentdeckt, siehe Kap. A.1.2.

**Galaxienhaufen im Röntgenbereich** Galaxienhaufen sind intensive Röntgenstrahler weil die Galaxienbildung im Haufen ein relativ ineffizienter Prozeß ist. Nur  $\sim 1/10$  der Baryonen im Universum befinden sich in den Sternen der Galaxien, die verbleibenden 90 % verteilen sich im intergalaktischen Raum. Die Mehrzahl dieser intergalaktischen Baryonen sind extrem schwierig zu beobachten, allerdings wird durch den tiefen Potentialtopf des Galaxienhaufens das baryonische Gas komprimiert und auf Temperaturen in den Röntgenbereich erhitzt. Die (i) Gastemperatur abgeleitet vom Röntgenspektrum des Haufens ist ein Maß für die Tiefe des Potentialtopfes, die (ii) Stärke der Emissionslinie liefert die Häufigkeit der Elemente wie Fe, O und Si im Intracluster-Medium (ICM).

In den frühen 70'er Jahren wurden erstmals ausgedehnte Röntgenemissionen (thermische Bremsstrahlung) von Galaxienhaufen beobachtet. Die Rate mit der das ICM Energie abstrahlt wird ausgedrückt durch die Kühlungs-Funktion  $\Lambda_c(T)$ , berechnet unter der Voraussetzung, daß kollisionsbehaftetes Ionisations-Gleichgewicht die relative Häufigkeit jeder Ionensorte bestimmt. Weil dieser Kühlungsprozess Elektronen-Ionen Kollisionen mit sich bringt, ist die resultierende Kühlungs-Funktion für gewöhnlich definiert als  $n_e n_H \Lambda_c(T)$  oder  $n_e n_{ion} \Lambda_c(T)$  ist die Leuchtkraft pro Einheitsvolumen. In den meisten Haufen befindet sich das Intracluster-Gas näherungsweise im hydrostatischen Gleichgewicht. Unter der Annahme von sphärischer Symmetrie kann das hydrostatische Gleichgewicht geschrieben werden

$$\frac{d \ln \rho_g}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} = -2 \frac{T_\phi(r)}{T}, \quad (\text{A.82})$$

mit  $\rho_g$  der Gasdichte und  $k_B T_\phi(r) = GM(r) \mu m_p / 2r$  der charakteristischen Temperatur einer einzelnen isothermalen Sphäre mit dem selben Wert  $M(r)/r$ . Die zusätzliche Annahme eines isothermalen Gases führt zum klassischen Modell der Röntgen-Oberflächen-Helligkeit eines Galaxienhaufens, bekannt unter der Bezeichnung Beta-Modell.

Das zentral konzentrierte Profil der Oberflächen-Helligkeit eines Haufens ermöglicht hohe Effizienz bei Röntgen-Durchmusterungen um Haufen-Kandidaten zu finden. Röntgenemissionen hängen von Quadrat der Dichte ab, damit heben sich Galaxienhaufen deutlich gegenüber dem Hintergrund hervor. Leider korreliert die Röntgenleuchtkraft weniger als erwünscht mit den optischen Eigenschaften von Haufen.

Die Plasmatemperatur von Haufen im hydrostatischen Gleichgewicht ist in enger Beziehung mit dessen Gesamtmasse. Die Messung der Temperatur erfordert höhere Qualität der Daten verglichen mit einfachen Leuchtkraftmessungen, die Photonen müssen über mehrere Energie-Bins aufgeteilt werden. Im Idealfall wünscht man sich sowohl  $T(r)$  als auch  $\rho_g(r)$ , damit kann Gl. A.82 für  $M(r)$  direkt gelöst werden. Abgesehen von möglichen systematischen Unsicherheiten korreliert die leuchtkraft-gewichtete Temperatur von Haufen sehr gut mit der dazugehörigen Geschwindigkeits-Dispersion. Aktuelle Vergleiche von Galaxienhaufen mit kleiner Rotverschiebung liefern Werte von  $\sigma_{1D} \propto T_{sp}^{0.6}$ .

Häufigkeiten von Elementen wie Fe, O und Si im ICM sind relativ einfach durch ihre Emissionslinien-Flüsse zu bestimmen, vorausgesetzt die Temperatur des emittierenden Gases ist gut definiert. Die komplette Menge an Fe, impliziert durch Extrapolation über den ganzen Haufen, übersteigt die Anzahl von Eisen innerhalb aller Sterne in den Galaxien des Haufens.

**Haufen im Mikrowellen-Frequenzbereich** Heißes Gas in Haufen kann durch die beobachteten Effekte auf die CMB bestimmt werden. Der Hintergrund ist das Spektrum eines praktisch perfekten Schwarzen Körpers, Compton-Streuung stört dieses und verschiebt einige Mikrowellen-Photonen zu höheren Energien

wenn diese das heiße, intergalaktische Gas passieren (Sunyaev Zel'dovich Effekt, SZ Effekt). Bis Frequenzen  $\lesssim 217$  GHz resultiert die spektrale Störung in einer Abnahme der CMB Intensität in Richtung des Galaxien-Haufens. In erster Ordnung hängt die Form des gestörten Spektrums von einem einzelnen Parameter  $y$  ab, proportional zum Produkt aus Wahrscheinlichkeit eines Photonendurchgangs durch den Haufen mit Compton-Streuung und einer typischen Energie die das gestreute Photon erhält,

$$y = \int \frac{k_B T}{m_e c^2} n_e \sigma_T dl, \quad (\text{A.83})$$

mit  $\sigma_T$  dem Thomson Streuquerschnitt und das Integral erstreckt sich entlang der Sichtlinie zum Haufen. Die Magnitude des SZ-Effektes eines Galaxienhaufens ist bestimmt durch den integralen Gasdruck entlang der Sichtlinie zum Haufen. Der Elektronendruck des ICM beträgt  $p_e(\vec{r}) \equiv n_e(\vec{r}) k_B T_e(\vec{r})$ ,  $\vec{r}$  ist der Abstand zum Haufenzentrum. Die Änderung in der Temperatur der CMB aufgrund des SZ-Effektes ist  $\Delta T(\Theta) = T_{\text{CMB}} y(\Theta) (x(e^x + 1)/(e^x - 1) - 4)$ , mit  $x = h\nu/kT_{\text{CMB}} \sim \nu/56.85$  GHz und  $T_{\text{CMB}} = 2.72548$  K. Im langwelligen Bereich (Rayleigh-Jeans Limit) beträgt  $\Delta T(\Theta) \sim -2T_{\text{CMB}} y(\Theta)$ ,  $\Theta$  ist die projizierte Position vom Haufenzentrum. Die Bewegung des Haufens relativ zum Mikrowellen-Hintergrund erzeugt eine zusätzliche Störung, bekannt als kinetischer SZ Effekt.

Kosmologische Anwendungen des thermischen SZ Effektes in Haufen profitieren von der Tatsache, daß der Effekt unabhängig von der Entfernung ist, im Unterschied zur optischen- und Röntgen-Oberflächenhelligkeit. Somit findet ein SZ-Durchmusterung nach Haufen diese bis zu beliebigen Rotverschiebungen, eine beträchtliche Stärke des SZ Effektes.

Röntgenbeobachtungen sind komplementär zu SZ Messungen von Galaxienhaufen weil das Integral von  $\rho_g^2$  entlang der Sichtlinie zum Haufen zusätzlich die Gastemperatur liefert. Ist ein Haufen tatsächlich sphärisch, dann kann der Vergleich von physischem Durchmesser mit der Winkelausdehnung direkt die Entfernung geben, welche wiederum verwendet wird um die Skalen und Geometrien des Universums zu bestimmen.

**Eine Rezeptur für das Universum** Das aktuelle Verständnis der Evolution von Galaxienhaufen ist verbunden mit dem kosmologischen Modell, dessen Eigenschaften durch eine Handvoll Parameter bestimmt werden. (i) Ein Satz an Spezifikationen beschreibt das globale kosmologische Modell und somit die globale Geometrie des Universums, die mittleren Dichten und die zeitlichen Änderungen dieser Skalen. (ii) Der zweite Satz an Parametern bestimmt des initiale Spektrum der Dichtestörungen, sie bilden im Laufe der Zeit Galaxien und Galaxienhaufen wie wir sie heute sehen, siehe [Planck Collaboration et al., 2016] und Kap. A.1.1.

(1) Hubble Konstante – Der konsensuale Wert, primär bestimmt von der Expansionsrate des lokalen Universums in Kombination mit dem Planck Satelliten, beträgt  $H_0 = 67.81 \pm 0.92$  km/s/Mpc. Allerdings werden Unterschiede – 67 vs. 73 – zwischen dem Wert des Hubble Key Projects  $H_0 = 73.24 \pm 1.74$  km/s/Mpc und Messungen vom Planck Satelliten diskutiert. (2) Materiedichte – Mehrere unabhängige Methoden, darunter auch Messungen von Galaxienhaufen, bestimmen sie mit  $\Omega_m \approx 0.3$ . (3) Baryonendichte – Die Menge an leichten Elementen, gebildet während der primordialen Nukleosynthese (BBN), bestimmen diesen Wert mit  $\Omega_b h^2 = 0.02$ , gleichbedeutend mit  $\Omega_b \approx 0.04$ . (4) Strahlungsdichte – Die Energiedichte  $\Omega_R$  der elektromagnetischen Strahlung ist vereinfacht bestimmt aus der CMB Temperatur  $T_{\text{CMB}} = 2.72548 \pm 0.00057$  K und der Hubblekonstante. Neutrinos können ebenfalls zur Energiedichte von relativistischer Materie beitragen, wenn ihre Massen entsprechend klein genug sind. Dieser Beitrag ist allerdings zu gering um die globale Dynamik zu beeinflussen. (5) Dichte der Dunklen Energie – Beobachtungen von entfernten Supernovae implizieren eine beschleunigte Expansion des Universums in Übereinstimmung mit einer Dichte an dunkler Energie von  $\Omega_\Lambda \approx 0.69$ . (6) Zustandsgleichung der Dunklen Energie – Messungen des Mikrowellen-Hintergrundes kombiniert mit Beobachtungen von großräumigen Strukturen (large-scale structure, LSS), sind in Übereinstimmung mit Einsteins kosmologischer Konstante  $w = -1$ . Alternativ dazu liefern Haufenerfassungen in Kombination mit Supernovae eine Beschränkung von  $w = -0.95^{+0.30}_{-0.35}$ . (7) Normalisierung der Dichtestörungen – Haufenbeobachtungen legen nahe, daß die Normalisierung des Leistungsspektrums in den Bereich  $\sigma_8 \approx 0.82$  fllt. Diese Schranken sind konsistent mit (a) Strukturen im CMB und (b) Beobachtungen von LSS. (8) Für die Steigung des primordialen Leistungsspektrums deuten die verfügbaren Informationen auf  $n_s \approx 1$ . Einschränkungen von CMB Messungen kombiniert mit optischen Beobachtungen von LSS ergeben sich auf  $n_s = 0.97 \pm 0.03$ . (9) Der Formparameter der Störungen  $\Gamma$

im Spektrum, er ist kein freier Parameter im  $\Lambda$ CDM Modellen, wird aber manchmal als solcher betrachtet um verschiedene Varianten des Standardmodelles zu testen, ergibt sich mit den Konkordanzwerten von  $\Omega_M$ ,  $\Omega_b$  und  $H_0$  zu  $\Gamma \approx 0.2$  – er ist damit in Übereinstimmung mit Werten von  $\Gamma$  bestimmt aus LSS Messungen – ein wichtiges Element der Selbstkonsistenz des Konkordanz-Modells.

**Bildung von Galaxienhaufen** Die Bildung von Galaxienhaufen aus Störungen in der Dichteverteilung von kalter Dunkler Materie ist ein hierarchischer Prozeß. Kleine Substrukturen aus Materie sind die ersten Objekte des Haufens die vom Hubblefluß entkoppeln und gravitativ relaxieren. Der Grund liegt darin, daß Dichtestörungen größere Amplituden auf kleineren Massenskalen aufweisen. Diese kleinen Fragmente verschmelzen und verbinden sich zu progressiv größeren Strukturen wenn Störungen auf größeren Massenskalen in den nichtlinearen Bereich eintreten. Eine ansatzweise vollständige Beschreibung der Details dieses hierarchischen Verschmelzungsprozesses benötigt numerische Simulationen, für eine grafische Darstellung siehe Abb. A.1.

Die grundlegenden Eigenschaften der Haufenentwicklung können durch ein Modell mit sphärisch, symmetrischem Kollaps beschrieben werden. Die Materie, sie bildet den Haufen, entstammt Dichtefluktuationen mit kleiner Amplitude die ursprünglich mit dem Universum mitexpandieren. Die gravitative Anziehung verzögert immer mehr die Expansion der Materie bis es möglicherweise sogar zu einer Umkehr der Expansion kommt. Es bildet sich eine Materieansammlung im Zentrum der Störung, die Rate mit der weitere Materie in den Haufen zuwächst hängt von der Dichteverteilung in der ursprünglichen Störung ab. In einer perfekt symmetrischen Geometrie wird das Verhalten von individuellen Massenschalen bei Vorhandensein eines homogenen verallgemeinerten Dunklen Energie Feldes beschrieben durch die Bewegungsgleichung

$$\ddot{r}_{sh} = -\frac{GM_{sh}}{r_{sh}^2} - \frac{1+3w}{2}\Omega_\Lambda H_0^2(1+z)^{3(1+w)}r_{sh}, \quad (\text{A.84})$$

mit  $r_{sh}$  als Schalenradius und  $M_{sh}$  der eingeschlossenen Masse innerhalb von  $r_{sh}$ . Der Wachstumsprozeß in realen Haufen ist nicht symmetrisch, stattdessen erzeugen gravitative Kräfte von einfallenden Teilen von Materie ein zeitlich veränderliches Gravitationspotential. Dieses Potential randomisiert die Geschwindigkeiten der einfallenden Teilchen, man erhält eine Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung in der Temperatur die proportional zur Teilchenmasse ist. Dieser Vorgang, bekannt als "violent relaxation", führt zum viralen Gleichgewicht in dem die gesamte kinetische Energie  $E_K$  mit der gesamten gravitativen potentiellen Energie  $E_G$  in Beziehung steht mittels der Gleichung

$$E_G + 2E_K = 4\pi P_b r_b^3, \quad (\text{A.85})$$

mit  $P_b$  als effektiven Druck infolge der einfallenden Materie an der Grenze  $r_b$  des kollabierenden Systems. Setzt man  $P_b$  gleich null erhält man die übliche Darstellung des Viralthereoms für gravitativ gebundene Systeme. Ein verbreitetes Modell zur Abschätzung der äußeren Grenze des Haufens ist das sphärische Zylindermodell (spherical top-hat model), es nimmt an, daß die Störung die zum Haufen führt ein sphärischer Bereich mit konstanter Dichte ist.

Messungen von Galaxien in Clustern zeigen schon lange, daß die Geschwindigkeits-Dispersion mit der Entfernung zum Haufenzentrum relativ konstant bleibt, das bedeutet ein zugrundeliegendes Massendichteprofil  $\rho_M(r) \propto r^{-2}$ . Eine allgemeine Form zur Darstellung dieses Profils lautet

$$\rho_M(r) \propto r^{-p}(r+r_s)^{p-q}, \quad (\text{A.86})$$

die Parameter  $p$  und  $q$  beschreiben die inneren und äußeren Steigungen im Potenzgesetz und der Radius  $r_s$  spezifiziert die Aufsteilung des Profils. Typische Werte sind  $1 \leq p \leq 1.5$  und  $2.5 \leq q \leq 3$ , das Navarro-Frenk-White Profile ergibt sich mit  $p = 1$  und  $q = 3$ .

Selbst mit verfeinerten Ausdrücken des Dichteprofiles bleibt das Problem der Divergenz der Masse mit zunehmendem Radius. Die Masse des Haufens und alle Beziehungen im Zusammenhang der Masse mit anderen Observablen hängt somit von der gewählten äußeren Grenze ab. Die einfachste Möglichkeit um Beobachtungen und theoretische Modelle zu verbinden besteht in der Definition der Haufenmasse  $M_\Delta$ , die enthaltene Menge an Materie in einem sphärischen Bereich mit Radius  $r_\Delta$  und mittleren Dichte  $\Delta \cdot \rho_{cr}$ . Bei Beobachtungen wird oftmals ein Wert von  $\Delta = 200$  oder  $\Delta = 500$  verwendet. Als Beispiel solcher

Definitionen dient die Beziehung zwischen Geschwindigkeits-Dispersion und der Viralmasse  $M_V$  erhalten durch Begrenzung einer isothermalen Sphäre mit dem Virialradius  $r_V$ :

$$M_V = f_\sigma \frac{4\sigma_V^3}{GH\Delta_V^{1/2}}, \quad (\text{A.87})$$

dabei dient der Faktor  $f_\sigma$  zum Anpassen der Beziehung, notwendig aufgrund der Tatsache, daß Galaxienhaufen keine perfekten, sphärischen, isothermalen Objekte sind. Dieser funktionale Zusammenhang  $M_V - \sigma_V$  ist besonders gebräuchlich beim Fit (Ausgleichsfunktion) und beschreibt die meisten kosmologisch bedingten Änderungen in der Normalisierung der Beziehung.

Aktuelle Arbeiten zeigen, daß durch Definition der Haufenmasse mit dem Grenzwert  $\Delta = 200$  die Relation  $M_{200} - \sigma_V$  bemerkenswert unabhängig von der Kosmologie sich darstellt. Die Beziehung

$$M_{200} = \frac{10^{15} h^{-1} M_\odot}{H/H_0} \left( \frac{\sigma_V}{1080 \text{ km/s}} \right)^3 \quad (\text{A.88})$$

ist ein hervorragender Fit für einen weiten Bereich von simulierten Galaxienhaufen über einen ebenfalls großen Bereich an Rotverschiebungen. Beobachter, wenn sie die Haufenmasse durch gravitative Linsensysteme oder die gesamte optische Leuchtkraft bestimmen, messen im wesentlichen Haufenmasse innerhalb eines Zylinders entlang der Sichtlinie anstatt in einer Sphäre.

Eine der leistungsfähigsten Einschränkungen für aktuelle kosmologische Modelle kommt von Messungen wie sich Haufen im Laufe der Zeit entwickeln. Natürlich können keine individuellen Haufen in ihrer Entwicklung beobachtet werden, stattdessen wird die Demographie von Haufenpopulationen abhängig von der Rotverschiebung  $z$  bestimmt.

Ein wichtiges konzeptionelles Werkzeug in diesem Zusammenhang ist die Haufen-Massenfunktion (cluster mass function)  $n_M(M)$ , sie gibt die Anzahldichte von Galaxienhaufen mit Masse größer  $M$  in einem mitbewegten Volumenelement. Kombiniert man den sphärischen Zylinderhut-Kollaps mit der Wachstumsfunktion für lineare Störungen führt dies zu einer weitverbreiteten, semianalytischen Methode zur Bestimmung der Haufenmasse in Termen von kosmologischen Parametern, [Press and Schechter, 1974] begründeten diesen grundlegenden Ansatz.

Ein beobachtbares Merkmal von Haufenpopulationen, in engem Zusammenhang mit der Massenfunktion, ist die Tendenz von Galaxienhaufen sich untereinander anzuheufen (cluster bias). Der Faktor  $b(M)$  zwischen der Störung in der Anzahldichte von Haufen der Masse  $M$  und der Amplitude der Störung der Massendichte bestimmt den Bias Parameter. Er wird unabhängig zur Längenskala betrachtet, solange diese Skala wesentlich größer als der Haufen selbst ist. Der Cluster Bias kann als Modulation der Kollapsschwelle für langwellige Dichtemoden interpretiert werden.

**Messung der Massenfunktion eines Haufens** Dividiert man eine genaue Messung der Massenfunktion durch  $\Omega_M \rho_{cr0}$  führt dies direkt zu einer exakten Bestimmung des primordialen Leistungsspektrums  $\sigma(M)$  auf Massenskalen  $\sim 10^{14} - 10^{15} M_\odot$ . Weiters skaliert sich jede Unsicherheit in  $\rho_{cr0}$  in der Normalisierung des Leistungsspektrums (siehe Seite 89) heraus. Übrig bleibt die Degeneration zwischen  $\sigma_8$  und  $\Omega_M$ . Die gemessenen Werte der Normalisierung im lokalen Universum spiegelt die Kombination der Parameter  $\sigma_8 \Omega_M^\alpha$  mit  $\alpha \approx 0.5$  wider.

Diese Degeneration kann durch drei Methoden aufgehoben werden. (i) Erstens, durch Messung von  $\Omega_M$  und  $\sigma_8$  in einer anderen Art und Weise. (ii) Zweitens, durch Messung der Massenfunktion eines Haufens über einen Bereich an Massen. Dabei stützt man sich auf die genaue Bestimmung der Form der Massenfunktionen um die Degeneration zu umgehen, unter der Annahme der Gültigkeit des CDM Leistungsspektrums. (iii) Oder drittens, man kann die Evolution der Haufen Massenfunktion bestimmen. Sie ist besonders sensitiv hinsichtlich  $\Omega_M$ .

Um die Massenfunktion von einer großen Anzahl von Haufen zu messen, ist es notwendig, die Haufenmasse mit einer einfach zu bestimmenden, observablen Größe in Beziehung zu setzen. Simulationen lassen vermuten, daß dynamische Quantitäten wie die Dispersion der Geschwindigkeit der Galaxien und die Gastemperatur bestimmt aus Röntgenmessungen stärker mit  $M_{200}$  korreliert sind als mit anderen Definitionen,  $M_{200}$  ist somit die primäre Definition für die Haufenmasse. Abgesehen von dieser Relation zwischen

$M_{200}$  und der Geschwindigkeits-Dispersion der Dunklen Materie in Simulationen bleibt die Verbindung zwischen  $M_{200}$  und observablen Größen ein bedeutender Faktor für systematische Fehler. Eine ausreichend große Haufenuntersuchung kann viele dieser systematischen Probleme durch Selbstkalibration umgehen. Diese Prozedur betrachtet alle Parameter zur Beschreibung der systematischen Unsicherheiten wie Streuung, Normalisierung und Evolution der Beziehung zwischen Masse und Observable als freie Parameter in einem gesamt kosmologischen Modell. Durch geeignete Anpassung einer großen Anzahl von Haufen über einem weiten Bereich der Rotverschiebung werden nicht nur die globalen kosmologischen Parameter bestimmt, sondern auch die wahrscheinlichsten Werte der freien Parameter in der Masse-Observable Relation. Betrachtet man die systematischen Unsicherheiten auf diese Art, werden mit jedem zusätzlichen freien Parameter die statistischen Einschränkungen der kosmologischen Messungen verringert.

Unter den Observablen zur Bestimmung der Haufenmasse ist die Röntgentemperatur eine wichtige Größe. Sie steht in Bezug zur Tiefe des Haufen-Potentialtopfes und kann mit Teleskopen bis  $z \sim 1$  relativ einfach bestimmt werden. Aktuelle Daten sind von solch hoher Qualität, daß die systematischen Unsicherheiten in der Verbindung zwischen Masse und Temperatur die bestimmenden Faktoren sind. Zwischen Masse und Temperatur besteht für einen Haufen im hydrostatischen Gleichgewicht in einfacher Beziehung. Die Gastemperatur für eine einzelne isothermale Sphäre mit Masse  $M_{200}$  innerhalb des Radius  $r_{200}$  beträgt

$$\begin{aligned} k_B T_{200} &= \frac{GM_{200}\mu m_p}{2r_{200}} = \frac{\mu m_p}{2} (10GM_{200}H(z))^{2/3} \\ &= (8.2 \text{ keV}) \left( \frac{M_{200}}{10^{15} h^{-1} M_\odot} \right)^{2/3} \left( \frac{H(z)}{H_0} \right)^{2/3}. \end{aligned} \quad (\text{A.89})$$

Cluster sind nicht perfekt isothermal, somit ist ein einziger Skalar zur Spezifikation der Gastemperatur des Galaxienhaufens ein gewichteter Wert.

Alternative Methoden zur Massenbestimmung sind extrem hilfreich um diese Probleme zu lösen. Die Kalibration der Masse-Temperatur Relation mit Gravitationslinsen-Messungen ist vielversprechend, allerdings auch schwierig. Messungen mit Hilfe des WL-Effektes stimmen mit Massen abgeleitet aus Röntgenmessungen unter der Annahme des hydrostatischen Gleichgewichtes überein. Weniger relaxierte Haufen liefern eine leicht verminderte Übereinstimmung. Messungen von Haufenmassen über das Geschwindigkeitsfeld von Galaxien in und in der Nähe einiger weniger ausgesuchter Haufen tendieren zu Massen abgeleitet aus Röntgenbeobachtungen. Nachdem die Kalibration systematisch von der Haufenauswahl abhängen kann, ergibt sich mit der Selbstkalibration einer großen Haufen-Vermessung die beste Methode zur Festlegung der  $M_{200} - T_{lum}$  Beziehung.

Röntgenleuchtkraft korreliert ebenfalls ausgezeichnet mit der Masse von Galaxienhaufen und ist gleichzeitig einfacher zu messen als Röntgentemperatur. Damit ergibt sich die Möglichkeit zur Bestimmung der Massenfunktion für weit größere Himmelsdurchmusterungen von Galaxienhaufen. Verglichen mit der Korrelation Masse - Temperatur ist die Beziehung Masse - Helligkeit allerdings schwächer, zusätzlich ist die Normalisierung und Steigung der Relation stark abhängig von der Physik der Galaxienformierung.

Ein üblicher Weg um die Masse - Leuchtkraft Beziehung zu kalibrieren besteht in der Kombination von Masse - Temperatur Relation unter Anwendung der gemessenen Leuchtkraft - Temperatur Beziehung. Auf Haufenskalen ist die Beziehung zwischen der gesamten (bolometrischen) Röntgenleuchtkraft und  $T_{lum}$  näherungsweise ein Potenzgesetz. Normalisiert man die Relation mit 6 keV, die Temperatur im Zentrum eines massereichen Haufens, führt dies zum Ausdruck  $L_X = L_6 (T_{lum}/6 \text{ keV})^{\alpha LT}$  mit repräsentativen Werten für  $L_6$  und  $\alpha LT$ .

Die Masse - Leuchtkraft Relation kann direkter kalibriert werden wenn hochqualitative Röntgendaten und Temperaturmessungen eines vollständigen Haufensatzes vorliegen. Man erhält

$$L_X = 10^{45 \pm 0.3} h_{70}^{-2} \text{ ergs}^{-1} \left( \frac{M_{200}}{10^{15} h_{70}^{-1} M_\odot} \right)^{1.8}, \quad (\text{A.90})$$

unter der Annahme eines Haufengases im hydrostatischen Gleichgewicht und Zugrundelegung des isothermalen Betamodells.

Optische Teleskope haben einen wesentlich umfangreicheren Datensatz von Galaxienhaufen verglichen mit Röntgenteleskopen, allerdings ist die Herleitung der Massenfunktion von diesen Messungen schwieriger.

Projektionseffekte erschweren sowohl die Messungen der Haufenmasse als auch die Berechnung des Volumens in Verbindung mit einer gegebenen Masse. Galaxienhaufen in optischen Durchmusterungen werden ausgewählt auf Basis der Anzahl von Galaxien innerhalb eines bestimmten projizierten Radius vom Zentrum des Haufens.

Die Dispersion der Geschwindigkeit ist das optische Analogon zur Röntgentemperatur. Massenfunktionen abgeleitet von Messungen der Geschwindigkeits-Dispersion legen die Vermutung nahe, daß diese Massenwerte größer sind als diejenigen von Röntgendaten. Ein Teil der Diskrepanz könnte von Methoden stammen wie die Dispersion beobachtet wird.

Der WL-Effekt ist eine hervorragende Methode zur Bestimmung der Haufenmasse und (i) unabhängig vom Baryonenanteil, (ii) dynamischen Zustand und (iii) Masse - Licht Verhältnis, siehe Kap. A.1.2. Das größte systematische Problem bei Massenbestimmungen mit gravitativer Lichtablenkung ist bestimmt durch Masse außerhalb des Virialradius auf der Blickrichtung zum Haufen. Durchmusterungen von großskaligen Strukturen mit der Methode des WL-Effektes sind komplementär zu anderen Haufenuntersuchungen, sie liefern Werte für  $\sigma_8$  unabhängig von anderen Haufenmessungen.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Massenfunktion von Haufen basiert auf der Konstanz des Verhältnisses von Baryonen zu Dunkler Materie in massereichen Haufen. Korrekturen für Baryonen in Sternen, ihre Masse ist näherungsweise  $0.16h_{70}^{1/2}$  der des heißen Gases, erhöhen die gesamte Menge von Baryonen zu Dunkler Materie in Haufen auf  $f_b = 0.13$  für  $h_{70} = 1.0$ . Dieses Verhältnis von Baryonen zu DM kann auch verwendet werden um Festlegungen zur Dunklen Energie vorzunehmen. Messungen dieser Relation in Haufen hängen ab von Verhalten zwischen transversaler Größe und Rotverschiebung, beide sind in Beziehung zu  $\Omega_M$  und  $\Omega_\Lambda$ .

**Evolution der Massenfunktion** Messungen der Entwicklung der Massenfunktion von Haufen können beträchtliche Einschränkungen hinsichtlich der kosmologischen Parameter liefern. Was tatsächlich gemessen wird ist die Abhängigkeit der Observablen, welche die Haufen-Massenfunktion bestimmen, mit der Rotverschiebung  $z$ . Für einen gegebenen Haufenkatalog wird die Anzahl an Haufen  $dN$  gemessen, die innerhalb eines Raumwinkels  $d\Omega$  und Rotverschiebungs-Intervalles  $[z, z + dz]$  im Bereich  $[X, X + dX]$  der Observablen  $X$  liegen. Mit Kenntnis der Masse - Observable Relation  $M(X, z)$  und deren Streuung als Funktion der Rotverschiebung kann die Verteilung für Galaxienhaufen der Masse  $M$  direkt aus der Beobachtung abgeleitet werden

$$\frac{d^3 N}{dM d\Omega dz} = \frac{dn_M}{dM}(M, z) \cdot \frac{d^2 V_{co}}{dz d\Omega}(z). \quad (\text{A.91})$$

Diese Verteilung der Haufen mit der Rotverschiebung liefert starke Einschränkungen für kosmologische Modelle durch die Evolution der Massenfunktion  $dn_M/dM$  und dem mitbewegten Faktor  $d^2 V_{co}/d\Omega dz$ .

Die Entwicklung der Massenfunktion ist sehr sensitiv hinsichtlich kosmologischer Modelle weil die Massendichte die Rate des Strukturwachstums kontrolliert. Die Anzahl der Haufen mit Masse  $> M$  auf der Himmelskugel im Rotverschiebungsintervall  $dz$  ist gegeben durch

$$\frac{dN}{dz}(M) = \frac{4\pi r_k^2(z)c}{H(z)} n_M(M, z). \quad (\text{A.92})$$

Diese Gleichung A.92 liefert die Anzahl-Rotverschiebungs Verteilung für unterschiedliche kosmologische Modelle. Die statistische Aussagekraft von Haufen Durchmusterungen ist letztendlich limitiert durch die Gesamtanzahl von massereichen Haufen im beobachtbaren Universum, sie ist in der Größenordnung von  $\sim 10^5$ . Unterschiede zwischen Modellen mit  $\Omega_M \approx 0.3$  aber verschiedenen Werten von  $\Omega_\Lambda$  und  $w$  sollten bei großen Haufendurchmusterungen mit  $\sim 10^4$  Haufen und bis zur Rotverschiebung von  $z \sim 1$  bestimmbar sein, ein Satellitenprojekt dazu ist Demon [Berciano Alba et al., 2006].

Alle Masse - Observable Beziehungen entwickeln sich mit der Rotverschiebung, zum Teil weil die Definition von  $M_{200}$  mit der kritischen Dichte in Verbindung steht und auch aufgrund der Physik im Zusammenhang mit der Galaxienbildung. Haufen mit einer gegebenen Masse sind heißer in früheren Epochen weil die Materiedichte größer war. Sowohl  $T_{200}$  als auch das Quadrat der DM Geschwindigkeits-Dispersion für einen fixen Wert von  $M_{200}$  variieren mit  $H^{2/3}(z)$  in der Rotverschiebung.

In vielerlei Hinsicht ist der Sunyaev-Zel'dovich Effekt die vielversprechendste Observable zur Charakterisierung von Galaxienhaufen bei hoher Rotverschiebung, weil der Wert nicht von der Rotverschiebung

abhängt (siehe Seite 94).

Es gibt grundsätzlich drei Wege mit der Entwicklung in der Normierung und vielleicht der Streuung der Masse - Observable Relation umzugehen. (i) Die Annahme eines Modells der Relation der Entwicklung. Numerische Simulationen können hilfreich sein ein solches Modell der Evolution der Normalisierung und Streuung der Masse - Observable Relationen zu liefern. (ii) Die Annahme einer parametrischen Form für die Masse - Observable Relation inspiriert von theoretischen Modellen mit dem Versuch der direkten Kalibration durch die Beobachtungen. (iii) Die Annahme einer parametrischen Form für die Masse - Observable Beziehung und Anwendung von Selbstkalibrations-Techniken auf eine große Haufendurchmusterung. Damit erhält man die wahrscheinlichsten Parameter um diese Masse - Observable Entwicklung zu beschreiben. Diese Technik ist vielversprechend, sie benötigt allerdings einen großen Katalog von entfernten Haufen, etwas das momentan noch nicht zur Verfügung steht (entferntester Haufen momentan  $z = 2.07$ ). Die Genauigkeit ist limitiert durch die Anzahl der benötigten freien Parameter um die Masse - Observable Relation zu beschreiben – je weniger desto besser, ganz im Sinne des Ökonomieprinzips (Ockham's razor, siehe Kap. C.2.1).

Durchmusterungen nach entfernten Galaxienhaufen zeigen mäßige Evolution in ihrer mitbewegten Anzahldichte, konsistent mit kosmologischen Modellen in denen  $\Omega_M \approx 0.3$  ist. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf den Einschränkungen auf  $\Omega_M$ , abgeleitet von Röntgenmessungen, deren Observablen – (i)  $L_X$ , (ii)  $T_X$  und (iii) Baryonische Masse – mit der sphärischen Masse  $M_{200}$  durch einfache parametrische Relationen in Beziehung stehen.

Existierende Haufen Durchmusterungen liefern, für sich selbst und isoliert betrachtet, bis dato keine starken Einschränkungen für die Dunkle Energie. Diese Situation könnte in wenigen Jahren bereits gänzlich anders aussehen wenn große und tiefe Haufenkataloge in Optischen-, Röntgen- und Mikrowellen-Bändern vorliegen. Aktuell liefern Untersuchungen von Haufen in bezug auf Dunkle Energie wertvolle Information durch Kombination mit Resultaten aus anderen, komplementären, orthogonalen Messungen. Wenn die globale Geometrie des Universums tatsächlich flach ist, dies wird durch Temperaturmessungen der CMB nahegelegt, dann ergibt sich die Dunkle Energie abgeleitet von Haufenuntersuchungen zu  $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_M \sim 0.7 \pm 0.1$ .

Große Durchmusterungen von Galaxienhaufen bis  $z \sim 1$  haben das Potential wesentlich stärkere Schranken für die Dunklen Energie Parameter  $\Omega_\Lambda$  und  $w$  zu liefern, unabhängig von anderen Informationen. Es muß nur sichergestellt sein, daß Datensätze groß genug sind um mit Selbstkalibration die Relation zwischen Masse und Observablen bestimmen zu können, ebenfalls eine Stärke von [Berciano Alba et al., 2006]. Nachdem Haufen die Tendenz zur Haufenbildung haben, ist die Varianz in der Anzahl an Haufen innerhalb kleiner Probenvolumina größer als der Gauß'sche Erwartungswert, damit addiert sich systematische Unsicherheit in die gemessene Massenfunktion. Diese Effekte müssen im Survey-Design mit in Betracht gezogen werden wenn eine Haufenuntersuchung für kosmologische Zwecke hochpräzise sein soll.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Beobachtungen der Evolution von Galaxienhaufen bereits die Dichte von gravitierender Materie auf  $\Omega_M \approx 0.3 \pm 0.1$  einschränken, somit  $\Omega_\Lambda \approx 0.7 \pm 0.1$  gilt falls das Universum flach ist. Verwendet man diesen Wert von  $\Omega_M$  um die  $\Omega_M - \sigma_8$  Degeneration zu brechen, dann führt dies auf  $\sigma_8 \approx 0.7 - 1.0 = 0.747 \pm 0.046$  (aktueller Wert), abhängig von der Masse - Temperatur Relation. Die Hauptquelle der Unsicherheit in all diesen kosmologischen Parametern ist nicht das statistische Verhalten der Haufendurchmusterung, stattdessen sind es Unsicherheiten in der Normalisierung und der Rate in der Evolution der Masse - Observablen Beziehung.

### Evolution der baryonischen Komponente

Kosmologen sind an der Fragestellung interessiert wie Effekte der Galaxienbildung das ICM beeinflussen, primär um die Masse des Haufens besser bestimmen zu können. Die Bestimmung dieser Verbindung zwischen Galaxienformierung und Masse - Observable Beziehung ist deshalb ein wichtiger Faktor. Ein Puzzle im aktuellen Verständnis des Universums liegt in der Fragestellung warum so wenige Baryonen sich in Sternen finden. Galaktische Winde haben vermutlich einen immensen Einfluß auf das intergalaktische Medium und nachfolgend auf die Formation von Galaxien. Leider ist das IGM bei kleiner Rotverschiebung nur schwer zu beobachten, genau der Bereich in dem die meisten Baryonen sich befinden. Weil die Mehrzahl dieser gasförmigen Materie unentdeckt bleibt, spricht man manchmal vom "missing baryons" Problem. Nur wenige Quasare sind hell genug um diese fehlenden Baryonen mittels Absorptionslinien-Studien in

UV Spektrographen bestimmen zu können. Galaxienhaufen bleiben nach wie vor die einzigen Objekte im Universum in denen intergalaktische Baryonen exakt bestimmt werden können, zusammen mit dem thermischen Zustand und den Anreicherungen mit schwereren Elementen.

**Strukturbildung und gravitative Aufheizung** Wenn Kühlung durch Strahlung vernachlässigbar ist, dann liefern gravitative Prozesse die Wärme um diffuses Gas auf die Viraltemperatur des Potentialtopfes – er schließt das Gas ein – zu bringen. Das erklärt warum das Gas heiß und röntgenemittierend wird.

Aus zwei Gründen ist Entropie von fundamentaler Wichtigkeit: (i) Sie bestimmt die Struktur des intracluster Mediums (ICM) und (ii) speichert die thermodynamische Geschichte des Gases im Haufen. Entropie ist definiert als

$$K \equiv \frac{k_B T}{\mu m_p \rho_g^{2/3}}, \quad (\text{A.93})$$

und ist die Proportionalitätskonstante in der Zustandsgleichung  $P = K \rho_g^{5/3}$  für ein adiabatisches, monoatomares Gas und gleichzeitig in Beziehung zur thermodyn. Entropie pro Teilchen,  $s = k_B \ln K^{3/2} + s_0$ , mit  $s_0$  als Konstante die nur aus fundamentalen Konstanten und der Mischung der Teilchenmassen besteht. Eine andere häufig verwendete Größe, ebenfalls als "Entropie" in der Literatur bezeichnet, ergibt sich mit  $K_e = k_B T n_e^{-2/3}$ .

Ein Weg um sich dem Problem der gravitativ getriebenen Erzeugung von Entropie zu nähern besteht in sphärisch symmetrischen Modellen mit ruhiger Akkretion. Dabei passiert Gas einen Akkretionsschock wenn es in den Haufen eintritt. Das kalte Akkretionsgas ist praktisch drucklos, die Gleichung zur Bestimmung der Entropie nach dem Schock lautet  $\dot{M}_g = 4\pi r_{ac}^2 \rho_1 v_{ac}$ ,  $V_{ac}^2 = 2GM/r_{ta}$ ,  $k_B T_2 = \mu m_p v_{ac}^2/3$ ,  $\rho_2 = 4\rho_1$ , mit  $\dot{M}_g = f_b \dot{M}$  der Akkretionsrate des Gases,  $\rho_1$  der Gasdichte vor dem Schock,  $T_2$  und  $\rho_2$  sind Größen nach dem Schock. Galaxienhaufen erstrecken sich in einem Massenbereich von  $10^{14} - 10^{15} M_\odot$  und wachsen in etwa mit  $M(t) \propto t$  bis  $M(t) \propto t^2$  im Konkordanzmodell.

In realen Haufen ist das Akkretionsgas klumpig und nicht glatt verteilt, damit wird der Prozeß der Entropieerzeugung transformiert. Nichtstrahlende Haufen haben näherungsweise selbstähnliche Entropiestrukturen und als Konsequenz daraus selbstähnliche Dichte und Temperaturen. Gasdichte-Profil und Dunkle Materie Dichteprofil außerhalb  $0.1r_{200}$  haben im Grunde genommen identische Formen.

Astrophysikalische Beobachtungen zeigen seit langem, daß die Struktur des ICM in realen Haufen nicht selbstähnlich sein kann. Die Leuchtkraft - Temperatur Relation von Haufen stimmt mit selbstähnlicher Skalierung nicht überein. Messungen des Satelliten XMM-Newton zeigen ein Intracluster Entropieprofil mit  $K(r) \propto r^{1.1}$  Verlauf, charakteristisch von gravitativen Strukturen außerhalb des Kerns. Allerdings skaliert die Gesamtnormalisierung dieser Profile mit  $T_{lum}^{2/3}$  anstatt  $T_{lum}$  in den Grundprofilen. Seit man sich der Situation von Nichtähnlichkeiten der Haufen bewußt ist und die entsprechende Rechenleistung vorliegt, wurden zahlreiche Simulation durchgeführt um dieses Verhalten zu ergründen.

Die ersten Ansätze zur Erklärung in der Abweichung der Ähnlichkeitsstruktur von Haufen postulierten ein Art überlagerten Heizprozeß zur universalen minimalen Entropie, einen Entropieboden bevor das galaktische Gas sich in Haufen ansammelt.

In Gegensatz dazu ergibt sich der Bruch in der Ähnlichkeit der beobachteten Entropieskala ganz natürlich durch den Vorgang der Strahlungskühlung. Intergalaktisches Gas, sowohl innerhalb als auch außerhalb des Haufens, strahlt thermische Energie mit einer Rate gegeben durch die Kühlungsfunktion  $\Lambda_c(t)$ , Seite 93. Kühlung die eine Energie  $\Delta q$  pro Teilchen abstrahlt reduziert die Entropie um  $\Delta \ln K^{3/2} = \Delta q/k_B T$ . Somit kann die Gleichung, die den Strahlungsverlust ausdrückt, geschrieben werden

$$\frac{dK^{3/2}}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{K_c^{3/2}(T)}{t_0}, \quad (\text{A.94})$$

mit

$$K_c(T) = \left[ \frac{2}{3} \left( \frac{n_e n_p}{\rho^2} \right) \frac{(k_B T)^{1/2} \Lambda_c(T)}{(\mu m_p)^{1/2}} \right]^{2/3} t_0^{2/3} \quad (\text{A.95})$$

als Entropielevel bei dem Gas konstanter Dichte  $\rho$  mit Temperatur  $T$  eine Energie äquivalent zu seiner thermischen Energie in der Zeit  $t_0$  strahlt. Die Beziehung A.95 reduziert sich auf

$$K_c(T) \approx 81 \text{ keVcm}^2 \left( \frac{t_0}{14 \text{ Gyr}} \right)^{2/3} \left( \frac{T}{1 \text{ keV}} \right)^{2/3} \quad (\text{A.96})$$

unter der Annahme reiner Bremsstrahlung als Kühlung.

Supernovae sind die offensichtlichsten Kandidaten zur Erzeugung der Rückkopplung und Unterdrückung der Kondensation. Es ist allerdings nicht klar ob Supernovae-Heizung und daraus resultierende galaktische Winde genügend Entropie liefern können um den Anteil an kondensierten Baryonen unter  $\sim 15\%$  halten zu können.

Wenn Supernovae eine Überkühlung nicht verhindern, dann sind es vielleicht supermassive Schwarze Löcher (SBHs) im Kern von Galaxien die es zustande bringen. Die Omnipräsenz von SBHs in Zentren von Galaxien und die hervorragende Korrelation ihrer Massen mit den Eigenschaften der Galaxie lassen vermuten, daß ein Wachstum von Schwarzen Löchern in den Kernen von Galaxien Hand in Hand mit der Galaxienbildung geht.

Prozesse im Wärmetransport wie (i) thermische Leitung und (ii) turbulente Mischung könnten ebenfalls Strahlungskühlung mildern, kondensierendes Gas erzeugt einen Temperatur-Gradienten entlang dessen sich Wärmeenergie ausbreiten könnte. In Gasen ohne magnetisches Feld leiten Elektronen Wärme entlang von Temperatur-Gradienten mit einem Wärmefluß  $\kappa_s \nabla T$ , dabei ist  $\kappa_s \approx 6 \times 10^{-7} T^{5/3} \text{ ergcm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-7/2}$  die sogenannte Spitzer Rate, gültig wenn die Skalenlänge des Temperatur-Gradienten länger als die mittlere freie Weglänge der Elektronen ist.

**Galaxienbildung und Haufenobservable** Die Röntgeneigenschaften von selbstähnlichen Haufen erzeugt durch rein gravitative Strukturbildung stimmen mit den Beobachtungen nicht überein. Haufenmessungen bei gegebener Masse erscheinen heißer und weniger hell als diejenigen der theoretischen Modelle, speziell am kühlen Ende des Temperaturbereichs des Haufens. Sowohl analytische Berechnungen als auch hydrodynamische Simulationen zeigen, daß die beobachteten  $L_X - T_{lum}$ ,  $M_{200} - T_{lum}$  und  $L_X - M_{200}$  Relationen natürliche Ergebnisse des Galaxienbildungs-Prozesses sind. Signifikante Unsicherheiten bleiben bestehen, die theoretische Untermauerung der Relationen zwischen Masse und Observablen – wesentlich um Kosmologie mit Galaxienhaufen zu betreiben – wächst allerdings beständig.

Strahlungskühlung ist der dominierende Prozeß der berücksichtigt werden muß. Simulationen zeigen, daß durch Hinzunahme der Kühlung bei großen Haufensimulationen eine  $L_X - T_{lum}$  Beziehung wie bei den Messungen entsteht. Durch Addition dieses Kühlprozesses bei kosmologischen Modellen entsteht gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen bei allen Haufentemperaturen  $\geq 2 \text{ keV}$ . Die primäre Rolle der Rückkopplung besteht in der Regulation des Baryonenanteils der in Sterne oder kalte Gaswolken kondensiert. Das volle Verständnis der  $L_X - T_{lum}$  Relation könnte indirekte Rückkopplung beinhalten, dargestellt durch Glättungseffekte auf das intergalaktische Medium.

Vorheizung, die Kühlungsschwelle und veränderte Ähnlichkeiten lassen einen Glättungseffekt mit unterschiedlichem zeitabhängigen Verhalten der  $L_X - T_{lum}$  Relation vermuten. Damit ergibt sich ein weiterer Weg um Informationen über den relativen Einfluß auf die Haufenstrukturen zu gewinnen. Durch die Definition

$$\hat{L} \equiv \int_0^{r/r_{200}} \left( \frac{\rho_g}{200 f_b \rho_{cr}} \right)^2 \hat{r}^2 d\hat{r}, \quad (\text{A.97})$$

kann die Skalierung der integralen Röntgenleuchtkraft ausgedrückt werden als

$$L_X \propto \Lambda_c(T_{lum}) M_{200} \rho_{cr} \hat{L} \propto T_{lum}^2 \left( \frac{T_{200}}{T_{lum}} \right)^{3/2} H(z) \hat{L}, \quad (\text{A.98})$$

dabei geht die erste Proportionalität von nahezu isothermalen Verhältnissen des Haufens aus, die zweite ist eine Näherung für Emission reiner Bremsstrahlung. Der selbstähnliche Fall  $L_X \propto T_{lum}^2 H(z)$  ist keine ausreichende Beschreibung der Daten weil die Steigung bei  $z \approx 0$  zu flach ist.

**Einschränkung der Baryonen-Kondensation** Der ultimative Test für Modelle mit Rückkopplung ist ob sie sowohl (i) die Anzahl der kondensierten Materie zum heißen Gas im Haufen als auch (ii) die Abhängigkeit dieses Verhältnisses von der Haufenmasse liefern.

Rückschlüsse auf stellare Massen vom beobachteten Sternenlicht basieren im Allgemeinen auf einem Masse - Licht Verhältnis ausgedrückt in solaren Einheiten. Ältere Sternpopulationen, charakteristisch für elliptische Galaxien, neigen zu einem K-Band Masse zu Licht Verhältnis  $Y_K \approx 0.8h_{70}^{-1}$  und Masse - Licht Verhältnisse in spiralförmigen und irregulären Galaxien können bis zu einem Faktor 2 geringer sein. Für die Mischung von Galaxien in Haufen reicht das mittlere Masse zu Licht Verhältnis von  $Y_K = 0.7 - 0.8h_{70}^{-1}$  wenn die Haufentemperatur von  $2 \rightarrow 10$  keV steigt.

Aktuelle Limits in der Beobachtung deuten darauf hin, daß nicht mehr als 10 – 20 % der Sterne im Haufen außerhalb der Galaxien sind.

Wenn die baryonische Komponente in Haufen mit geringer Masse nicht in kondensierter Form vorliegt, dann ist sie in heißem gasförmigem Zustand und zugleich schwer zugänglich für Möglichkeiten aktueller Röntgenteleskope. Der beste Weg um diese Objekte zu finden ist der Sunyaev-Zel'dovich Effekt, siehe Kap. A.1.3.

Kerne von Haufen gehören zu den bevorzugten Stellen im Universum um das Wechselspiel zwischen Kondensation und Rückkopplung zu beobachten. Wenn der Halo einer massereichen Galaxie wächst und die charakteristische Temperatur bis zur kritischen Schwelle  $\sim 10^7$  K steigt, dann kann Leitung weitere Kühlung und Sternbildung stark unterdrücken solange keine Blockade durch magnetische Felder, siehe Kap. A.1.5, gegeben ist.

### Abschließende Folgerungen

Die Chandra und XMM-Newton Röntgensatelliten liefern die bis dato genauesten Einblicke in das ICM, dessen thermodynamischen Zustand sowie in einige der Rückkoppelprozesse um die Kondensation von intergalaktischem Gas in Galaxien und Sterne zu regeln. Wenn das  $\Lambda$ CDM Konkordanzmodell tatsächlich eine gute Beschreibung für die globale Architektur des Universums und die initialen Störungen des Spektrums darstellt, dann sollten die Parameter zur Beschreibung des kosmologischen Zusammenhanges und Galaxienbildung präzise bestimmt sein. Untersuchungen zur Haufenevolution sind ein Teil dieses Gesamtumfanges, inkludiert sind Entfernungsmessungen von Supernovae bei hoher Rotverschiebung  $z$ , Beobachtungen der CMB mit hoher Sensitivität und die Abbildung von großräumigen Strukturen. Galaxienhaufen und deren Evolution bestimmen in einzigartiger Art und Weise kosmologische Modelle, weil Haufen die einzigen Orte im Universum sind wo die Mehrzahl der Baryonen detektierbare Strahlung emittiert und somit Aufschlüsse hinsichtlich des thermodynamischen Zustandes und der vorhandenen Elemente geben.

### A.1.4 Magnetismus

Der Zugang zu Magnetismus und Phänomenen magnetischer Felder ist naturgemäß je nach Betrachtungsweise unterschiedlich, Abb. A.7 zeigt exemplarisch einzelne Pfade: (i) Eine Gliederung über räumliche Skalengrößen, z. B. von  $\mu$ G galaktischen magnetischen Feldern [Widrow, 2002], Magnetarfelder größer als der quantenkritische Wert (Energie zwischen Landau-Leveln von Elektronen gleich der Ruhemasse)  $B_{\text{QED}} = (m^2 c^3)/(\hbar e) = 4.4 \times 10^{13}$  G bis zum Geodynamo [Roberts and Glatzmaier, 2000] und hinab zur mikrophysikalischen Betrachtungsweise der Quantenmechanik bei nanomagnetischen (Spintronic) Anwendungen, (ii) Instrumentenbau, (iii) anwendungsorientierte Sichtweise, (iv) historischer Zugang (Novara Abb. A.11), (v) literarische Bezugnahmen, z. B. bei James Joyce (1882 – 1941) in seinem Werk "Ulysses" ([Joyce, 1996]: Seiten 508-509: "Magnetismus ... wie bei Mann und Frau, Magnet und Eisen", aber auch die Bewunderung von "Wasser" durch die Romanfigur Leopold Bloom auf den Seiten 823-825, oder Anmerkungen zu "Universum", "Milchstraße" und Erwähnung der Nova von 1901 auf der Seite 861) und (vi) mathematische Beschreibungen. In den nachstehenden Kapiteln B, C sind grundlegende Betrachtungen und Arbeiten zu den Teilgebieten (i) Fluxgate Magnetometer im Instrumentenbau, (ii) wissenschaftliche Applikationen und Datenauswertung bei Satelliten, (iii) Maxwell'sche Gleichungen und Plasma für (iv) räumliche Skalen vom Erdmagnetfeld und darüber hinaus dargestellt.

**Historische Synopsis**

Dem griechischen Hirten Magnes (~ 900 v. Chr.) schreibt man Erfahrung mit magnetischen Eigenschaften zu (Namensgebung Halbinsel Magnesia), vom Philosophen Lukrez (~ 99 – 55 v. Chr.) stammen frühe Beschreibungen im Zusammenhang mit Magnetismus. Die Beobachtung, daß eine kleine Nadel oder ein Span aus Magneteseisenstein (Magnetit  $Fe_3O_4$ ), gelagert im Schwerpunkt, die Orientierung (:= Ausrichtung zum "Orient" ↔ Jerusalem ↔ oben, Sonnenaufgang, aus historischen Kartendarstellungen) in Bezug auf die Erde beibehält, ist somit hinlänglich bekannt und z. B. in Anwendung als Kompaß für Navigationszwecke. Die Chinesen waren die ersten die das Erdmagnetfeld für Navigationszwecke zu nutzen verstanden haben (die Erfindung des Papiers, Verwendung von Schießpulver und erste "Raketen" deuten ebenfalls auf chinesischen Ursprung). Dem Standpunkt des Beobachters wurde somit Rechnung getragen und vor mehr als 2500 Jahren verwendeten sie bereits Späne aus Magnetit als besagten Kompaß und Richtungsanzeiger (Periode des Zhan Kuo, 481 – 221 v. Chr.), siehe Abb. A.8, europäischen Seeleuten stand dieses Instrument seit dem 12. Jahrhundert zur Verfügung, Beschreibung von Alexander Neckam (1157 – 1217). Im Bergbau – speziell beim Markscheider resp. Schiner – sind Magneten und Kompassse spätestens zu Ende des Mittelalters (15./16. Jhdt.) bereits verbreitet im Einsatz, erwähnt in diesem Zusammenhang sei das Schwazer Bergbuch (siehe Seite 69). Diese "magnetischen" Prinzipien werden somit seit langem anerkannt ohne ihre vollen Konsequenzen erahnen zu können. Durch Reiseberichte gelangte dieses Wissen im 13. Jahrhundert endgültig nach Europa, Petrus Peregrinus de Maricourt (über ihn ist nur sehr wenig bekannt) beschrieb 1269 die Polarität von Magneten, das Wissen über die magnetische Deklination gab es spätestens ab 1450 (in China war die erste Deklinations-Messung bereits 720 n. Chr.) und ~ 300 Jahre später, im Jahre 1600, assoziierte der englische Arzt William Gilbert (1544 – 1603) diesen Effekt mit den magnetischen Eigenschaften der Erde selbst. In seinem "De Magnete" ("Über den Magneten") bezeichnete Gilbert das magnetische Verhalten der Erde als großen Permanentmagneten, ähnlich einer uniform magnetisierten Sphäre und Henry Gellibrand (1597 – 1637) konnte zeigen, daß Variationen im Erdmagnetfeld vorliegen. Eine Karte von Isogonen (Linien gleicher Deklination) aus 1701 gibt es von Edmond Halley (1656 – 1742). Ende des 18. Jhd. war es James Cook (1728 – 1779) der die ersten Südlichter beschrieb und Anfang des 19. Jhd. Alexander von Humboldt (1769 – 1859) – dieser hatte auch maßgeblichen Einfluß auf die wissenschaftliche Ausrichtung der Novara Expedition (siehe Abb. A.10 und A.11) – mit der Beobachtung des ersten magnetischen Sturms (Störung der Kompaßnadel). Kurz danach entwickelte Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855) die mathematischen Methoden zur analytischen Darstellung des Magnetfeldes. Es folgten, um nur einige Proponenten zu nennen, Elias Loomis (1811 – 1889), Hermann Fritz (1830 – 1883), Kristian Olaf Bernhard Birkeland (1867 – 1917) mit seinen feldparallelen Strömen (Birkeland Ströme, Terrella



**Abbildung A.7:** Magnetismus und magnetisches Feld in verschiedenen Betrachtungsweisen und Zugängen.

Experimente) und Carl Størmer (1874 – 1957). Frühe Verbindungen mit China und Tibet hatten ebenfalls Odorich von Portenau (zwischen 1265 und 1286 – 1331) und Johannes Grueber (1623 – 1680). Die vorhin erwähnte Navigation und deren Geschichte ist reichhaltig und führt – neben astronomischen / himmelsmechanischen Methoden und hier betrachteten technischen Lösungen – über den Kompaß, der Bestimmung des Längengrades in der Seefahrt mittels mechanischer Chronographen, angedacht von Gemma Frisius (1508 – 1555) und realisiert durch John Harrison (1693 – 1776), siehe [Andrewes, 2000], bis zum Global Positioning System (GPS) und dem europäischen Galileo System weiter zu Global Navigation Satellite Systems (GNSS) basierend auf Code Division Multiple Access (CDMA) Technik. Damit wird entgültig die Zeit zur Grundlage der Navigation.

### Geographische und kartographische Werke

Von eminenter Bedeutung sind geographische, kartographische Arbeiten (Geovisualisierung, geographische Informationssysteme – GIS) und Vermessungen (Geomatics; Geodäsie, erstmals bei Aristoteles im 3. Buch der Metaphysik), nicht nur (aber auch) im Bereich magnetischer Informationen. Eine (lose, nicht dem Magnetismus verhaftete, naturgemäß unvollständige, trotzdem in diesem Kapitel vorgenommene) Aufzählung einiger Protagonisten bis ins 19. Jhd. ergibt folgende chronologische Anordnung: Ladislaus Sunthaym (~ 1440 – 1512/13, Historiker, Geograph und ebenfalls die Genealogie der Babenberger – "Klosterneuburger Tafeln"), Johannes Stabius-Stöberer (1450–1522, Geographie, erster Kartenprojektions-Theoretiker der Neuzeit, Begründer der zweiten Wiener Mathematiker-, Astronomen- und Kartographen-Schule, erste gedruckte Sternkarte, herzförmiger Projektion = Stab-Wernersche Projektion), Sigismund von Herberstein (1486 – 1566, Gesandtschaftsreise nach Moskau, erste kartographische Aufnahme Moskaus), Wolfgang Lazius (1514 – 1565, Kartographie, erster österreichischer Atlas, Typi Chorographici Prov. Austriae), Paulus Fabricius (1519 – 1589, erste Karte von Mähren), Johannes Clobucciarich (~ 1545/50 – 1605; Landesaufnahmen Innerösterreichs), Warmund Ygl (–1611, Tirolkarte 1604/1605, über Tirol nach



**Abbildung A.8:** Modell eines chinesischen Si Nan (:= der Süd-Ausrichter) Kompasses, aus heutiger Sicht weltweit der Erste seiner Art, in diesem Fall aus der Han Dynastie, 2. Jhd. v. Chr. Der Si Nan in der Form des magnetischen Löffels auf einer bronzenen Platte war zur Navigation nicht geeignet. Die Erdplatte ist modelliert nach einem Fund in Lo-Lang, Korea. Sie besitzt 24 Bereiche mit 48 Unterteilungen.

Graz weiter nach Prag zur Zeit Keplers), Matthias Burgklechner (1573 – 1642, Tirolkarten von 1608, 1611&1629, 1626, darunter die "Adlerkarte"), Martin Zeiller (1589 – 1661, Topographie, Kartographie), Clemens Beuttler (1623 – 1682, Topographie, Kartographie), Georg Matthäus Vischer (1628 – 1696, Topographie, Kartographie – besonders die lagerichtige Steiermark-Karte mit zahlreichen Orten, Flüssen und Tälern), Matthäus Seutter (1678 – 1757, Kartographie – farbige, detaillierte Steiermark-Karte), Joseph Marx Freiherr von Liechtenstein (1765 – 1828, Begründer der Wirtschaftsgeographie, Kartographisches Institut, Cosmographische Gesellschaft, 42 Kartenwerke), P. Ehrenbert Xaver Friedel (Fridelli) (1673 – 1743, Kartographie Chinas), P. Augustin Hallerstein SJ (1703 – 1774, Astronomie Chinas), P. Joseph Tieffenthaler SJ (1710 – 1785, Indien, indische Geographie, Ganges, Dhaulagiri), Peter Anich (1723 – 1766, Geodät, Kartograph), Blasius Hueber (1735 – 1814, Landvermesser), Joseph Karl Kindermann (1744 – 1801, 8 Karten der österreichischen Länder), Franz Johann Joseph von Reilly (1766 – 1820, Kartograph, Verleger).

Im Zusammenhang mit Globen, allerdings aus ganz anderen Gründen, sei Martin Behaim (1459 – 1507) mit seinem "Erdapfel" (er spiegelt die Weltsicht am Ende des Mittelalters wider) erwähnt, es handelt sich um den ältesten existierenden Erdglobus aus 1492. Er war ebenfalls eine zentrale Figur in der portugiesischen Seefahrt, hatte möglicherweise in seiner Jugend Kontakte zu Regiomontanus (und damit Wissen z. B. über Jakobsstab und Ephemeriden-Tabellen) und später in Lissabon, wiederum eine Vermutung – als Mitglied der "Junta dos matemáticos" – zu Kolumbus. Mit den Entdeckungsfahrten im Konnex zu Behaim sind ebenfalls Maximilian I. (HRR) und Hieronymus Münzer (~ 1437 – 1508) zu erwähnen.

### Mathematische Beschreibung

Nachdem keine freien magnetischen Monopole existieren, d. h. Quellenfreiheit des magnetischen Feldes gegeben ist,  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ , wenn lokale Ströme und zeitlich veränderliche elektrische Felder vernachlässigt werden, so daß  $\nabla \times \vec{B} = 0$  gilt, d. h. laut Ampere'schem Gesetz keine Wirbel von  $\vec{B}$  vorliegen, kann das magnetische Feld als Gradient eines harmonischen Skalarpotentials  $V_M$  mit  $\vec{B} = -\nabla V_M$  ausgedrückt werden. Wenn  $\vec{B}$  rotationsfrei ist, liefert die sphärisch harmonische Expansion des Potentials  $V_M$  im allgemeinen die Terme proportional zu  $1/r^{l+1}$  (aufgrund interner Quellen) und  $r^l$  für externe Quellen wie der Ionosphäre. Somit ergibt sich für das Skalarpotential mit (i) Kugelfunktions-Analyse (Spherical Harmonics Analysis, SHA)

$$V_M = \frac{1}{R} \sum_{l \geq 1} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos \theta) \times \\ \left[ [c_{lm}(r/R)^l + (1 - c_{lm})(R/r)^{l+1}] C_{lm} \cos(m\phi) + \right. \\ \left. [s_{lm}(r/R)^l + (1 - s_{lm})(R/r)^{l+1}] S_{lm} \sin(m\phi) \right], \quad (\text{A.99})$$

siehe ebenfalls Gl. A.132 und Gl. A.151, dabei sind  $\theta$  und  $\phi$  die geografische Breite (Polwinkel, colatitude) und Länge und  $R_E$  der mittlere Erdradius. Die dimensionslosen Koeffizienten  $c_{lm}$  und  $s_{lm}$ , sie liegen im Wertebereich [0,1], beschreiben die Beiträge der externen Quellen. Im Gegensatz zum Geopotential werden in geomagnetischen Arbeiten die assoziierten Legendre Funktionen  $\bar{P}_{lm}(\cos \theta)$  normalisiert, und zwar mit der Definition

$$\bar{P}_{lm}(\cos \theta) = N'_{lm} P_{lm}(\cos \theta) = \left\{ (2 - \delta_{m0}) \frac{(l - m)!}{(l + m)!} \right\}^{1/2} P_{lm}(\cos \theta), \quad (\text{A.100})$$

für gewöhnlich Quasi-Normalisierung bezeichnet. Ist das Potential  $V_M$  gegeben erhält man das magnetische Feld durch

$$B_r = -\partial/\partial r(V_M), \quad B_\theta = -r^{-1}\partial/\partial\theta(V_M), \quad B_\phi = -(r \sin \theta)^{-1}\partial/\partial\phi(V_M). \quad (\text{A.101})$$

Allerdings erzeugen elektrischen Ströme, z. B. in der Ionosphäre, und zeitabhängige elektrische Felder Wirbel des magnetischen Feldes – das Ampere'sche Gesetz – und benötigen zusätzlich zum Skalarpotential ein Vektorpotential. Die Darstellung A.101 mit A.99 hat somit nur eingeschränkte Gültigkeit. Das intern

generierte Feld von A.99 kann geschrieben werden als

$$V_M = R \sum_{lm} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \bar{P}_{lm}(\cos\theta)(g_{lm} \cos(m\phi) + h_{lm} \sin(m\phi)) \quad (\text{A.102})$$

mit den Gauß'schen Koeffizienten  $g_{lm} = (1 - c_{lm})C_{lm}/R^2$  und  $h_{lm} = (1 - s_{lm})S_{lm}/R^2$  in der Dimension des magnetischen Feldes. Die  $l = 1$  Terme geben das Dipolfeld;  $g_{10} = d_z/R^3$ ,  $g_{11} = d_x/R^3$ ,  $h_{11} = d_y/R^3$  (mit  $d_x, d_y, d_z$  als geografische Komponenten des magnetischen Dipols); der Neigungswinkel beträgt  $\delta_M = \arctan[(g_{11}^2 + h_{11}^2)^{1/2}/g_{10}]$ . Die Lowes-Mauersberger Funktion errechnet sich zu  $R_l = (l+1)(R/r)^{2l+4} \sum_{m=0}^l (g_{lm}^2 + h_{lm}^2)$  in  $\text{nT}^2$ , sie beschreibt die mittlere quadratische Stärke des Feldes über der Oberfläche der Sphäre als Funktion der sphärischen Harmonischen. Alternativen zur SHA sind (i) Wavelets (lokale Basis)

$$\mathcal{F}_i(\theta, \phi) = \sum_{n,m}^N f_n Y_n^m(\theta_i, \phi_i) Y_n^m(\theta, \phi), \quad (\text{A.103})$$

(ii) Kugelfunktions-Analyse eines Teilbereiches (Spherical Cap Harmonics Analysis, SCHA)

$$V_i(\theta, \phi, r, t) = a \sum_{k \geq m} \sum_{m \geq 0} (a/r)^{n_k+1} (G_{n_k}^m(t) \cos(m\phi) + H_{n_k}^m(t) \sin(m\phi)) P_{n_k}^m(\cos\theta), \quad (\text{A.104})$$

(iii) Äquivalenter Dipol (Equivalent Source Dipole, ESD)

$$V_i = -\vec{M} \cdot \nabla \frac{1}{l}, \quad \text{mit } l = (r_d^2 + r^2 - 2r_d r [\cos(\theta) \cos(\theta_d) + \sin(\theta) \sin(\theta_d) \cos(\phi - \phi_d)])^{1/2}. \quad (\text{A.105})$$

### A.1.5 Galaktische, extragalaktische, interstellare, initiale Felder – Dynamos

Eine Reihe von Beobachtungen läßt vermuten, daß magnetische Felder in allen Galaxien und Galaxienhaufen vorhanden sind. Diese Felder charakterisieren sich durch relativ kleine Feldstärken im Bereich von  $10^{-7} - 10^{-5}$  G und große räumliche Ausdehnung  $\lesssim 1$  Mpc. Umfangreiche Daten und Darstellungen in diesem Kapitel basieren auf [Widrow, 2002].

Es wird allgemein angenommen, daß magnetische Felder in Spiralgalaxien durch eine kombinierte Wirkung von differentieller Rotation und helikaler Turbulenz herrühren, ein Vorgang bekannt als  $\alpha\Omega$  Dynamo. Es sind jedoch grundlegende Fragestellungen betreffend der Natur des Dynamos als auch des Ursprungs der notwendigen initialen Felder unklar. Weiters vermag der Standard  $\alpha\Omega$  Dynamo die Existenz von magnetischen Feldern in elliptischen Galaxien und Galaxienhaufen nicht erklären.

#### Einführung, kurzer Abriss

Magnetische Felder wurden entdeckt in allen Typen von Galaxien und in Galaxienhaufen wann auch immer die geeigneten Beobachtungen durchgeführt wurden, inklusive ihrer Existenz in Galaxien mit höherer Rotverschiebung  $z$ .

Es wird allgemein angenommen, daß großräumige magnetische Felder gemessen in Scheibengalaxien durch den  $\alpha\Omega$  Dynamo verstärkt und erhalten werden. Dabei werden neue Felder durch kontinuierliche und kombinierte Wirkung von differentieller Rotation –  $\Omega$  – und helikaler Turbulenz –  $\alpha$  – erzeugt. Im Gegensatz dazu zeigen magnetische Felder in nicht- oder langsam-rotierenden Systemen, etwa in elliptischen Galaxien und in Galaxienhaufen, eine charakteristische Kohärenzlänge wesentlich kleiner als die Größe des Systems selbst. Diese Felder werden möglicherweise erzeugt durch lokale, turbulente Dynamos. Durch die Abwesenheit von rascher Rotation besteht keine Organisation auf großen Skalen.

Das Dynamoparadigma muß als unvollständig angesehen werden, es erklärt nicht den Ursprung der initialen Felder die nachfolgend der Dynamowirkung unterliegen. Weiters ist die Zeitskala der Verstärkung des Feldes im Standard  $\alpha\Omega$  Dynamo zu lang um die beobachteten Felder in sehr jungen Galaxien zu erklären. Es ist zweifelhaft ob magnetische Felder je eine wichtige Rolle in der Entstehung von großräumigen Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen gespielt haben. In heutigen Spiralgalaxien ist die Energie des magnetischen Feldes klein verglichen mit der Rotationsenergie der Scheibe. Magnetfelder sind allerdings

eine wichtige Komponente des interstellaren Mediums (ISM), die Energiedichte ist vergleichbar mit jener der kosmischen Strahlung und der turbulenten Bewegungen des interstellaren Gases. Des weiteren können magnetische Felder Drehmoment aus protostellaren Wolken entfernen und damit Sternbildung beeinflussen. Magnetfelder haben damit eine unterstützende Funktion in der Formierung und Evolution von Galaxien und Haufen, sind aber wahrscheinlich nicht essentiell um Vorgänge bei großräumigen Strukturen im Universum zu erklären.

**Magnetohydrodynamik und Plasmaphysik** Magnetohydrodynamik (MHD) immer in Verbindung mit Plasmaphysik beschreiben die Interaktion zwischen elektromagnetischen Feldern und leitfähigen Fluiden. Die MHD als Näherung ist gültig wenn Effekte mit Ladungstrennung vernachlässigbar sind. Materie wird beschrieben durch ein Dichtefeld  $\rho(\vec{x}, t)$ , Geschwindigkeitsfeld  $\vec{V}(\vec{x}, t)$ , Druck  $p(\vec{x}, t)$  und Stromdichte  $\vec{J}(\vec{x}, t)$ . Die meisten astrophysikalischen Fluids sind nichtrelativistisch und elektrisch neutral, mit den Maxwell'schen Gleichungen und dem Ohm'schen Gesetz erhält man die idealen MHD Gleichungen

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}, \quad (\text{A.106})$$

der molekulare Diffusionskoeffizient  $\eta = c^2/4\pi\sigma$  wird räumlich konstant angenommen. Im Limit von unendlicher Leitfähigkeit kann magnetische Diffusion vernachlässigt werden und die MHD Gleichungen bekommen die Form

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}), \quad (\text{A.107})$$

oder äquivalent

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{V} - \vec{B}(\nabla \cdot \vec{V}), \quad (\text{A.108})$$

dabei ist  $d/dt = \partial/\partial t + \vec{V} \cdot \nabla$  die konvektive Ableitung. Die Interpretation dieser Gleichung sagt aus, daß der Fluß durch eine Schleife, die sich mit dem Fluid bewegt, konstant bleibt, d. h. magnetische Feldlinien sind in die Flüssigkeit "eingefroren".

### Beobachtungen von kosmischen magnetischen Feldern

Die Messungen von galaktischen und extragalaktischen Feldern, siehe Tab. A.1, können wie folgt zusammengefaßt werden: (i) Magnetische Felder mit Stärken von  $\sim 10 \mu\text{G}$  werden in Spiralgalaxien gemessen. Diese Felder beinhalten eine großräumige Komponente mit Kohärenzlängen vergleichbar der Größe der Scheibe. Es sind ebenfalls kleinräumige verwickelte Felder mit Energiedichten vergleichbar mit derjenigen der kohärenten Komponente vorhanden. (ii) Das magnetische Feld von Spiralgalaxien zeigt oft Muster und Symmetrien in Bezug auf die Spinachse und Äquatorialebene der Galaxie. (iii) Magnetische Felder sind allgegenwärtig in elliptischen Galaxien, allerdings im Gegensatz zu Feldern in Spiralgalaxien erscheinen sie stochastisch mit Kohärenzlängen wesentlich kleiner als die galaktischen Ausmaße. Magnetische Felder werden ebenfalls in irregulären und anderen Typen von Galaxien gefunden, (iv)  $\mu\text{G}$  Felder befinden sich im ICM von Haufen mit einer großen Anzahl an Galaxien, die Kohärenzlänge dieser Felder ist vergleichbar der Größe des Galaxienhaufens. (v) Es gibt starke Hinweise für magnetische Felder auf galaktischer Skala bei Rotverschiebungen  $z \sim 0.4$  in Spiralen. Außerdem wurden  $\mu\text{G}$  Felder in Radiogalaxien bei  $z \gtrsim 2$  gemessen. Magnetische Felder könnten ebenfalls in Ly $\alpha$  Systemen bei kosmologischen Rotverschiebungen existieren. (vi) Es gibt keine Beobachtung von reinen kosmologischen Feldern, d. h. Felder die nicht im Zusammenhang mit gravitativ gebundenen oder kollabierenden Strukturen stehen. Eingrenzungen für kosmologische magnetische Felder wurden abgeleitet aus Betrachtungen von Effekten auf die BBN, CMB und polarisierte Strahlung von extragalaktischen Quellen. Es bleiben Fragen nach Ursprung und Evolution der magnetischen Felder und deren erstmaliges Auftreten in jungen Galaxien, verbunden mit der dynamischen Entwicklung der Galaxie und der Stärke im intergalaktischen Raum.

Magnetische Felder sind ausschlaggebend in (i) kosmischen Radioquellen, (ii) für die Physik der kosmischen Strahlung (Seite 184) sowohl bei der Erzeugung als auch bei der Ausbreitung. Weiters würde die Sternentstehung völlig unterschiedlich verlaufen, sowohl in Bezug auf die Rate als auch Form der anfänglichen Massenfunktion (initial mass function, IMF; Salpeter-Funktion  $dN/d \ln M \propto M^{-\alpha}$ ,  $\alpha \sim 1.35$  mit  $N$

	Gesamtfeld $\sim \langle B \rangle$	Anmerkung
Galaxie	$6 \mu\text{G}$	Sonnensystem Nähe (Umgebung $\sim 1 \text{ kpc}$ )
Galaktisches Zentrum	$50 - 100 \mu\text{G}$	
Galaxie	$10 \mu\text{G}$	innere Spiralarme
Galaxie	$1.4 \mu\text{G}$	mittlers lokales reguläres Feld
Galaxie	$4.4 \mu\text{G}$	Norma Arm, mittleres reguläres Feld
Spiralarme, Galaxien Balken	$20 - 30 \mu\text{G}$	
Sternentstehungsgebiete	$50 - 100 \mu\text{G}$	zentrale Bereiche
Spiralgalaxien	$10 \mu\text{G}$	mittlere Felder
Radiolose Galaxien	$5 - 7 \mu\text{G}$	M31, M33
Gasreiche Spiralen	$20 - 30 \mu\text{G}$	hohe Sternbildungsrate: M51, M83, NGC6946
Starburst Galaxien	$50 - 100 \mu\text{G}$	M82
Intergalaktisches Feld	$10^{-15} \text{ G}$	mittels AGN bestimmt

**Tabelle A.1:** Magnetfelder auf großräumigen Strukturen in verschiedenen Bereichen der Milchstraße, von unterschiedlichen Galaxien und im intergalaktischen Medium.

der Anzahl der erzeugten Sterne als Funktion der stellaren Masse  $M$ , ursprünglich verbunden mit Edwin E. Salpeter, siehe Seite 147), wenn kein Magnetfeld vorhanden wäre. Das Feld modifiziert die Jeans-Masse und trägt bei zum Transfer von Drehmoment in Protosternen. Sogar einige Radiogalaxien bei höchster Rotverschiebung haben Radiokeulen bis zu 50 kpc in Größe und enthalten geordnete Felder von  $10^{-5} \text{ G}$ , das impliziert einen Fluß in der Größenordnung von  $10^{41} \text{ Gcm}^2$ .

Es gibt vier herkömmliche Methoden um magnetische Felder zu bestimmen: (i) Synchrotronemission, (ii) Faradayrotation, (iii) Zeemanaufspaltung und (iv) optische Polarisation von Sternenlicht

**Emission von Synchrotronstrahlung** Synchrotronstrahlung, erzeugt durch relativistische Elektronen spiralisierend entlang magnetischer Felder, wird verwendet, um magnetische Felder von astrophysikalischen Quellen im Bereich von Pulsaren bis Superhaufen zu untersuchen. Die (i) gesamte Synchrotronemission einer Quelle liefert eine der zwei primären Abschätzungen für die Stärke des Magnetfeldes in Galaxienhaufen, (ii) der Grad der Polarisation ist ein wichtiger Indikator für die Gleichförmigkeit und Struktur des Feldes.

Für ein einzelnes Elektron im magnetischen Feld  $\vec{B}$  ist die Emissivität als Funktion der Frequenz  $\nu$  und der Elektronenenergie  $E$  gegeben durch

$$J(\nu, E) \propto B_{\perp} \left( \frac{\nu}{\nu_c} \right)^{1/3} f \left( \frac{\nu}{\nu_c} \right), \quad (\text{A.109})$$

mit  $B_{\perp}$  als Komponente des magnetischen Feldes senkrecht zur Blickrichtung,  $\nu_c \equiv \nu_L (E/mc^2)^2$  ist die sogenannte kritische Frequenz,  $\nu_L = (eB_{\perp}/2\pi mc)$  die Larmor Frequenz und  $f(x)$  eine cut-off Funktion mit der Eigenschaft  $x \rightarrow 0$  für  $x \gg 1$ .

Die gesamte Synchrotronemission einer gegebenen Quelle hängt ab von der Energieverteilung der Elektronen  $n_e(E)$ . Eine allgemein verbreitete Klasse von Modellen basiert auf Potenzgesetz-Verteilungen

$$n_e(E)dE = n_{e0} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} dE, \quad (\text{A.110})$$

die Gültigkeit wird impliziert über einen gewissen Energiebereich. Der Exponent  $\gamma$  wird als Spektralindex bezeichnet, die Konstante  $n_{e0} \equiv n_e(E_0)$  bestimmt die Normalisierung der Verteilung. Ein Spektralindex  $\gamma \sim 2.6 - 3.0$  ist typisch für Spiralgalaxien.

Die Synchrotron-Emissivität ist  $j_{\nu} \equiv \int J(\nu, E)n_e(E)dE$ . Gleichung A.109 zeigt, daß die Synchrotronemission bei der Frequenz  $\nu$  durch Elektronen mit der Energie  $E \sim m_e c^2 (\nu/\nu_L)^{1/2}$  dominiert wird, d. h.  $\nu \approx \nu_c$  und eine gute Näherung kann geschrieben werden als  $J(\nu, E) \propto B_{\perp} \nu_c \delta(\nu - \nu_c)$ . Für die

Potenzgesetz-Verteilung A.110 ergibt sich

$$j_\nu \propto n_{e0} \nu^{(1-\gamma)/2} B_\perp^{(1+\gamma)/2}. \quad (\text{A.111})$$

Synchrotronemission für ein einzelnes Elektron weist elliptische Polarisation auf, die Emission von einem Ensemble von Elektronen ist demnach nur teilweise polarisiert.

**Faradayrotation** Bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen durch ein Medium mit magnetischem Feld und freien Elektronen tritt Faradayrotation auf, links- und rechtszirkular polarisierte Wellen erfahren unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten. Für linear polarisierte Strahlung ist das Resultat eine Rotation des elektrischen Feldes in der Zeit, oder äquivalent in Pfadlänge, um einen Winkel

$$\varphi = \frac{e^3 \lambda^2}{2\pi m_e^2 c^4} \int_0^{l_s} n_e(l) B_\parallel(l) dl + \varphi_0 = RM \lambda^2 + \varphi_0, \quad (\text{A.112})$$

mit  $m_e$  der Masse des Elektrons,  $\lambda$  der Wellenlänge der Strahlung,  $\varphi_0$  ist der anfängliche Polarisationswinkel und  $B_\parallel$  die Komponente in Blickrichtung des Magnetfeldes. Dabei ist  $n_e(l)$  die Dichte der thermischen Elektronen entlang der Sichtlinie von der Quelle  $l = l_s$  zum Beobachter  $l = 0$ . Die Größe  $\varphi$  wird für gewöhnlich geschrieben in Einheiten des Rotationsmaßes  $RM$

$$RM \equiv \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int_0^{l_s} n_e(l) B_\parallel(l) dl \sim 810 \frac{\text{rad}}{\text{m}^2} \int_0^{l_s} \left( \frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_\parallel}{\mu\text{G}} \right) \left( \frac{dl}{\text{kpc}} \right). \quad (\text{A.113})$$

Im Allgemeinen muß der Polarisationswinkel in drei oder mehreren Wellenlängen bestimmt werden um  $RM$  entsprechend genau festlegen zu können und um die  $\varphi \equiv \varphi + 2\pi$  Mehrdeutigkeit zu entfernen.

Durch Konvention ergibt sich  $RM$  positiv wenn das magnetische Feld Richtung Beobachter gerichtet ist, entsprechend negativ für Felder in Quellrichtung. Faradayrotation von einer ausgedehnten Quelle führt zu einer Abnahme der Polarisation. Das kombinierte Signal von Wellen mit Ursprung aus unterschiedlichen Regionen erfährt unterschiedliche Beträge an Faradayrotation, somit ergibt sich ein Verbreiterung in den Polarisationsrichtungen. Diese Faradaydepolarisation kann wichtige Aufschlüsse bezüglich des Magnetfeldes in Vordergrund einer Quelle mit polarisierter Synchrotronemission liefern.

**Zeemanaufspaltung** Im Vakuum sind die energetischen Stufen eines Atoms unabhängig von der Richtung seines Drehmomentvektors. Ein magnetisches Feld bricht diese Energieentartung auf, es ergibt sich eine bestimmte Vorzugsrichtung im Raum. Wenn das Gesamtdrehmoment eines Atoms  $\vec{J}$  (Summe aus Spin  $\vec{S}$  und Bahndrehmoment  $\vec{L}$ ) gegeben ist, dann sind  $2j + 1$  Level vorhanden,  $j$  ist die Quantenzahl in Verbindung mit  $\vec{J}$ . Die Aufspaltung zwischen benachbarten Niveaus ist  $\Delta E = g\mu B$  mit  $g$  dem Landé Faktor. Er setzt das Drehmoment des Atoms in Beziehung zu seinem magnetischen Moment,  $\mu = e\hbar/2m_e = 9.274 \times 10^{-24}$  J/T ist das Bohr'sche Magneton. Die Zeemanaufspaltung (Pieter Zeeman, 1865 – 1943) wurde von George Ellery Hale (1868 – 1938) vor etwas mehr als einem Jahrhundert (1908) verwendet um die magnetischen Felder von Sonnenflecken zu bestimmen, gleichzeitig die erste bekannte Erwähnung eines extraterrestrischen magnetischen Feldes. Sie ist die direkteste Methode zur Bestimmung von astrophysikalischen magnetischen Feldern. Sobald  $\Delta E$  gemessen wurde kann  $\bar{B}$  unmittelbar bestimmt werden, ohne zusätzliche Annahmen. Weiters ist Zeemanaufspaltung sensitiv gegenüber regulären Feldern der Quelle, im Gegensatz zur Synchrotronemission und Faradayrotation, beide sind bestimmt durch das Feld entlang der Sichtverbindung.

In der Praxis ist der Zeemaneffekt schwierig auszunutzen, die Linienverschiebung in Verbindung mit der Energieaufspaltung beträgt

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 1.4 g \left( \frac{B}{\mu\text{G}} \right) \left( \frac{\text{Hz}}{\nu} \right). \quad (\text{A.114})$$

Innerhalb von Galaxien bestimmen Messungen mit Hilfe des Zeemaneffektes die Felder in Bereichen mit aktiver Sternbildung und in der Nähe des galaktischen Zentrums. Momentan gibt es keine entsprechend gesicherten Bestimmungen der Felder durch Zeemanaufspaltung bei Systemen außerhalb unserer Galaxie.

**Polarisation von optischem Sternenlicht** Polarisiertes Licht von Sternen kann großräumige magnetische Felder in der Milchstraße und benachbarter Galaxien erkennbar machen. Die Existenz von galaktischen magnetischen Feldern im Zusammenhang mit dem Einschluß kosmischer Strahlung wurde von Hannes Alfvén und Enrico Fermi (1901 – 1954) vorgeschlagen. Eine Verbindung zwischen polarisiertem Sternenlicht und galaktischen magnetischen Feldern besteht darin, daß gestreckte Staubkörner eine bevorzugte Orientierung im Magnetfeld einnehmen (Davis-Greenstein Effekt). Somit ist die optische Polarisation ein Resultat von Extinktion durch Staubpartikel in der LOS durch Ausrichtung im interstellaren magnetischen Feld. ESA's Planck Satellit hat die polarisierten Staub-Emissionen (Richtungen/Polarisationen bei 353 GHz; Emissionen bei {353, 545, 857} GHz) auf der kompletten Sphäre abgebildet und liefert damit ein detailliertes Bild des Magnetfeldes der Milchstraße, z. B. die turbulenten Strukturen bei der Sternentstehung in der Orion Molekülwolke ca. 1300 Lj entfernt.

Polarisiertes Sternenlicht liefert Informationen die komplementär zu denen von Radiobeobachtungen sind. Die Detektion und Messung des Zeeman-Effektes bei Sternen im optischen Bereich erfolgte erstmals durch Horace Welcome Babcock (1912 – 2003) im Jahre 1947. Beobachtungen von Polarisation des optischen Sternenlichtes wurden erstmals 1949 erzielt, kombiniert mit Interpretationen des Davis-Greenstein Effektes ließen auf magnetische Felder in der Milchstraße (interstellares Medium) schließen. Stellare magnetische Felder wurden über das gesamte Hertzsprung-Russell Diagramm gefunden.

Detektion und Spektroskopie von zirkular polarisiertem Licht mit Teleskopen könnte ebenfalls der Schlüssel zur Identifikation von Biosignaturen bei Exoplaneten sein, z. B. bei Proxima Centauri b, 4.24 Lj Erdentfernung zum Roten Zwergstern der Klasse M6 (allerdings ist Proxima Centauri ein Flarestern mit hoher magnetischer Aktivität) und in der habitablen Zone. Starke elektronische Absorptionsbänder sind charakteristisch bei Photosynthese und liefern zirkularen Dichroismus, d. h. unterschiedliche Absorptionskoeffizienten für rechts- und links-zirkular polarisiertes Licht. Organische Moleküle existieren typischerweise in 2 Formen, (i) alle bekannten lebenden Organismen haben ausschließlich linkshändige l-Amino-Säuren in Proteinen und (ii) rechtshändiger (d-Zucker) existiert in Nuklein-Säuren. Diese einzigartige Bevorzugung für eine Händigkeit wird Homochiralität bezeichnet. Daneben gibt es eine ganze Reihe an weiteren Biomarkern und Bioindikatoren, sowohl in-situ als auch mit Methoden der Fernerkundung.

Der griechische Philosoph Metrodoros von Chios schrieb bereits im  $\sim 5 - 4$ . Jahrhundert v. Chr., Aätius Placita i.5.4:

*Die Erde als die einzige bevölkerte Welt im unendlichen All anzusehen, ist ebenso absurd wie die Behauptung, auf einem ganzen, mit Hirse gesäten Feld würde nur ein einziges Korn wachsen.*

**Magnetfelder in großräumigen Strukturen, Galaxien und Haufen** Markante Werte wurden gemessen, aufgezählt an einigen Beispielen, siehe ebenfalls Tab. A.1, (i) im Halo von M82 mit  $B_{M82} = 10 - 50 \mu\text{G}$  bei kohärenten Zonen von  $\gtrsim 1$  kpc, (ii)  $B_{\text{cluster}} = (0.4 \pm 0.16)M^{0.5}h_{75}^{0.5} \mu\text{G}$ , mit  $M$  der mittleren Anzahl von Feldumkehrungen über die LOS zum Galaxienhaufen,  $M \approx 250$  für den Coma-Haufen,  $B_{\text{cluster}} = 7 - 8 \mu\text{G}$ , (iii)  $B_{\text{ICM}} \approx 3 - 12 \mu\text{G}$ , (iv) innerhalb von Röntgenhalos  $B_{\text{Xhalo}} \approx 30 \mu\text{G}$ .

Aufgrund der kosmischen Expansion erwartet man  $n_e(z) \propto (1+z)^3$  und  $B_{\text{IGM}} \propto (1+z)^\phi$ ,  $\phi \approx 2$ . Für ein  $\Lambda$ CDM Universum ( $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,  $H_0 = 75$  km/s/Mpc) in der heutigen Epoche ergibt sich ein oberes Limit für jedes kosmologisch ausgerichtete Feld  $B_{\text{IGM}} \lesssim 10^{-11}$  G, aktuelle Messungen mit Hilfe von AGNs und dem Fermi  $\gamma$ -Ray Teleskop zeigen Werte von  $B_{\text{IGM}} \approx 10^{-15}$  G. Das (i) intergalaktische Medium zeigt  $B_{\text{IGM}} \approx 10 \mu\text{G}$ , (ii) Kerne von dichten Galaxienhaufen haben einige  $\mu\text{G}$ , (iii) jenseits von Galaxienhaufen sind Werte des Feldes im Bereich  $0.1 - 1 \mu\text{G}$ .

Polarisierte Emissionen im {optischen, IR, submm, RF}-Bereich beinhalten den Schlüssel zu magnetischen Feldern in Galaxien. Das interstellare magnetische Feld wird erkennbar durch Synchrotronemission von Elektronen der kosmischen Strahlung. Radiosynchrotron-Daten von Galaxien ergeben eine (i) lokale Stärke des Gesamtfeldes von  $B_{\text{lokal}} \approx 6 \mu\text{G}$  und (ii) in der inneren Galaxie  $B_{\text{kernel}} \approx 10 \mu\text{G}$ . Es ergibt sich für (i) M31  $B_{M31} \approx 6 \mu\text{G}$  (große Spirale mit schwacher Aktivität von Sternbildung und geringer Radiooberflächen-Helligkeit), (ii) M51, M83, NGC6946 ein  $B \approx 15 \mu\text{G}$  (typische mittlere Feldstärke; grand-design Galaxien, massive Sternbildung), bei (iii) M51  $B_{M51} \approx 25 - 30 \mu\text{G}$  im markanten Spiralarm, (iv) M81 (Bode Galaxie)  $B_{M81} \approx 50 \mu\text{G}$  (Starburst-Galaxie), (v) NGC4038 (Antennen-Galaxie), NGC1097 (sternbildenden Ring), NGC7552 ein  $B \approx 100 \mu\text{G}$ , Kompression des Feldes durch externe Kräfte und

Wechselwirkungen führen zu sehr starken Feldern.

Die Größe von aufgelösten regulären Feldern (i) in Spiralgalaxien beträgt  $B_{\text{reg}} = 1 - 5 \mu\text{G}$ , ungewöhnlich starke regulärer Felder sind in den Zwischenarmregionen von NGC6946  $B_{\text{NGC6946}} \approx 13 \mu\text{G}$  und (ii) am inneren Rand vom inneren Spiralarm von M51  $B_{\text{M51}} \approx 15 \mu\text{G}$ .

In der lokalen Milchstraße sind die Energiedichten (i) des stellaren Strahlungsfeldes, (ii) der turbulenten Gasbewegung, (iii) von kosmischer Strahlung und (iv) magnetischen Feldern ähnlich.

Messungen der Radiopolarisation zeigen, daß in den meisten Galaxien das reguläre Feld der Spiralstruktur, wie sie in Sternen und im Gas sichtbar ist, folgt (M51, M81, M83), allerdings zeigen Regionen mit den stärksten regulären Feldern im allgemeinen einen Offset von den Spiralarmen. Turbulente Felder, erkennbar durch unpolarisierte Emissionen, sind für gewöhnlich in Spiralarmen vergrößert und folgen der allgemeinen Skalierung mit der Gasdichte.

In Balkengalaxien ist die gesamte Radioluminosität (sie mißt das Gesamtmagnetfeld) am stärksten in Galaxien mit FIR Helligkeiten (hohe Rate an Sternbildungsaktivität), ein Resultat ähnlich dem von Galaxien ohne Balken. In Galaxien ohne Balken haben die Feldlinien im Großen und Ganzen Spiralform, sie folgen nicht der Gasbewegung und sind möglicherweise bestimmt durch Dynamowirkung. In starken Balkengalaxien folgt das Feld hauptsächlich dem Gasfluß, außer in stromaufwärtigen Regionen in denen ein geringe Neigung zum Balken erfolgt. Polarisierte Radioemission ist ein hervorragender Indikator für scherende Bewegungen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß physikalische Argumente über den Ursprung von galaktischen magnetischen Feldern auf eine primordiale Ursache mit einem Feld von der Größenordnung  $B \approx 10^{-8} \text{ G}$  hindeuten, noch bevor eine nachfolgende Evolution durch die akzeptierte  $\alpha\Omega$  Theorie stattfindet (schwaches Ursprungsfeld  $\rightarrow (\alpha\Omega \text{ Dynamo}) \rightarrow$  momentaner Wert).

Pulsare mit ihrer hochgradig polarisierten Strahlung sind hervorragende Proben des magnetischen Feldes der Galaxie, man kann sowohl  $RM$  als auch  $DM$  (Dispersionsmaß) bestimmen. Der Wert des mittleren magnetischen Feldes in der Sichtlinie (LOS) beträgt  $B_{\parallel} = 1.232RM/DM \mu\text{G}$ . In der Milchstraße existiert (i) ein großräumiges magnetisches Feld im Perseusarm (Richtung im Uhrzeigersinn) und (ii) im Sagittarius-Spiralarm ist eine großräumige Feldumkehr vorhanden (Gegenuhrzeigersinn).

Der maximale Beitrag eines regulären Magnetfeldes  $B$  zum gemessenen  $RM$  ist gegeben durch  $|RM|_{\text{max}} = 0.81n_eBL_B \approx 220 \text{ radm}^{-2}(n_e/0.03 \text{ cm}^{-3})(B/3 \mu\text{G})(L_B/3 \text{ kpc})$ , die LOS ist mit dem Feld ausgerichtet,  $n_e$  ist die mittlere Dichte von thermischen Elektronen, die Pfadlänge  $L_B$  ist beschränkt auf  $3 - 6 \text{ kpc}$  durch die Krümmung und endliche Breite der Spiralarme. Indes beträgt der rms Anteil der interstellaren Turbulenz zum  $RM$  entlang der Pfadlänge  $L$  durch die Milchstraße  $\sigma_{\text{RM}} = 0.81\sigma_n\sigma_b(2Ll)^{1/2} \approx 170 \text{ radm}^{-2}(\sigma_n/0.03 \text{ cm}^{-3})(\sigma_b/5 \mu\text{G})(l/0.1 \text{ kpc})^{1/2}(L/10 \text{ pc})^{1/2}$ , mit  $\sigma_n$  und  $\sigma_b$  den Standard-Abweichungen der thermischen Elektronendichte und dem Magnetfeld, die Größe der turbulenten Zelle beträgt  $l$ . Diese Gleichungen sind nur gültig wenn Fluktuationen in der thermischen Elektronendichte und im Magnetfeld statistisch unabhängig sind. Diese vereinfachende Annahme kann beträchtlich die Abschätzung des magnetischen Feldes, erhalten von Messungen mittels Faradayrotation, beeinflussen. Somit wird  $|RM|_{\text{max}} \approx \sigma_{\text{RM}}$  und es ergeben sich Daten mit einem SNR von  $\sim 1$ .

Polarisierte Radioemissionen sind Indikatoren für großräumige magnetische Felder, die  $H\alpha$  Spektrallinie markiert ionisiertes Gas. Das großräumige magnetische Feld ist stärker zwischen den Spiralarmen, z. B. bei NGC6946, d. h. dort wo die Gasdichte (sowohl gesamte als auch ionisierte) kleiner ist. Dieses Verhalten ist gerade umgekehrt das man von einem "eingefrorenen" Magnetfeld erwarten würde, welches mit Potenzen das Gasdichte skaliert (magnetischer Arm). NGC6946 ist einer der am besten studierten Fällen eines magnetischen Armes. Das Phänomen der magnetischen Arme bestätigt in eindrucksvoller Art und Weise, daß großräumige magnetische Felder nicht im interstellaren Gas eingefroren sind und deshalb auch nicht primordial sein können.

Kurz und bündig läßt sich sagen: Die Natur der magnetischen Arme ist nach wie vor unklar. In Spiralgalaxien gibt es zwei Arten von mesoskopischen magnetischen Strukturen, (i) magnetische Umkehrungen und (ii) magnetische Arme.

Diffuses interstellares HI ( $:=$ ) ist das Materiegefüge in dem viele molekulare Wolken vorhanden sind und in dem die Energieeinträge von Supernovae und interstellaren Winden aufgenommen werden. Diese Energien verursachen Turbulenzen im interstellaren HI.

Im diffusen HI ist der maximale Anteil an freien Elektronen zumindest gleich dem an schweren Elementen die ein Ionisationspotential unter dem von HI haben ( $\gtrsim 10^{-4}$ ), sogar in dunklen Regionen des Raumes

sind genügend Photonen des Sternenlichts um solche Elemente zu ionisieren. Als grobe Abschätzung kann ein Teil des interstellaren Gases als riesige Induktivität modelliert werden, die Abfallszeit  $\tau$  des Stromes – und somit des magnetischen Feldes – ist das Verhältnis von Induktivität und Widerstand,  $\tau \propto L^2/\eta$ , mit  $L$  als Längenskala und  $\eta$  als Widerstand.

Dichte Regionen von Molekülwolken kann von Sternenlicht nicht erreicht werden, die freien Elektronen stammen von der Ionisation des H durch kosmische Strahlung. Der Anteil an Ionisation ist klein genug damit langsame Ableitung, ein "auftauen", des eingefrorenen magnetischen Flusses stattfinden kann. Mit eingefrorenem Fluß ist (i) das magnetische Feld eine der dominierenden Kräfte im diffusen Gas, daneben existieren (ii) der Gasdruck (iii) Druck der kosmischen Strahlung und (iv) Gravitation.

Zeemanaufspaltung bestimmt die Feldstärke in den HI Regionen, sie sind in zwei thermischen Phasen: (i) kaltes neutrales Medium (cold neutral medium, CNM) und (ii) warmes neutrales Medium (warm neutral medium, WNM), jedes enthält ungefähr die Hälfte des Gesamtanteils. Typische magnetische Feldstärken sind  $B \sim 6 \pm 2 \mu\text{G}$ .

**Interstellare Felder, Sterne** Interstellare Magnetfelder sind in allen Fällen, mit Ausnahme von Masern, sehr klein und erzeugen eine Zeemanaufspaltung  $\Delta\nu_z$  wesentlich kleiner als die Linienbreite  $\delta\nu$ , somit ergibt sich für gewöhnlich  $\Delta\nu_z/\delta\nu \ll 1$ . Diese Relation zeigt, daß Messungen der Zeemanaufspaltung durch die Sensitivität limitiert sind. Aufspaltung kann somit nur bei Atomen oder Molekülen wenn sie entsprechend groß ist, d. h.  $\sim$  dem Bohr'schen Magneton  $e\hbar/2m_e$  entspricht, bestimmt werden. Moleküle müssen demnach ein großes magnetisches Moment  $\mu$  und einen entsprechenden Landéfaktor  $g$  besitzen. Es sind nur diejenigen Elemente mit einem elektronischen Drehmoment für Zeemanaufspaltung geeignet. Andere Moleküle haben Aufspaltungen  $\sim$  dem wesentlich kleineren nuklearen Magneton  $e\hbar/2m_n$ . Eine Ausnahme bilden Maser, bei ihnen ist  $B_{\parallel}$  einige mG in Regionen mit Dichten  $n \gtrsim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Bei einem gegebenen  $B_{\parallel}$  ergibt sich die Aufspaltung  $\Delta\nu_z$  abhängig von  $g$  und unabhängig von der Linienfrequenz selbst.

Obwohl die Stoke'schen Parameter  $V$ ,  $Q$  und  $U$  für die Zeeman Komponenten die volle Information über des magnetische Feld in Betrag und Richtung liefern, können in der Praxis aufgrund der Kleinheit von  $Q$  und  $U$  die Felder  $\vec{B}$  nicht vollständig bestimmt werden. Für den gewöhnlichen Fall einer geringen Aufspaltung  $\Delta\nu_z/\delta\nu \ll 1$  ist Zeemanaufspaltung im Stoke'schen  $V$  Spektrum (:= die Differenz zwischen den zwei zirkularen Polarisationen) meßbar. Das  $V$  Spektrum hat die Form der ersten Ableitung des Linienprofils (:= das Stoke'sche  $I$  Spektrum) mit einer Amplitude  $\propto B_{\parallel}/\delta\nu$ , dabei ist  $B_{\parallel}$  die LOS Komponente des Feldes. Aufgrund der Direktionalität im Zusammenhang mit der zirkular polarisierten Linienintensität wird  $B_{\parallel}$  anstatt von  $B_{tot}$  gemessen. Im Gegensatz dazu, bei  $\Delta\nu_z/\delta\nu > 1$ , ist der beobachtete Effekt die gesamte Aufspaltung  $\Delta\nu_z$ , sie ist  $\propto B_{tot}$  und nicht zu  $B_{\parallel}$ .

Zeemanaufspaltung der HI Line in Absorption war die ersten Methode zur Bestimmung des interstellaren Magnetfeldes, die Kleinheit ist typischerweise  $\Delta\nu_z/\delta\nu \lesssim 10^{-3}$ . Der Unterschied zwischen der regulären und den gesamten Komponenten ist der fluktuierende Beitrag, dessen Skalenlänge ist zumindest einige zehn pc. Die Ergebnisse legen den Schluß nahe, daß die magnetischen und turbulenten Energien nährungsweise im Gleichgewicht sind. Ambipolare Diffusion erlaubt ein langsames "auftauen" des "eingefrorenen" magnetischen Flusses.

OH Maser stehen in Zusammenhang mit der frühen Phase der Rate von massereicher Sternbildung, Spots kommen aus dichten Moleküleinhüllenden ( $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) der massereichen Sterne. In diesem Zusammenhang wird  $B_{tot}$  gemessen, die beiden Zeeman Paare sind im Allgemeinen getrennt. Feldstärken sind im Bereich  $B \sim 0.1 - 10 \text{ mG}$ . Im Gegensatz zum diffusen HI Medium spielt Gravitation in Molekülwolken eine wichtige Rolle. Stellare magnetische Felder wurden im gesamten Bereich des Herzprung-Russell Diagramms entweder direkt bestimmt oder auch geschlußfolgert aus anderen Messungen.

Der dynamische Effekt von großräumigen magnetischen Feldern auf gravitative Massen kann formal mit dem Chandrasekhar-Fermi Viralthorem abgeschätzt werden. Der Vergleich der gesamten magnetischen und gravitativen Energie führt auf das dimensionslose Fluß - Massen Verhältnis  $f \equiv F/(G^{1/2}M)$ , mit  $F$  dem magnetischen Fluß im Verbindung mit der Masse  $M$ . Die größten gemessenen Feldstärken eines nicht-kollabierten Sterns sind jene von Babcock's Ap Stern HD 215441 mit einem Oberflächenfeld (variiert bei unveränderter Polarität)  $\sim 3.4 \times 10^4 \text{ G}$ , HD 75049 erreicht ein Maximum von  $\sim 3 \times 10^4 \text{ G}$ . Über das Gros des Sterns ergibt sich  $f \ll 1$ , der Stern ist magnetisch schwach.

Der Zeeman-Effekt – und der mit ihm eng verbundene Paschen-Back Effekt – ermöglicht die Beobachtung von magnetischen Feldern im Bereich vom ISM, mit gemessenen Feldstärken in der Größe von einigen  $\mu\text{G}$ , bis zu Sternen auf der Hauptreihe, viele von ihnen mit Feldern von  $10^3\text{ G}$  und weißen Zwergen mit teilweise über  $1\text{ MG}$ , entsprechend 12 Größenordnungen. Der typische Abstand zwischen der  $\pi$  ( $\Delta M_J = 0$ ;  $\Delta M_J = 0, \pm 1$ ;  $M_J$  magnetische Quantenzahl) und einer der  $\sigma$  ( $\sigma_{\pm}$ ;  $\Delta M_J = \pm 1$ ) Gruppen beträgt  $\Delta\lambda_B = \bar{g}eB\lambda^2/4\pi mc$ , mit  $\bar{g}$  einer Zahl in der Größe von 1, unterschiedlich von einem Übergang zum Nächsten. In herkömmlichen Einheiten beträgt die Aufspaltung  $\Delta\lambda_B(\text{nm}) = 4.67 \times 10^{-3} \bar{g} B(\text{kG}) \lambda(\mu\text{m})^2$ . Bei Feldern in der Größenordnung  $10^2\text{ MG}$  wurde kontinuierliche lineare Polarisation gefunden, dieser Effekt ermöglicht die Bestimmung von extrem großen Feldern von weißen Zwergen. Die beobachteten  $B_z$  Werte in Molekülwolken reichen von  $10 - 20\ \mu\text{G}$  in Regionen mit injizierten Teilchendichten in der Größe von  $n \sim 10^3\ \text{H}_2$  Molekülen  $\text{cm}^{-3}$ , bis zu  $1\text{ mG}$  bei  $n \sim 10^5 - 10^6\ \text{cm}^{-3}$ .

Vorläufer von (i) Sternen niedriger Masse (Sonnentypus)  $\leftrightarrow$  T Tauri Sterne (CTTS, klassische (classical) TTS und WTTS, schwache (weak) TTS; der Unterschied ist eine massereiche Akkretions-Scheibe die CTTS umgibt)  $\leftrightarrow$  starke Oberflächenaktivität, d. h. Sternenflecken, Röntgenemissionen ( $\sim$  solaren magnetischen Aktivität) aber einigen Größenordnungen intensiver und (ii) mittlere und obere Hauptreihen Sterne mit mehreren  $M_{\odot}$   $\leftrightarrow$  Herbig Ae Sterne.

Der Fluß tritt in die Photosphäre in der Form von Flußröhren ein, mit Ausnahme der kleinsten Röhren beträgt die Feldstärke im Mittel  $\sim 1 - 2\text{ kG}$ . Zwischen den Flußröhren, d. h. über den größten Bereich der Oberfläche der Sonne, ist die Feldstärke beträchtlich kleiner. Das solare Feld dominiert die Struktur in der Chromosphäre und Korona. Die Photosphäre, in ihr haben 99% der Fläche schwache oder vernachlässigbare Felder, hat eine nahezu konturlose und uniforme Erscheinung, mit Ausnahme von Regionen wo die größten Flußröhren als Sonnenflecken auftreten und bei der homogenen Granulation, sie zeigt die äußere Berandung der Konvektionszone. Das solare Feld ändert sich auf Skalen von (i) Minuten, Stunden (Flares)  $\rightarrow$  plötzliche Reorganisation  $\rightarrow$  große Energiefreisetzung, (ii) schwache Intervalle (Sonnenflecken, Gruppen von Flecken) und (iii) Sonnenzyklus 11 Jahre, siehe Kap. A.2.2. Das solare magnetische Feld bedeckt nur  $\sim 1\%$  der Oberfläche. CaII, H und K Linienemissionen – alles zuverlässige Indikatoren von magnetischer Aktivität – werden regelmäßig gemessen und sind für gewöhnlich veränderlich. Solare Röntgenstrahlung ist ein ebenfalls robuster Indikator für magnetische Aktivität. Stellares Aufflackern wird sowohl im Röntgen- als auch mit Radiobereich gemessen, indirekt ebenfalls bei VLF, siehe ab Seite 32.

**Obere und untere Hauptreihensterne** Starke Anzeichen der solar-stellaren Verbindung lassen vermuten, daß "solare" Aktivität, und somit auch magnetische Felder, in allen "late-type" (Klasse K, M) Sternen vorhanden ist und eine breite Korrelation zwischen den Aktivitätspegeln und der Rotationsrate  $\Omega$  des Sterns besteht. Im Gegensatz dazu zeigen "early type" (O, B, A, F0-F5) Sterne eine Antikorrelation zwischen  $\Omega$  und dem Oberflächenfeld  $B_s$ . Extreme Objekte wie (i) Weiße Zwerge haben einige  $10^8\text{ G}$  und (ii) Neutronensterne ein Oberflächenfeld von  $\sim 10^{12}\text{ G}$ .

**Spiralgalaxien** Spiralgalaxien sind bevorzugte Objekte für Studien kosmischer magnetischer Felder. Es existieren Abschätzungen für magnetische Feldstärken in einer steigenden Anzahl von Spiralen, für eine gewisse Untermenge davon gibt es detaillierte Untersuchungen der magnetischen Struktur und Morphologie. Das magnetische Feld von Galaxien wird bestimmt mit Hilfe von Synchrotronemission, Faradayrotation, optische Polarisation und Zeemanaufspaltung (Seite 108 ff.), letztere erlaubt direkte in-situ Bestimmung der magnetischen Feldstärke an spezifischen Orten in der Galaxie.

Messungen des 21 cm Zeemaneffektes in galaktischen HI Regionen (Hyperfeinstrukturübergang; Spin-Flip des Elektrons bei  $1420.4057517667(10)\text{ MHz}$ ) zeigen geordnete Strukturen magnetischer Felder mit  $\bar{B} \sim 2 - 10\ \mu\text{G}$ , die höheren Werte stammen von Dunkelwolken und HI Sphären. Ähnliche Werte für galaktische Felder erhält man bei Durchmusterungen von galaktischen und extragalaktischen Quellen mittels Faradayrotation.

Die magnetischen Felder scheinen keine große Abhängigkeit vom Galaxientyp zu zeigen. Frühtyp Galaxien haben einen etwas höheren Mittelwert, einige wenige zeigen anomale starke magnetische Felder. Ein bekanntes Beispiel ist M82, die Feldstärke abgeleitet aus Radiokontinuums-Beobachtungen ist  $\sim 50\ \mu\text{G}$ . Diese Galaxie zeichnet sich durch eine extrem hohe Rate an Sternbildung aus. Allerdings gibt es auch Messungen des magnetischen Feldes von  $B \approx 83.9 \pm 8.8\ \mu\text{G}$  in einer Galaxie mit Rotverschiebung  $z = 0.692$

unter Verwendung von Zeemanaufspaltung, die selbe Technik ergibt einen Mittelwert von  $B \approx 6 \mu\text{G}$  für das neutrale interstellare Gas in unserer Galaxie, der Milchstraße. Dieses ungewöhnlich starke Magnetfeld bestimmt mit der 21 cm Absorptionslinie in Richtung des Quasars 3C286 (gedämpftes Ly $\alpha$  System) hat eine Kohärenzlänge möglicherweise  $> 200 \text{ pc}$ , das Neutralgas ist ruhig, metallarm, nahezu staubfrei und zeigt wenig Anzeichen von Sternbildung.

Analysen von  $RM$  Daten und Polarisationskarten der Synchrotronemissionen werden verwendet um die globale Struktur von magnetischen Feldern in Galaxien bestimmen zu können. Es ist üblich die Feldkonfigurationen von Scheibengalaxien entsprechend ihrer Symmetrie-Eigenschaften unter Rotation in Bezug auf die Spinachse der Galaxie festzulegen.

Oft scheint die spiralförmige, magnetische Struktur in Scheibengalaxien im engen Zusammenhang mit dem materiellen Spiralarm zu stehen. Eine mögliche Verbindung zwischen magnetischer und optischer Spiralstruktur wurde zuerst in Messungen bei M83 und M81 festgestellt. In jedem Fall zeigt die Karte der linear polarisierten Synchrotronemission eindeutige Anzeichen von magnetischen Strukturen über die galaktische Scheibe.

Radiobeobachtungen von magnetischen Feldern in Spiralgalaxien, bei denen die Kante zugewandt ist (Halofelder), lassen vermuten, daß in den meisten Fällen die dominierende Komponente des magnetischen Feldes parallel zur Scheibenebene liegt. Allerdings gibt es ebenfalls Galaxien mit starken vertikalen Komponenten weg von der Scheibenebene.

**FIR Radiokontinuum Korrelation** Beobachtungen die Licht auf den Ursprung und die Evolution von galaktischen magnetischen Feldern werfen sind gegeben durch Korrelationen zwischen galaktischen Emissionen im fernen Infrarotbereich (FIR) – z. B. ESA's Herschel Mission – und Radiokontinuums-Emissionen. Sie sind gültig für verschiedenste Typen von Galaxien, darunter Spiralen, Irreguläre und Galaxienhaufen und etabliert für mehr als vier Größenordnungen in der Leuchtkraft. Das Korrelationsverhalten ist erstaunlich, da FIR- und Radiokontinuums-Emissionen sich eigentlich stark unterscheiden. Erstere sind thermischer Natur und vermutlich in Zusammenhang mit der Sternbildungsrate (star-formation rate, SFR), zweitere sind meist nichtthermal und erzeugt durch relativistische Elektronen in magnetischen Feldern. Für die Galaxie HFLS3 bei einer Rotverschiebung  $z = 6.3369$  wurde eine SFR von  $2900 M_{\odot}/\text{yr}$  gemessen, bei der Milchstraße beträgt die SFR  $\sim 1.3 M_{\odot}/\text{yr}$ . Eine mögliche Erklärung ergibt sich das sowohl die magnetische Feldstärke als auch die SFR stark von der Volumendichte des kalten Gases abhängen. Magnetische Feldlinien haben ihre Verankerung in Gaswolken, darum ergibt eine hohe Anzahl an Wolken eine höhere Dichte von magnetischen Feldlinien.

**Elliptische und irreguläre Galaxien** Magnetische Felder sind allgegenwärtig in elliptischen Galaxien, sie sind allerdings schwer zu beobachten aufgrund der geringen Zahl an relativistischen Elektronen. Trotzdem ist das Vorhandensein durch Beobachtungen von Synchrotronemission bestätigt. Zusätzlich wurde Faradayrotation in polarisierten Radioemissionen von Hintergrundobjekten beobachtet. Die Anzeichen von  $\mu\text{G}$  Feldern in elliptischen Galaxien sind stark, es gibt keine positive Detektion von polarisierter Synchrotronemission oder andere Anzeichen von regulären magnetischen Feldern. Somit sind die gefolgerten Feldstärken vergleichbar mit denen in Spiralgalaxien, die Kohärenzlänge dieser Felder ist wesentlich kleiner als die Größe der Galaxie selbst.

Unlängst wurden magnetische Felder in der irregulären Zwerggalaxie NGC4449 beobachtet. Die Masse der Galaxie ist um eine Größenordnung kleiner verglichen mit typischen Spiralen und zeigt nur wenig Anzeichen von globaler Rotation. Dennoch ist ein reguläres magnetisches Feld mit  $6 - 8 \mu\text{G}$  vorhanden, vergleichbar mit dem in Spiralen. Große Domänen von nichtverschwindender Faradayrotation lassen vermuten, daß reguläre Felder kohärent auf Galaxienskala vorliegen.

**Galaxienhaufen** Galaxienhaufen sind die größten nichtlinearen Systeme im Universum (siehe Diskussion in Kap. A.1.3). Röntgenbeobachtungen zeigen, daß sie mit dünnem heißen Plasma gefüllt sind, Radioemissionen und  $RM$  Daten bestätigen die Anwesenheit von Magnetfeldern. Haufen sind deshalb ideale Kandidaten bei denen Theorien über den Ursprung von extragalaktischen Magnetfeldern getestet werden können. Magnetische Felder scheinen in Galaxienhaufen zu existieren, völlig unabhängig von Anzeichen von Kühlströmungen oder ausgedehnten Radioemissionen. Mehr als die Hälfte aller Haufen mit kühlenden

Strömungen haben  $RM > 800 \text{ rad m}^{-2}$  und eine beträchtliche Anzahl sogar  $RM > 2000 \text{ rad m}^{-2}$ . Es gibt eine direkte Korrelation zwischen der Rate an kühlenden Strömungen und dem beobachteten  $RM$ . Abschätzungen der regelmäßigen magnetischen Feldstärken für Haufen liegen im Bereich von  $0.2 - 3 \mu\text{G}$ .

**Felder außerhalb von Haufen** Es gibt Anzeichen, daß magnetische Felder auf Skalen von Superhaufen existieren. Das magnetische Feld des Coma-Abell 1397 Superhaufens, abgeleitet aus Energieminimums-Argumenten, ergibt sich mit  $0.2 - 0.6 \mu\text{G}$ .

**Galaktische magnetische Felder bei mittleren Rotverschiebungen** Momentan kommen die überzeugendsten Beobachtungen von galaktischen magnetischen Feldern bei mittlerer Rotverschiebung von  $RM$  Studien von Radiogalaxien und Quasaren. Bei einigen Radiogalaxien mit hoher Rotverschiebung  $z \gtrsim 2$  wurde für polarisierte Radioemission, gemessen bei mehreren Frequenzen, signifikante  $RM$ s gefunden. Mehrere dieser Objekte haben  $RM \gtrsim 1000 \text{ rad m}^{-2}$ , die höchste  $RM$  der Messungen ist  $6000 \text{ rad m}^{-2}$  für  $z \simeq 2.17$  Galaxie 1138-262.  $RM$ 's dieser Größenordnung benötigen kohärente Mikrogauss Felder über mehrere kpc.

**Kosmologische magnetische Felder** Ein wirkliches kosmologisches Feld kann nicht mit kollabierten oder viralisierten Strukturen in Zusammenhang gebracht werden. Gegenwärtig ist nicht bekannt ob kosmologische Magnetfelder existieren. Eine zweifelsfreie Detektion von ausreichend starken kosmologischen Feldern würde Unterstützung für die Hypothese primordialer Felder geben und gleichzeitig ein neues Beobachtungsfenster für das frühe Universum darstellen. Weiters könnten sehr schwache kosmologische Felder als Keim für galaktische Dynamos fungieren. Die Entdeckung selbst der schwächsten kosmologischen Felder kann das Dynamo-Paradigma komplettieren.

Aktuell können nur Limits in der Stärke von kosmologischen Magnetfeldern angegeben werden. Einschränkungen wurden abgeleitet von Studien mittels (i) Faradayrotation bei Quellen hoher Rotverschiebung, (ii) Anisotropiemessungen der CMB und (iii) Vorhersagen der Mengen an leichten Elementen der BBN.

**Faradayrotation aufgrund kosmologischer Felder** Faradayrotation von Radioemissionen bei Quellen hoher Rotverschiebung können verwendet werden um Untersuchungen kosmologischer magnetischer Felder durchzuführen. Für eine Quelle mit kosmologischer Entfernung  $l_s$  ist das Rotationsmaß gegeben durch eine Verallgemeinerung von Gl. A.113, anwendbar bei einem expandierenden Universum,

$$\frac{RM}{\text{rad m}^{-2}} \simeq 8.1 \times 10^5 \int_0^{l_s} \left( \frac{n_e(l)}{\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{\parallel}(l)}{\mu\text{G}} \right) (1+z)^{-2} \frac{dl}{\text{Mpc}}. \quad (\text{A.115})$$

Der Faktor  $(1+z)^{-2}$  berücksichtigt die Rotverschiebung von elektromagnetischen Wellen bei Ausbreitung von der Quelle zum Beobachter.

Weitere Verbesserungen bei Anwendung der Faradayrotation zur Untersuchung kosmologischer magnetischer Felder ergeben sich wenn Korrelationen im  $RM$  berücksichtigt werden.

**Evolution von magnetischen Feldern im frühen Universum** Die meiste Zeit während der strahlungsdominierten Epoche sind magnetische Felder in das kosmische Plasma eingefroren. Solange das gültig ist wird ein magnetisches Feld, kohärent auf der Skala  $L$  zur Zeit  $t_1$ , zu einem späteren Zeitpunkt  $t_2$  sich gemäß der Beziehung

$$B \left( \frac{a(t_2)}{a(t_1)} L, t_2 \right) = \left( \frac{a(t_1)}{a(t_2)} \right)^2 B(L, t_1) \quad (\text{A.116})$$

verhalten. Zu bestimmten Zeiten im frühen Universum wird die Energie im Magnetfeld in Wärme umgewandelt, ein Prozeß analog zur Silkdämpfung. Bei der Rekombination wird die freie Länge der Photonen und damit die Diffusionslänge der Strahlung groß und magnetische Energie wird dissipiert.

**Limits von CMB Anisotropie Messungen** Ein vorhandenes magnetisches Feld zum Zeitpunkt der Entkopplung bei  $z_d \simeq 1089$  und homogen auf Skalen größer als der Horizont zu dieser Zeit verursacht eine unterschiedliche Geschwindigkeit der Expansion des Universums in verschiedene Richtungen. Nachdem solch eine anisotrope Expansion die Muster im CMB beeinflussen würde ergeben Messungen des Leistungsspektrums Limits für kosmologische magnetische Felder. Betrachtet man ein Universum das homogen und anisotrop ist, die Isotropie sei gebrochen durch ein unidirektionales räumlich homogenes magnetisches Feld, dann verursacht die Expansion der Raumzeit entlang der Richtung des Feldes eine Dehnung der Feldlinien und muß deshalb Arbeit gegen die magnetische Spannung aufbringen. Umgekehrt wird Expansion orthogonal zur Magnetfeldrichtung unterstützt durch den magnetischen Druck. Somit expandiert das Universum langsamer entlang der Richtung des Feldes und die kosmologische Rotverschiebung eines Objektes in dieser Richtung ist reduziert relativ zu einem Universum in welchem  $\vec{B} = 0$  gilt. Basierend auf Cosmic Background Explorer (COBE) Daten für Richtungs-Anisotropien kann folgendes Limit für primordiale Felder kohärent auf Skalen größer als der aktuelle Horizont angegeben werden,

$$B_{\text{cosmic}} \lesssim 5 \times 10^{-9} h_{75} \Omega^{1/2} \text{ G.} \quad (\text{A.117})$$

Die Existenz eines magnetischen Feldes zum Zeitpunkt der Entkopplung verursacht eine meßbare Faradayrotation im Polarisationsignal der CMB.

**Einschränkungen von Seiten der BBN** Die BBN liefert die frühesten quantitativen Tests des Standardmodells der Kosmologie, sie fand statt zwischen  $10^{-2} - 1$  s nach dem Urknall und ist verantwortlich für das meiste  $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$ , D und  $^7\text{Li}$  im Universum. Magnetische Felder können die Vorhersagen der BBN modifizieren. Die Effekte von Magnetfeldern auf die Nukleosynthese können beschrieben werden durch die verursachte Änderung im Neutronenanteil mittels Beeinflussung auf die Elektronendichte-Zustände. In einem homogenen magnetischen Feld kann die Bewegung eines Elektrons zerlegt werden in lineare Bewegung entlang der Feldrichtung und zirkulare Bewegung in der Ebene senkrecht zum Feld. Gemäß den Prinzipien der Quantenmechanik (siehe Kap. A.1.9) ist die Energie im Zusammenhang mit der zirkularen Bewegung quantisiert und die Gesamtenergie des Teilchens kann geschrieben werden

$$E = (p_z^2 c^2 + m_e^2 c^4 + 2eB\hbar c n_s)^{1/2}, \quad (\text{A.118})$$

mit  $n_s = 1, 2, \dots$  der Quantenzahl für die unterschiedlichen Energieeigenzustände, bekannt als Landau-Levels. Die (partielle) Quantisierung der Elektronenenergie in Gl. A.118 kann deshalb die Dichte der Zustände des Elektrons verändern. Diese wiederum beeinflußt Prozesse des Neutronenzerfalls, es ergibt sich eine Steigerung in der Zerfallsrate. Nimmt man an, daß ein magnetisches Feld gemäß Gl. A.116 skaliert, dann führt dies zu Einschränkungen für das heutige magnetische Feld auf  $B < 10^{-6}$  G.

**Intergalaktische Magnetfelder und hochenergetische kosmische Strahlung** Kosmische Strahlung sind relativistische Teilchen, primär Elektronen und Protonen, mit einem geringen Anteil an leichten Kernen und Antiprotonen (siehe Kap. A.2.5). Sie breiten sich aus in der Galaxie mit Energien im Bereich von  $10^9 - 10^{20}$  eV. Ihr Energiespektrum ist charakterisiert durch ein Potenzgesetz bis zum sogenannten Knie bei  $E \simeq 10^{15}$  eV, einem etwas steileren Abfall in der Potenz zwischen Knie und Knöchel bei  $E \sim 10^{19}$  eV, sowie eine flachere Verteilung der ultra-hochenergetischen kosmischen Strahlung (ultrahigh energy cosmic rays, UHECR) über dem Knöchel. Der Verlauf ist gegeben durch die Spektralindizes des Teilchenflusses  $J \propto E^{-\gamma}$  mit unterschiedlichen  $\gamma$ -Werten.

Für ein lokales Superhaufenfeld von  $10^{-7}$  G unterliegt kosmische Strahlung mit Energien unter  $10^{19}$  eV einem Random-Walk bei Ausbreitung von der Quelle zum Beobachter. Jene über  $10^{20}$  eV folgen einer relativistischen geraden Linie. Magnetische Felder haben einen vorhersehbaren Effekt auf die Winkelverteilung und Flugzeit für kosmische Strahlung mit gegebener Energie. Mit zukünftigen Experimenten zur kosmischen Strahlung sollte es nicht nur möglich sein zu bestimmen ob UHECRs von  $\gamma$ -Strahlungs Ausbrüchen erzeugt werden, sondern auch ob die Ablenkung durch großräumige magnetische Felder von der Quelle zum Beobachter gegeben ist.

## Dynamos

**Allgemeine Eigenschaften** Bei Dynamos (:=) erfolgt in der leitfähigen Materie eine Kette von Abläufen die es erlauben ein schwaches initiales Magnetfeld bis zum Sättigungsbereich zu verstärken. Helizität (:=) quantifiziert dabei die Struktur eines Vektorfeldes. Dynamos brauchen keine Helizität, allerdings sind nichthelikale Dynamos in der Regel schwerer zu erregen als helikale Dynamos. Die Erfahrung zeigt, daß jedes ausreichend komplexe Feld als Dynamo fungieren kann und auf großen Skalen magnetische Helizität eine wichtige Rolle einnimmt.

Magnetische Helizität  $H$  ist ein Maß für strukturelle Eigenschaften des Magnetfeldes, z. B. Kopplung ("linking"), Krümmung ("kinking"), Scherung ("shear") und Verdrehung ("twist"), zugleich ist sie eine Erhaltungsgröße bei idealer MHD, kann aber zwischen Regionen transportiert und auf unterschiedlichen Längenskalen transferiert werden. Über die Gauß'sche Verschlingungszahl – "linking number", verschlungen im Abstand  $\vec{r} = \vec{y} - \vec{x}$  sind 2 Kurven  $\vec{x}(\sigma)$  und  $\vec{y}(\tau)$  – gelangt man für ein Magnetfeld im Volumen  $\nu$  mit der Begrenzung  $S$  (zugleich sei das Feld geschlossen in  $\nu$ , d. h.  $\vec{B} \cdot \vec{n} = 0$ ) zu  $H = -\frac{1}{4\pi} \int \int \vec{B}(\vec{x}) \cdot \frac{\vec{r}}{r^3} \times \vec{B}(\vec{y}) dx^3 dy^3$ . Helizität ist also eine nichtlokale Größe, hat somit kein Analogon wie Dichte zu Masse. Verwendet man die Coulomb Eichung mit Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{x}) = -\frac{1}{4\pi} \int \frac{\vec{r}}{r^3} \times \vec{B}(\vec{y}) dy^3$  gelangt man zu

$$H = \int \vec{A} \cdot \vec{B} dx^3, \quad (\text{A.119})$$

die Eichtransformation von  $\vec{A}$  kann das Integral ändern, z. B. wenn magnetischer Fluß die Grenze verläßt oder auch in mehrfach zusammenhängenden Gebieten. Ein Ausdruck für den Transport der Helizität  $dH/dt$  (über Grenzbereiche hinweg), der zudem Dissipation inkludiert, ergibt sich mit  $\vec{\nabla} \cdot \vec{A}_{pot} = 0$  und  $\vec{A}_{pot} \cdot \vec{n}|_S = 0$ ,  $\vec{A}_{pot}$  ist das Vektorpotential in  $\nu$ , zu

$$dH/dt = -2 \int \vec{E} \cdot \vec{B} dx^3 + 2 \oint_s \vec{A}_{pot} \times \vec{E} \cdot \vec{n} ds, \quad (\text{A.120})$$

dabei ist  $\vec{E}$  ist das elektrische Feld. In Anwendungen wird oft die Strom-Helizität  $H_c$  verwendet, sie ergibt sich zu

$$H_c = \int_v \vec{B} \cdot \vec{j} dV, \quad (\text{A.121})$$

mit  $\mu_0 \vec{j} = \vec{\nabla} \times \vec{B}$ . Während die magnetische Helizität durch  $\vec{A}$  eichabhängig ist gibt es diese Freiheit bei  $H_c$  durch  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  nicht, im Gegensatz zu  $H$  ist  $H_c$  keine Erhaltungsgröße.

Die aktuellen Trends bei numerischen Dynamo-Berechnungen (Integrationsmethoden Kap. A.1.9) gehen in die Richtung völlig konservativer Schemen und adaptiver Gitter, numerische Modellierung von speziell-relativistischer MHD (SRMHD) und Entwicklung von Codes für allgemein-relativistische MHD (GRMHD). In der herkömmlichen MHD gibt es zwei allgemeine Klassen an Algorithmen die in breiter Verwendung sind, (i) die Methode der Charakteristiken / eingeschränkter Transport (method of characteristics / constrained transport, MOC/CT) und (ii) Schockerfassungs-Methoden. In konservativer Form haben die MHD Gleichungen folgendes Aussehen

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{A.122})$$

$$\partial_t (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot [\rho \vec{v} \otimes \vec{v} + (P + 1/8\pi \vec{B}^2) \vec{I} - 1/4\pi \vec{B} \otimes \vec{B}] = 0 \quad (\text{A.123})$$

$$\partial_t \vec{B} + \nabla \cdot [\vec{v} \otimes \vec{B} - \vec{B} \otimes \vec{v}] = 0 \quad (\text{A.124})$$

$$\partial_t (\rho E) + \nabla \cdot [(\rho E + P + \vec{B}^2/8\pi) \vec{v} - 1/4\pi (\vec{v} \cdot \vec{B}) \vec{B}] = 0 \quad (\text{A.125})$$

in Abhängigkeit der Bedingung  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ . Die Gesamtenergie ist gegeben durch  $gE = \rho/(\Gamma - 1) + 1/2 \rho \vec{v}^2 + 1/8\pi \vec{B}^2$ . Dieses Gleichungssystem erlaubt strikte numerische Massen-, Impuls- und Energieerhaltung.

Mit der Definition des Zustandsvektors  $\underline{Q} = \{\rho, \vec{v}, E, \vec{B}\}$  können diese Gleichungen in der kompakten Form  $\partial \underline{Q} / \partial t + \nabla \cdot \underline{F} = 0$  geschrieben werden. Der Flußvektor  $\underline{F}$  hängt für gewöhnlich nichtlinear von den Zustandsvariablen  $\underline{Q}$  ab.

Für die Zeitschritte, um die Simulation stabil zu halten, ist die Courant-Friedrichs-Lewy (CFL oder Courant) Bedingung  $\alpha = v\Delta t/\Delta a$  zu erfüllen, dabei ist  $\alpha$  die Courant-Zahl und  $v$  ist die Summe aller charakteristischen Geschwindigkeiten und die Geschwindigkeit im Plasma. Je kleiner die räumliche Auflösung desto kleiner die Zeitschritte um das Programm stabil laufen zu lassen. Nachdem ein gewisses  $\alpha < 1$  definiert und die räumliche Stufung festgelegt wurde kann die Festlegung von  $\Delta t$  erfolgen.

Abgesehen von der Geschwindigkeit ist der größte Unterschied zwischen Jets von Sternen mit geringer Masse und extragalaktischen Jets in Radiogalaxien und Quasaren die Umgebung. In einer reinen hydro-magnetischen Simulation hängt die Ausbreitung von Jets im Wesentlichen von vier Parametern ab: (i) der Geschwindigkeit des Strahls  $\vec{v}_b$ , (ii) dem Dichtekontrast  $\Gamma = \rho_b \Gamma_b^2 h_b / \rho_m$ , (iii) der internen Machzahl  $M$  und (iv) der Druckanpassung am Eingang der Strömung.  $\Gamma_b$  ist der Lorentz-Faktor des Strahls mit spezifischer Enthalpie  $h_b$ . Relativistische MHD ist die ab-initio Verbindung vom Maxwell'schen Gleichungen mit Plasmabewegungen

$$\partial_\mu J^\mu = 0, \quad \partial_\mu T^{\mu\nu} = 0, \quad \partial_\mu (*F)^{\mu\nu} = 0. \quad (\text{A.126})$$

Der vollständige Energie Impuls Tensor  $T^{\mu\nu}$  ist gegeben durch den Plasmateil und einen Teil erzeugt durch das elektromagnetische Feld

$$T^{\mu\nu} = (\rho + P + b^2/4\pi)u^\mu u^\nu + (P + b^2/8\pi)g^{\mu\nu} - 1/4\pi b^\mu b^\nu \quad (\text{A.127})$$

Der antisymmetrische Faraday Tensor  $F_{\mu\nu}$  ergibt sich vom magnetischen Feld  $b^\mu$  und der Vierer-Geschwindigkeit  $u^\mu$  in der dualen Form zu  $*F^{\mu\nu} = b^\mu u^\nu - u^\mu b^\nu$ . Daraus erhält man die magnetische Feldstärke im Laborsystem  $\vec{B}$ , mit  $i = 1, 2, 3$ , zu  $B^i = *F^{it} = b^i u^t - u^i b^t$ .

Die homogenen Maxwell'schen Gleichungen sind nichts anderes als die Induktionsgleichung im Laborsystem  $\partial_t \vec{B} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) = \nabla \cdot (\vec{v} \otimes \vec{B} - \vec{B} \otimes \vec{v})$ . In dieser Form wird die ideale SRMHD ausgedrückt in konservativer Schreibweise für den 8D Zustandsvektor  $Q^\alpha$ :  $\partial Q^\alpha / \partial t + \partial F^{\alpha i} [Q] / \partial x^i = 0$ ;  $\alpha = 1 \dots 8$ .

Der Zweck eines jeden (newtonischen oder relativistischen) MHD Codes ist die Entwicklung der Induktionsgleichung um magnetische Felder zu erhalten, danach wird mit diesen die Lorentzkraft berechnet.

**Galaktische und extragalaktische Dynamos** Ein magnetischer Dynamo besteht aus elektrisch leitfähiger Materie in einem magnetischen Feld. Die induzierten Ströme verstärken und erhalten das ursprüngliche Feld. Das Dynamoprinzip war bereits lange bekannt, Joseph Larmor (1857 – 1942) [Larmor, 1919] war der erste der Dynamoprozesse verantwortlich machte für astrophysikalische Felder wie das der Sonne und auch das der Erde.

Im Laufe der Jahre wurde das galaktische Standard-Dynamomodell, bekannt als  $\alpha\Omega$  Dynamo, etabliert. Turbulente Bewegungen im ISM, z. B. gespeist durch stellare Winde, Supernovae Explosionen und hydrodynamische Instabilitäten, enthalten Schleifen von toroidalen magnetischen Feldern außerhalb der Ebene der Scheibe. Diese Schleifen werden verdreht in die poloidale Ebene durch Coriolis Effekte, gleichzeitig wird das toroidale Feld regeneriert vom poloidalen durch differentielle Rotation. Der  $\alpha\Omega$  Dynamo kann seine Wirkung in jedem differentiell rotierenden, turbulenten Medium entfalten. Der selbe Prozeß ist weiterhin akzeptiert als primärer Mechanismus zur Aufrechterhaltung des magnetischen Feldes der Sonne.

**Hypothese über primordiale Felder** Eine astrophysikalische Batterie dürfte eine implausible Erklärung für galaktische Felder sein, die notwendige Spannung um die Ströme zu treiben wäre enorm. Hingegen betrachtete Fred Hoyle (1915 – 2001) ein Szenarium in dem magnetische Felder im Material ab-initio vorhanden sind, diese Materie kollabiert und formt Galaxien.

**”Mean field” Dynamotheorie** Die meisten Betrachtungen von astrophysikalischen Dynamos bedienen sich der ”mean field” Näherung um die Effekte der Turbulenz zu beschreiben. Zusätzlich verursachte Rückwirkungen des Feldes auf das Fluid werden dabei für gewöhnlich vernachlässigt, die Evolution des Feldes reduziert sich auf ein rein kinematisches Problem, die MHD Beschreibung ist gegeben in Gl. A.106. Das größte Kritikpotential liegt in der vernachlässigten Rückwirkung des magnetischen Feldes auf das Fluid. Der springende Punkt des vermeindlichen Problems liegt in der hohen magnetischen Reynoldszahl, oder alternativ betrachtet in der hohen elektrischen Leitfähigkeit von astrophysikalischen Fluids.

In einem hochleitfähigen, turbulenten Fluid werden magnetische Flußröhren ständig in komplizierte Filamente gedehnt, eine Dimension schrumpft exponentiell, die anderen Dimensionen bleiben näherungsweise konstant. Daraus resultiert eine Ansammlung von Energie in kleinräumigen Strukturen, solange bis Effekte von Rückwirkung nicht mehr vernachlässigbar sind. Lorentzkräfte wirken auf die geladenen Komponenten des Gases, dies führen zum Durchschlüpfen zwischen den Ionen und magnetischen Feldern auf der einen Seite und Neutralgas-Komponenten auf der anderen. Dieser Prozeß ist bekannt unter der Bezeichnung ambipolare Diffusion (siehe Seite 112) und steht im Zusammenhang mit der galaktischen Dynamotheorie.

**Scheibendynamos** Die wesentlichen Eigenschaften des Standard  $\alpha\Omega$  Dynamos sind die Turbulenz, mittels des  $\alpha$  Effektes wird  $B_R$  und  $B_z$  aus  $B_\phi$  erzeugt, die differentielle Rotation regeneriert  $B_\phi$ . Die  $\alpha$  und  $\Omega$  Effekte krümmen, scheren und dehnen die magnetischen Feldlinien, erzeugen aber keine neuen. Diese Effekte können die Energie im magnetischen Feld erhöhen, der Nettofluß durch die Oberfläche des Systems kann nicht verändert werden, Diffusion entfernt unerwünschten Fluß. Wiederum liefert numerische Simulationen einen Ansatz zum Studium von magnetischen Dynamos, zugleich ist dieser Zugang komplementär zur analytischen Beschreibung. Es sind weniger Annahmen notwendig und zusätzliche Effekte, die analytisch nur schwer oder unmöglich zu behandeln wären, können berücksichtigt werden. Zu beachten ist die richtige Auswahl der Integrationsmethode, siehe Kap. A.1.9. Die Vielfalt an beobachteten Feldkonfigurationen in Spiralgalaxien ist eine veritable Herausforderung von Dynamo-Hypothesen.

**Variationen des Dynamos Problems** Die Dynamo-Hypothesen zum Ursprung von galaktischen magnetischen Feldern sind einer Anzahl von Herausforderungen unterworfen, zusätzlich zu den vorhin bereits dargestellten. Diese inbegriffenen Schwierigkeiten führen in weiterer Folge zu Varianten des Standard  $\alpha\Omega$  Dynamos.

Beim Modell mit Parker-Instabilität (magnetischer Auftrieb) ergibt die Kombination von hydrodynamischer Instabilität und Rekonnektion von entgegengesetzt orientierten magnetischen Feldlinien die Diffusion und den  $\alpha$  Effekt für den Dynamo. Das System aus Gas, magnetischem Feld und kosmischer Strahlung ist instabil.

Eine starke lokale Scherungs-Instabilität tritt in schwach magnetisierten, differentiell rotierenden Scheiben (magnetorotatorisch) auf. Praktisch jedes kleine initiale Feld in Kombination mit Winkelgeschwindigkeits-Profilen die mit dem Radius abnehmen führen zu dynamischen Instabilitäten.

Der kreuzhelikale Dynamo ist eine Variante des Standard "mean field" Dynamos mit rascher Verstärkung des initialen Feldes zu frühen Zeiten.

**Dynamos in irregulären und elliptischen Galaxien und Galaxienhaufen** Die Existenz von Mikrogauß Feldern in elliptischen Galaxien und Galaxienhaufen stellt diverse Herausforderungen für Modelle vom Ursprung der kosmischen Magnetfelder dar. Rotation spielt eine zentrale Rolle in "mean field" Dynamomodellen entwickelt für Scheibengalaxien, Sterne und Planeten. Sie liefert auch ein Reservoir von Energie zur Feldverstärkung durch  $\alpha$  und  $\Omega$  Effekte.

Es gibt zwei potentielle Quellen für initiale Felder in elliptischen Galaxien, nämlich (i) stellare magnetische Felder die ins ISM geschleudert werden, z. B. durch Supernovae oder stellare Winde und (ii) remanente magnetische Felder die aus Verschmelzungen in elliptische Galaxien herrühren. Erstere können auf Feldstärken von  $\sim 10^{-16}$  G führen, zweitere zu Feldern im Bereich von  $\sim 10^{-8}$  G. Somit sind in jedem Fall weitere Verstärkungen notwendig um die gemessenen Mikrogauß Felder erklären zu können.

Der Ursprung von magnetischen Feldern in Haufen ist bis dato unklar. Die Galaxien des Haufens sind offensichtlich die Quellen, diverse Szenarien basieren auf Verschmelzungen um Dynamos auf der Haufenskala etablieren zu können.

### Initiale Felder

Grundsätzlich könnten magnetische Felder aus den Anfängen des Universums herrühren, aktuelle Hypothesen gehen allerdings davon aus, daß sie von physikalischen Prozessen nach dem Urknall etabliert wurden. Die ersten Felder können extrem klein sein, nachfolgende Dynamowirkung verstärkt sie um mehrere

Größenordnungen. Szenarien für initiale Felder fallen in zwei Kategorien: (i) Jene die auf herkömmliche astrophysikalische Prozesse aufsetzen und (ii) solche mit exotischerem Hintergrund.

**Astrophysikalische Mechanismen** Der Unterschied in der Mobilität zwischen Elektronen und Ionen im ionisierten Plasma führt zu Ladungstrennungseffekten und dem Zusammenbruch der MHD Näherung.

Ein Versuch (Verwirbelungen in der Strahlungsära) zur Erklärung des Ursprungs der initialen Felder betrachtet die Evolution von rotierenden Protogalaxien vor der Entkopplung. Während dieser Epoche sind Elektronen und Photonen stark gekoppelt, sie können somit für die meisten Zwecke als ein einziges Fluid betrachtet werden. Hingegen ist die Kopplung zwischen Elektronen und Protonen etwas schwächer, damit sind Ströme möglich und ein magnetisches Feld kann sich entwickeln.

Die erste Generation von Sternen können Quellen von initialen Feldern auf galaktischer Skala sein. Selbst wenn zuerst ein Stern ohne magnetisches Feld vorliegt, kann der Biermann Batterieeffekt (:= in einem ionisierten Plasma führen initiale Effekte zu elektrischen Strömen und magnetischen Feldern) ein schwaches Magnetfeld erzeugen das nachfolgend durch den stellaren Dynamo verstärkt wird. Wenn der Stern explodiert ist mit dem Massenverlust damit auch eine Verbreitung von magnetisierter Materie im ISM verbunden.

Aktive Galaktische Kerne (Active Galactic Nuclei, AGN) sind vielversprechende Orte für die Erzeugung von galaktischen und extragalaktischen magnetischen Feldern (Tab. A.1 und Seite 110). Ihre Dynamo-prozesse ermöglichen eine Verstärkung der magnetischen Felder in relativ sehr kurzen Zeiträumen.

**Initiale Felder vom frühen Universum** Die allerersten magnetischen Felder könnten möglicherweise durch Phasenübergänge im frühen Universum erzeugt worden sein. Diese Ereignisse beinhalten typischerweise fundamentale Änderungen in der Natur der Teilchen und Felder sowie signifikante Freisetzung von freier Energie über relativ kurze Zeitperioden – zwei Bedingungen, die auf natürliche Art und Weise zu elektrischen Strömen und magnetischen Feldern führen. Meist ist die Frage nicht ob magnetische Felder im frühen Universum durch Phasenübergänge erzeugt werden, sondern ob diese Felder geeignet sind um galaktische Dynamos zu initiieren.

Kausalität erzwingt grundsätzliche Einschränkungen für Szenarien im frühen Universum zur Erzeugung von initialen Feldern. Die Hubble-Entfernung  $L_H(t) \equiv c/H(t)$  setzt die obere Schranke für die Größe der Region die von kohärenten physikalischen Prozessen beeinflusst werden kann, siehe Seite 87.

In postinflationären Szenarios existiert die Möglichkeit, daß magnetische Felder durch kosmologische Phasenübergänge erster Ordnung erzeugt werden können. Ein elektroschwacher Phasenübergang erster Ordnung kann großräumige magnetische Felder erzeugen, sie können ebenfalls in kosmologischen Phasenübergängen zweiter Ordnung erzeugt werden.

Das Paradigma eines inflationären Universums liefert sowohl die dynamischen als auch kinematischen Bedingungen zur Erzeugung von praktisch skalenfreien Spektren von Störungen in der Energiedichte. Diese Eigenschaft macht Inflation (Kap. A.1.1) zum attraktiven Kandidaten für die Erzeugung von magnetischen Feldern.

### Zusammenfassung, Konklusio

Grundlegende Fragestellungen betreffend (i) Ursprung, (ii) Evolution und (iii) Natur von magnetischen Feldern bleiben unbeantwortet. Magnetfelder wurden in zihundert Spiralgalaxien sowie in zahlreichen elliptischen und irregulären Galaxien beobachtet, weiters in Galaxienhaufen und im Coma Superhaufen. Der  $\alpha\Omega$  Dynamo ist das weithin akzeptierte Paradigma zur Verstärkung und Erhaltung des magnetischen Feldes in Spiralgalaxien. Die FIR Radiokontinuums-Korrelation liefert zusätzliche Anhaltspunkte zur Unterstützung der Verbindung zwischen Sternbildung und großen galaktischen magnetischen Feldern. Das magnetische Feld in elliptischen Galaxien und Galaxienhaufen erfordert eine unterschiedliche Erklärung. Es ist unwahrscheinlich, daß in diesen beiden Fällen der  $\alpha\Omega$  Dynamo eine tragende Rolle spielen kann, dazu ist die differentielle Rotation in diesen Systemen zu gering. Allerdings könnten Dynamos auf fluktuierender Basis – die Turbulenz (erzeugt bei der Haufentstehung, durch Verschmelzungen oder turbulente Zonen von Galaxien) verstärkt magnetische Felder – mit Skalen bis zur maximalen Wirbelgröße dieser Systeme vorhanden sein. MHD Prozesse können per Definitionem magnetische Felder dehnen, verdrehen und verstärken, es besteht aber keine Möglichkeit neue Felder zu erzeugen wenn keine existieren.

### A.1.6 Geomagnetismus

Joseph Larmor legte den Grundstein zum Verständnis der Prozesse im Zusammenhang mit der Erzeugung des Erdmagnetfeldes. Seine Idee, das Erdmagnetfeld resultiert aus einer Dynamowirkung im elektrisch leitfähigen, flüssigen Kern der Erde, hat sich durchgesetzt. Alternative Ansätze haben sich bis heute als unhaltbar herausgestellt, siehe auch [Larmor, 1919]. Bis dato gibt es allerdings kontroverse Ansichten bzgl. der thermischen Leitfähigkeit im flüssigen Kern (gering  $\sim 20$  W/m/K  $\rightarrow$  langsame Auskühlung und kleiner Wärmeübertrag vom äußeren Kern zum Mantel, d. h. der Dynamo könnte bereits lange in der Erdgeschichte aktiv sein – und vice versa  $\sim 90$  W/m/K) – hervorgegangen aus Labormessungen an Eisen(legierungen) bei entsprechenden Temperaturen und Drücken. Die Chinesen waren die ersten die magnetische Eigenschaften der Erde erkennen konnten, dies bereits vor einigen tausend Jahren, siehe Kap. A.1.4. Die tieferen Gründe zum Verständnis des Erdmagnetfeldes blieben allerdings bis vor wenigen Jahren verborgen.

#### Rudimentäres Modell der Erde

Die Erde ist ein fast perfekter sphärischer Körper mit einem mittleren Radius  $r_E = 6371.2 \approx 20000/\pi$  km, bestehend konzentrisch aus einem (i) festen inneren Kern (solid inner core, SIC), (ii) einem flüssigen äußeren Kern (fluid outer core, FOC), (iii) dem festen Mantel und der (iv) dünnen Kruste. Die innere Kerngrenze (inner core boundary, ICB, Druck  $p_{ICB} = 330$  GPa, Temperatur  $T_{ICB} \sim 6230 \pm 500$  K) besitzt einen mittleren Radius  $\bar{r}_{ICB} \approx 1221.5$  km, die Kern-Mantel Grenze (core mantle boundary, CMB,  $T_{CMB} \sim 4050 \pm 500$  K) liegt bei  $\bar{r}_{CMB} \approx 3480$  km. Folgende Anmerkung: Die Abkürzung CMB steht in früheren Kapiteln für Cosmic Microwave Background radiation, im allgemeinen Sprachgebrauch und religiösem Zusammenhang für Christus Mansionem Benedicat (Christus segne dieses Haus), fälschlicherweise oft mit den Heiligen Drei Königen als Caspar, Melchior und Balthasar abgekürzt. Die jeweils gültige Version kann in dieser Arbeit aus dem Kontext heraus immer leicht abstrahiert werden.

Die Erde ist näherungsweise im hydrostatischen Gleichgewicht mit einem effektiven Gravitationsfeld  $\vec{g}$  das fast ausschließlich ihr eigenes (Newtonisches) Feld ist, zum Teil aber auch durch die zentrifugale Beschleunigung, hervorgerufen durch die Rotation  $\vec{\Omega}$ , bewirkt wird. Das macht die Erde an den Polen leicht abgeflacht. Es ergibt sich

$$\nabla \bar{P} = \bar{\rho} \vec{g}, \quad (\text{A.128})$$

$$\vec{g} = -\nabla \bar{U}, \quad (\text{A.129})$$

mit  $P$  als Druck,  $\rho$  ist die Dichte und  $U$  das effektive Gravitationspotential. Der Querstrich über den Parametern signalisiert horizontal gemittelte Größen, präziser ausgedrückt Größen gemittelt über Flächen von konstantem  $U$ .

Aufgrund der hohen Metallizität ist die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma_M$  des Kerns groß. Nimmt man  $\sigma_M = 4 \times 10^5$  Sm $^{-1}$  im FOC ergibt sich die gebräuchlichere magnetische Diffusivität mit  $\bar{\eta} = 1/\mu_0 \sigma_M = 2$  m $^2$ s $^{-1}$ , ein Wert der für den SIC verwendet wird. Nachdem die mittlere Temperatur  $\bar{T}$  sehr groß ist ergibt sich die gleiche magnetische Permeabilität wie die des freien Raumes,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Hm $^{-1}$ .

#### Geomagnetisches Feld

Ausreichend weit entfernt von der Erde (und weit unterhalb der Magnetosphäre) ist deren externes magnetisches Feld  $\vec{B}$  dipolar, in mathematischen Termen mit dem Potential  $V \sim -\vec{m} \cdot \nabla r^{-1}$ , für  $r \rightarrow \infty$ ,

$$\vec{B} = -\nabla V, \quad (\text{A.130})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (\text{A.131})$$

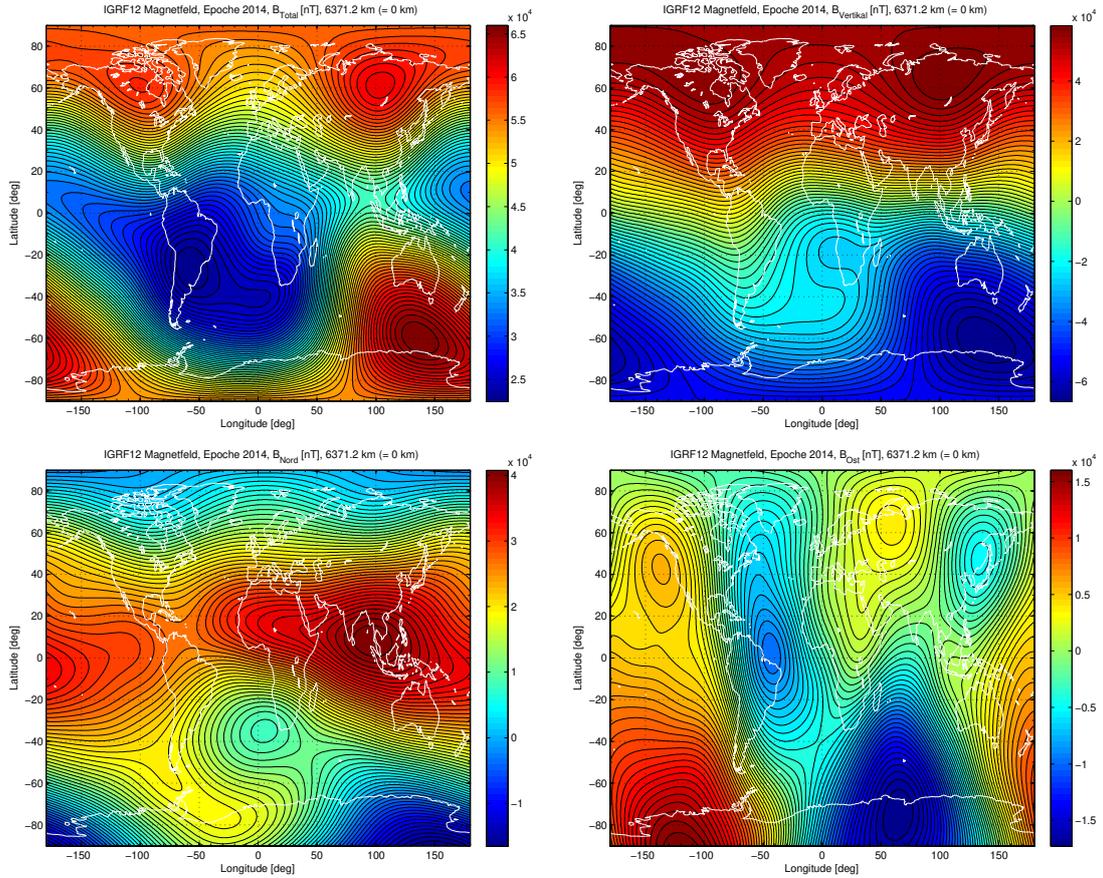
Dabei ist  $\vec{m}(t)$  die Stärke des "zentralen Dipols" zur Zeit  $t$ , momentan  $m \approx 7.835 \times 10^{22}$  Am $^2$ . Seine Richtung hat zurzeit eine Inklination zur geografischen Achse  $O_z$  von  $11^\circ$ , oder korrekter spezifiziert  $169^\circ$ , nachdem die Dipolachse fast antiparallel zur Drehachse der Erde  $\vec{\Omega}$  ist, d. h. der magnetische Südpol ist in der Nähe des geografischen Nordpols.

Der Dipol ist lediglich der erste Term in der Expansion des Potentials,  $V$  enthält Quadrupole, Oktupole, etc. und wird effizienter dargestellt durch Expansion in sphärische harmonische Funktionen  $P_l^m(\theta) \cos m\phi$

und  $P_l^m(\theta) \sin m\phi$ , mit  $P_l^m$  den Legendre-Funktionen,  $\theta$  der Polwinkel und  $\phi$  der geografischen Länge. Die vollständige Expansion (siehe auch Gl. A.99 und Gl. A.151) von  $V(r, \theta, \phi, t)$  ist

$$V = r_E \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{r_E}{r}\right)^{l+1} P_l^m(\cos \theta) [g_l^m(t) \cos m\phi + h_l^m(t) \sin m\phi]. \quad (\text{A.132})$$

Die Koeffizienten  $g_l^m$  und  $h_l^m$  sind benannt nach C. F. Gauß, das Internationale Geomagnetische Referenzfeld (IGRF, International Geomagnetic Reference Field) der International Association of Geomagnetism & Aeronomy (IAGA) / Internationale Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG, International Union of Geodesy and Geophysics) liefert aktuelle Werte, siehe nachstehende Abb. A.9. Zusätzlich zu den internen



**Abbildung A.9:** IGRF12 Magnetfeldwerte für die Epoche 2014 auf Referenzhöhe (6371.2 km geozentrische Entfernung). Von links oben nach rechts unten: Gesamtfeld, {Vertikal, Nord, Ost}-Komponenten. Man beachte das Minimum im Gesamtfeld im Süd-Atlantik, die Süd Atlantische Anomalie, SAA.

Harmonischen proportional zu  $(r_E/r)^{l+1}$  in Gl. A.132, hat Gauß ebenfalls die externen Harmonischen proportional zu  $(r/r_E)^l$  inkludiert. Er zeigte, daß sie sehr schwach sind und bei vielen Anwendungen effektiv vernachlässigt werden können. Gleichung A.130 und A.132 sind deshalb ausreichend, weil die elektrische Stromdichte bei und über  $r = r_E$  praktisch vernachlässigbar ist.

Wenn die mittlere magnetische Energiedichte  $W(r, t)$  auf der sphärischen Fläche mit Radius  $r$  bezeichnet wird, dann kann bei  $r > r_E$  die Summe der Beiträge von jeder sphärischen Harmonischen ausgedrückt werden mit

$$W(r, t) = \sum_l W_l(r, t). \quad (\text{A.133})$$

Die Gruppe der Werte  $W_l$  wird als Leistungsspektrum des Feldes bezeichnet. Zwei geeignete Relationen stellen das aktuelle magnetische Feld an der Oberfläche der Erde dar:

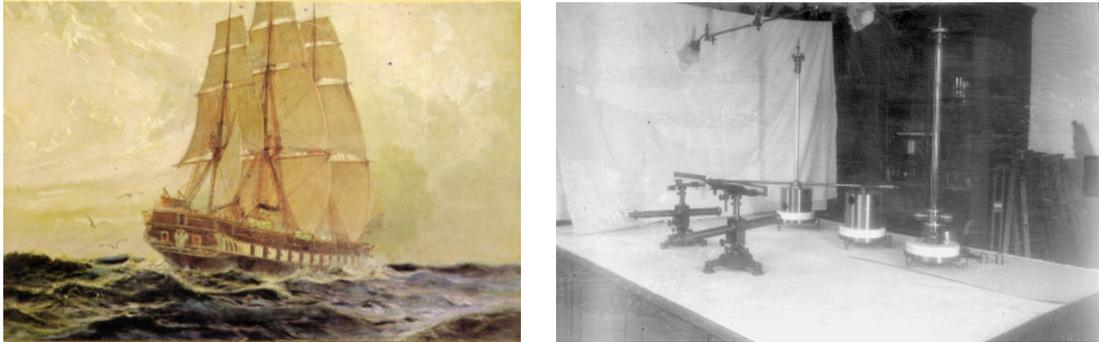
$$\log_{10} W_l(r_E) = \begin{cases} -3.270 - 0.569l, & \text{für } 2 \leq l \leq 12, \\ -10.83 - 0.0114l, & \text{für } 16 \leq l \leq 23. \end{cases} \quad (\text{A.134})$$

Für  $13 \leq l \leq 15$  zeigt das Spektrum einen Übergang zwischen den zwei linearen Relationen. Die Größe der Konstante 0.569 in der ersten Beziehung deutet an, beweist aber nicht, daß die Quellen dieser Terme weit unterhalb der Erdoberfläche liegen. Sie erzeugen den Hauptteil vom geomagnetischen Feld. Die kleine Konstante 0.0114 in der zweiten Relation sagt aus, beweist aber ebenfalls nicht, daß die Terme nahe der Erdoberfläche liegen. Sie stehen somit im Zusammenhang zum permanenten Magnetismus der Kruste. Die lithosphärischen Felder sind gegeben in der World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM). Die Quellen der Kruste in der Summe A.132 "verschmieren" die Quellen des Hauptfeldes für  $l > 12$  und zerstören somit die kurzweiligen Informationen über das Hauptfeld. Die Energie im Dipol ( $l = 1$ ) ist wesentlich größer als in jeder anderen Harmonischen, es liegt Dipol-Dominanz vor. Die intensive Konzentration von magnetischem Fluß (core spots) im simulierten Feld auf der Kernoberfläche  $r_{\text{CMB}}$ , sie sind im Wesentlichen nicht beobachtbar aus den gefilterten geomagnetischen Messungen an der Erdoberfläche, sie haben rein strukturell eine gewisse Ähnlichkeit mit den Sonnenflecken in der Photosphäre.

In Wirklichkeit ist das Hauptfeld nicht konstant sondern variiert in der Zeit  $t$ , ein Phänomen bekannt als sekulare Variation. Die zeitliche Skala reicht von Impulsen in der Sekularvariation, sogenannte "Jerks" (Ruck, zeitliche Änderung der Beschleunigung  $dx^3/dt^3$ ) mit Perioden von einem Jahr (z. B. 2003 und 2007), bis zur kompletten Umkehrung des Feldes, die letzte ereignete sich vor  $\sim 7.8 \times 10^5$  Jahren. Es gibt wahrscheinlich auch wesentlich kürzere Skalen, diese sind abgeschirmt von der Beobachtung durch die elektrische Leitfähigkeit im Mantel mit einer Zeitskala in der Länge von  $\sim 1$  Jahr. Wissen vom Feldverlauf über lange Perioden erlangt man durch archeomagnetische und paleomagnetische Datensätze. Paleomagnetismus beschäftigt sich mit Hauptfeld der Erde vom Prekambrium bis zur Gegenwart, gespeichert ist die Information in Gesteinen und Sedimenten zum Zeitpunkt ihres Entstehens (Magnetostatigraphie in Verbindung zur GPTS, Kap. A.1.6). Archeomagnetismus liefert ähnliche Daten, Felder eingepreßt in anthropogene Objekte und Artefakte, aus historischen und prähistorischen Zeiten wie Tonscherben und Ziegelsteine von Öfen. Jerks scheinen globale Phänomene zu sein und haben ihren Ursprung im Kern, zwei Beobachtungen deuten in diese Richtung. (i) Jerks dürften mit Änderungen in der Westwärtsdrift korreliert sein und (ii) es könnte ebenfalls eine Korrelation mit ähnlich langen Variationen in der Länge des Tages vorliegen.

Die sekulare Variation zeigt sich auf vielen Zeitskalen, nicht nur in den beiden zuvor beschriebenen Extremen. Aufgrund der historischen Relevanz des geomagnetischen Feldes in der Seefahrt wurde dieses Gebiet intensiv untersucht, spätestens seit Beginn des 16. Jhd. und Karten mit unterschiedlichen Schwerpunkten wurden in den vergangenen 400 Jahren gezeichnet um die Struktur des Erdmagnetfeldes und dessen Variationen auf der Erdoberfläche darzustellen [Jackson et al., 2000]. Kontinuierliche magnetische Aufzeichnungen gibt es ebenfalls von der Novara Expedition (1857 – 1859), siehe [Besser et al., 2009], [Besser et al., 2013a], [Besser et al., 2015], [Besser et al., 2016] (Novara- und Payer-Weyprecht Expedition), Abb. A.10 und A.11. Bekannt wurde im Zuge dieser Weltumsegelung vor 150 Jahren Ferdinand von Hochstetter (1829 – 1884) und seine geologischen Forschungen in Neuseeland. Eng verbunden mit diesem Land, allerdings aus anderen Gründen, ist der Ethnologe und Ornithologe Andreas Reischek (1845 – 1902). Anzumerken ist, daß unmittelbar vor diesem Zeitraum der Schiffspropeller (Patent Schiffschraube 1827, Versuchsfahrten 1829 in Triest) von Josef Ludwig Franz Ressel (1793 – 1857) erfunden wurde. Im Zusammenhang mit der Kalibration von Instrumenten für Magnetfeldmessungen auf der Novara ist Karl Kreil (1798 – 1862) zu erwähnen, Karl von Scherzer (1821 – 1903) war als Forschungsreisender dabei; er hat 1854 das Popol Vuh (Popol Wuuj) – das "Buch des Rates" mit der Schöpfungs-Geschichte der Quiché Maya – (wieder)gefunden. Unter den umfangreichen (physikalischen) Aufzeichnungen während der Expedition sind auch kontinuierliche meteorologische und ozeanografische Messungen, z. B. Meeres- und Lufttemperaturen, siehe El Niño / Southern Oscillation (ENSO) Betrachtungen Seite 153.

Unmittelbar nach Ende der Novara Expedition war ein historisch verbürgter, extremer geomagnetischer Sturm (siehe ebenfalls Abb. A.18, A.19) verbunden mit Polarlicht-Erscheinungen bis in niedrige geografische Breiten von New York (Sep. 1859; massive Ereignisse fanden ebenfalls im Mai 1921 und März 1989



**Abbildung A.10:** Fregatte SMS Novara dargestellt in einem Aquarell von Joseph Sellény (1824 – 1875), dem Maler während der zweijährigen Weltumsegelung. Rechts: Lamont'scher Theodolit zur Messung des magnetischen Feldes; dieses Modell stand in Verwendung bei der Expedition auf die Insel Jan Mayen während des Ersten Internationalen Polarjahres 1882/83, Bildquelle Archiv ZAMG.)

statt), während der Weltumsegelung im Jahr 1858 wurde ebenfalls der Komet Donati gesichtet und teilweise dessen Bahnelemente vermessen. Von Interesse sind ebenfalls die Weltumsegelung (1621 – 1628) von Christoph Carl Fernberger ( $\sim 1596 - 1653$ ), Mitte des 19. Jh. die (Welt-) Reisen von Ida Pfeiffer (1797 – 1858), Ende des 19. Jhd. Forschungsreisen (Nordafrika, Kaukasus, Mongolei) von Hans Leder (1843 – 1921), die 1898/99 Expedition nach Südarabien von David Heinrich Müller (1846 – 1912), Forschungsreisen des Ehepaars Agnes Gabriel-Kummer (1888 – 1978) und Alfons Gabriel (1894 – 1976) in den Iran und Süd-Afghanistan (extreme Trockengebiete/Wüsten: Dascht-e Lut und Dascht-e Kawir) und Reisebeschreibungen, topographische-, kartographische-Arbeiten von Martin Zeiller (1589 – 1661) aus der Barock-Zeit. Eine spezielle Beachtung gilt der Österreichisch-Ungarischen Nordpolarexpedition 1872 – 1874, auch Payer-Weyprecht Expedition genannt, nach Julius von Payer (1842 – 1915) und Carl Weyprecht (1838 – 1881), mit dem Segelschiff Admiral Tegetthoff (24 Mann Besatzung) und der Entdeckung von Franz-Josef Land (1873), darunter die Rudolf Insel mit Kap Fligely (benannt nach August von Fligely (1810 – 1879)), dem nördlichsten Landpunkt Eurasien, [Berger et al., 2008].

Zurück zum geomagnetischen Feld: Eine markante Erscheinung ist die (i) westwärtige Drift des Feldmusters, sie ist abhängig vom Breitengrad und irregulär. Der typische Wert bei mittleren geografischen Breiten wird verwendet um  $\bar{U}$ , die charakteristische großskalige Geschwindigkeit im Kern, abzuschätzen.

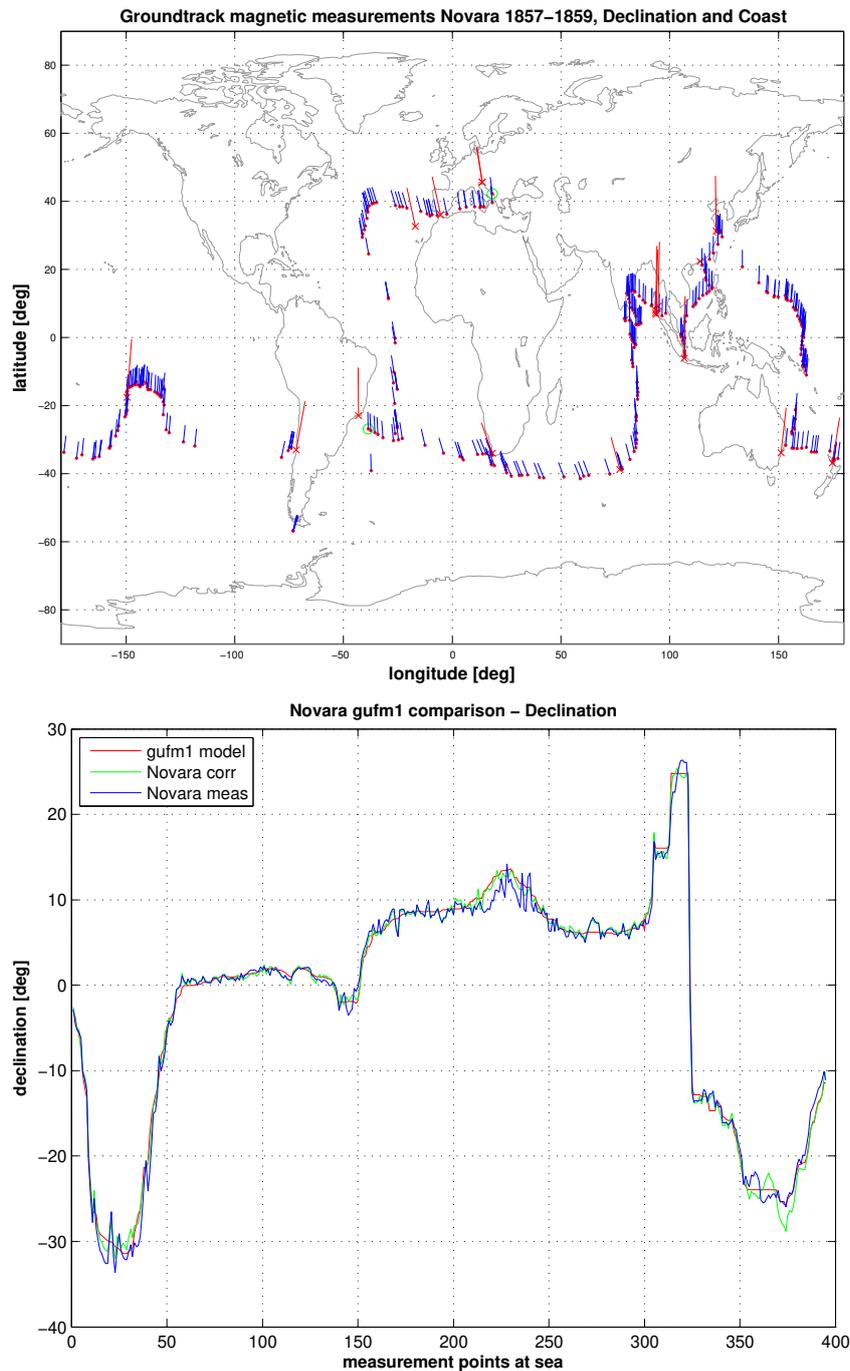
$$\bar{U} = 5 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}. \quad (\text{A.135})$$

Es gibt (ii) Umkehrungen des geomagnetischen Feldes, zugleich gibt es keinen Hinweis, daß die Erde einen bestimmten Zustand der Polarisierung bevorzugt. Ein drittes interessantes Faktum ist die (iii) Irregularität der Umkehrungen. Dauert ein Intervall konstanter Polarität länger als  $10^5$  Jahre, dann definiert dies eine Polaritäts-Epoche, ansonsten einen Polaritäts-Event. Wenn ein magnetischer Pol sich weiter als  $45^\circ$  vom geographischen Pol entfernt und zurückkehrt, dann liegt ein Polaritäts-Exkurs vor. Zu gewissen Zeiten, bezeichnet als "Cryptochrons", passieren schnelle Umkehrungen in rascher Folge und der anfängliche Polarisationszustand wird wieder erreicht. Manchmal scheint das Magnetfeld auf einer Seite sich umzukehren und auf der zweiten Seite bleibt es unverändert, damit dominiert ein Nichtdipolfeld während dieser Zeit.

### Energiebilanz und Konvektion des Kerns

Die Temperatur  $T$  in der Nähe der Kruste übersteigt diejenige der Curiepunkte aller bekannten Materialien. Permanenter Magnetismus existiert somit nirgendwo in der Erde, die Kruste ausgenommen. Eine offensichtliche Erklärung für den Magnetismus der Erde ist somit unhaltbar, das Hauptfeld wird durch elektrische Ströme im Kern hervorgerufen. Die Ströme werden erzeugt durch die selbstangeregte Dynamowirkung verbunden mit der Bewegung des Fluids im Kern.

Die Lorentzkraft, erzeugt durch Ströme und induziert durch Kernbewegung, sind entgegengesetzt dieser



**Abbildung A.11:** Obere Grafik: Magnetische Messungen der Novara Expedition (1857 – 1859). An Land wurden Inklination, Deklination und horizontale Intensität mit einem (i) Theodoliten von Lamont und einem (ii) "Inklinorium" von Barrows gemessen, auf See nur Deklination mit einem (iii) Standard-Kompaß von Barrows. Untere Grafik: Vergleich der Novara Messungen auf See mit dem Magnetfeldmodell GUFM1 [Jackson et al., 2000]. Man erkennt die generell gute Übereinstimmung der Deklinationenwerte mit dem Modell, Abweichungen entstehen primär durch Messungen bei schwierigen Bedingungen, z. B. hoher Seegang oder tropischen, klimatischen Umgebungen. Korrigierte Werte ergeben sich durch Bestimmung und Anpassung (Kalibration) von instrumentellen Konstanten.

Bewegung und bringen diesen zur Ruhe, außer eine Energiequelle ist verfügbar um die Bewegung zu treiben. Die Bewegung des Fluids muß die Verluste durch die Joule'sche Wärme der elektrischen Ströme ausgleichen.

### Energiequellen

Die Erde strahlt kontinuierlich in den umgebenden Weltraum ab. Die Wärme kommt zum Teil aus radioaktiven Quellen in der Kruste und aus dem Mantel, in Summe verliert unser Planet aber mehr Wärme als er aufnimmt, d. h. die Temperatur der Erde sinkt. Innerhalb der Erde wird die Wärme primär durch thermische Leitung entlang des adiabatischen Temperaturgradienten nach außen transportiert, allerdings ist dieser Zustand konvektiv instabil.

Verringert man den Abstand im flüssigen Kern von der CMB gelangt man zur inneren Kerngrenze (ICB), dort erstarren feste Bestandteile von der darüberliegenden Schmelze. Tatsächlich ist der Kern ein flüssiger Körper der von oben gekühlt wird aber von unten erstarrt. Das scheint vorerst paradox, allerdings nur weil die alltägliche Erfahrung an der Erdoberfläche eine andere ist. Dieses Paradoxon ist unvermeidlich wenn der Schmelzpunkt eines Materials stärker steigt mit zunehmenden Druck als die umgebende Temperatur es tut. Die Vorstellung, daß der SIC nur eine erstarrte Materie der darüberliegenden Flüssigkeit ist und das die Oberfläche des inneren Kerns die Erstarrungsfront darstellt die zugleich langsam in die Flüssigkeit wächst wenn die Erde abkühlt, wird allgemein akzeptiert. Mantel und Kern sollten idealerweise als gekoppeltes System betrachtet werden. Das ist allerdings unpraktikabel, da die sehr unterschiedlichen Viskositäten von Mantel und Kern sich auf stark unterschiedlichen Zeitskalen zeigen.

### Grundlegende Dynamotheorie, Induktionsgleichung

Dieser Abschnitt beschreibt die Lösung von

$$\partial_t \vec{B} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B} - \eta \nabla \times \vec{B}), \quad (\text{A.136})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (\text{A.137})$$

Diese Gleichungen, analog Gl. A.106, bestimmen das magnetische Feld  $\vec{B}$  in einem leitenden Volumen  $\nu$  (= FOC + SIC) des Kerns. Gleichung A.136 wird als Induktionsgleichung bezeichnet. Das Feld muß in größerer Entfernung dipolare Struktur aufweisen

$$\vec{B} = O(r^{-3}), \text{ wenn } r \rightarrow \infty, \quad (\text{A.138})$$

diese Einschränkung wird als "Dynamo-Bedingung" bezeichnet. Ein erfolgreicher Dynamo erhält aktiv  $\vec{B}$  solange Energiequellen existieren die  $\vec{V}$  aufrechterhalten

$$\vec{B} \rightarrow 0, \text{ wenn } t \rightarrow \infty. \quad (\text{A.139})$$

In praktischen Ausdrücken,  $t \rightarrow \infty$  kann einfach bedeuten  $t \gg \tau_\eta$ , die diffusive Zeitskala. Es gibt zwei Arten von Dynamos, den (i) kinematischen Dynamo und (ii) den MHD Dynamo ("selbstkonsistenten Dynamo"). Das kinematische Dynamoproblem beschränkt sich bei gegebenem  $\vec{V}$  auf die Lösung von  $\vec{B}$ . Der MHD Dynamo beschreibt bei einer gegebenen Energiequelle die Suche der Lösungen  $\vec{B}$  und  $\vec{V}$ .

Nimmt man das Skalarprodukt von Gl. A.136 mit  $\vec{B}/\mu_0$  und integriert über den Kern  $\nu$ , dann ergibt sich

$$-\partial_t \mathcal{E}^B = Q^B + Q^J, \quad (\text{A.140})$$

die linke Seite der Gleichung beschreibt die Abnahme der magnetischen Energie  $\mathcal{E}^B$

$$\mathcal{E}^B = \frac{1}{2\mu_0} \int_{\nu+\hat{\nu}} \vec{B}^2 d^3x, \quad (\text{A.141})$$

der erste Term auf der rechten Seite ist die Rate  $Q^B$  (:= Dynamoterm) mit der die Lorentzkraft magnetische in kinetische Energie konvertiert, d. h. räumliche Struktur und Wechselwirkung zwischen diesen 3 Vektorfeldern ( $\vec{V}$ ,  $\vec{J}$ ,  $\vec{B}$ ) ist der Schlüssel zum Dynamo-Mechanismus (Lorentzkraft  $\vec{J} \times \vec{B}$ , Strom-Helizitätsdichte  $\vec{J} \cdot \vec{B}$ , siehe Gl. A.121)

$$Q^B = \int_{\nu} \vec{V} \cdot (\vec{J} \times \vec{B}) d^3x, \quad (\text{A.142})$$

und der letzte Term  $Q^J$  ist die Ohm'sche Dissipation, sie ist positiv

$$Q^J = \mu_0 \int_V \bar{\eta} \vec{J}^2 d^3x. \quad (\text{A.143})$$

Bei einem funktionierenden Dynamo ist der erste Term auf der rechten Seite von Gl. A.140 negativ und erzeugt magnetische Energie von kinetischer Energie mit einer Rate größer als  $Q^J$  mit der elektrischer Widerstand sie in Wärme umsetzt. Durch dimensionsbehaftete Analyse von Gl. A.136 erkennt man die notwendige Bedingung dafür, daß dieser Zustand eintritt mit  $R_m \gtrsim O(1)$ , dabei ist

$$R_m = \bar{U} \bar{L} / \bar{\eta} \quad (\text{A.144})$$

die magnetische Reynoldszahl, sie ist  $\sim 125$  für die Erde. Cowlings Theorem besagt, daß ein achsensymmetrisches  $\vec{B}$  durch Dynamowirkung nicht anhaltend erzielt werden kann. Ein arbeitender Dynamo enthält notwendigerweise ein  $\vec{B}$  mit einem asymmetrischen Teil. Dies dürfte der Grund sein warum die geomagnetische und geographische Achse geneigt zueinander stehen. Allerdings sind bei Saturn, wie Messungen von Cassini (siehe ebenfalls Seite 53 ff.) zeigen, die Rotationsachse des Planeten und die Achse des Magnetfeldes fast perfekt in Übereinstimmung, ein Winkel von  $\lesssim 0.015^\circ$  dürfte vorliegen. Alfvén's Theorem des "eingefrorenen" Flusses besagt, daß Flußröhren in einem perfekt leitenden Fluid mit der Bewegung des Feldes mitgehen, so als ob sie darin "eingefroren" wären.

### Magnetohydrodynamik in rotierenden Systemen

**Größenabschätzung** Der Begriff RMHD steht für MHD in rotierenden Systemen. Wenn  $\vec{\Omega} = 0$  gilt, dann führt dies zur Bezeichnung "klassische MHD" und bei  $\vec{B} = 0$  ergibt sich die Situation von "klassischen rotierenden Fluids". Zwei dimensionslose Zahlen sind in der klassischen Theorie für rotierende Flüssigkeiten besonders wichtig, die Ekmanzahl  $E$  und die Rossbyzahl  $R_O$ .

$$E = \nu / \Omega \bar{\mathcal{L}}^2, \quad (\text{A.145})$$

$$R_O = \bar{U} / \Omega \bar{\mathcal{L}}. \quad (\text{A.146})$$

Diese messen die viskosen Kräfte  $\bar{\rho} \nabla^2 \vec{V}$  und inertialen Kräfte  $\bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V}$  gegen die Corioliskraft  $2\bar{\rho} \vec{\Omega} \times \vec{V}$ . Um  $E$  und  $R_O$  abzuschätzen folgt man der gängigen Praxis und verwendet  $\mathcal{L} = r_{\text{CMB}} - \bar{r}_{\text{ICB}} \sim 2260$  km. Es ergibt sich  $R_O \sim 10^{-5}$  und  $E \sim 5 \times 10^{-14}$  (für  $\nu = \nu_M$ ) oder  $10^{-7}$  (für  $\nu = \nu^t \sim \eta$ ). Der Kern ist deshalb ein rasch rotierendes Fluid, definiert mit

$$E \ll 1, \quad (\text{A.147})$$

$$R_O \ll 1, \quad (\text{A.148})$$

viskose und inertielle Kräfte sind generell klein verglichen mit der Corioliskraft. Das Verhältnis  $R_O/E$  bestimmt die kinetische Reynoldszahl  $R_e$ , sie ist groß, somit ist der Geodynamo selbsterregt. Das Proudman-Taylor Theorem besagt, daß langsame, stetige Bewegung eines rotierenden, reibungsfreien Fluids zwei-dimensional mit Bezug auf die Rotationsachse ist.

**Magnetische Effekte** Störungen in der klassischen MHD werden durch Alfvén-Wellen ausgebreitet. Man erhält sie, indem man den homogenen Ausgangszustand senkrecht zum Verlauf der (geraden) Feldlinien so stört, daß diese gekrümmt werden. Als Folge davon treten rücktreibende Lorentzkräfte auf, die Materie wird von den rückschnellenden Feldlinien mitgenommen, schießt über die Ausgangslage hinaus (Trägheit), nimmt ihrerseits die Feldlinie mit, verbiegt sie zur anderen Seite und der Vorgang kann in umgekehrter Reihenfolge beginnen – analog dem Bild einer schwingenden Saite. Die rücktreibende Kraft der Saitenspannung entspricht hier die rücktreibende Kraft der Feldlinienspannung. Die Alfvén-Geschwindigkeit hängt nicht von der Wellenlänge ab, die Alfvénwelle ist also dispersionsfrei. Die Welle lebt vom Bestreben gekrümmter Feldlinien sich zu verkürzen und breitet sich parallel zu ihnen aus. Die dispersionslosen Alfvén-Wellen bewegen sich in einem uniformen Feld  $\vec{B}_0$  mit der Geschwindigkeit  $v_A = \pm B_0 / (\mu_0 \rho_0)^{1/2}$ . Rotation hat einen tief greifenden Effekt, die Wellen ergeben sich in 2 unterschiedlichen

Typen: (i) Inertiale Wellen mit Frequenzen in der Größenordnung von  $\Omega$ , die MAC waves. Dieses Akronym steht für die wesentlichen Kräfte, zusammen mit dem Druckgradienten ergeben sich: Magnetische (M), Archimedische (A), der Auftrieb und die Corioliskraft (C). MAC Wellen sind dispersiv, ihre Frequenzen sind in der Größenordnung von  $\nu_A^2/2\Omega\bar{\mathcal{L}}^2$  und damit wesentlich kleiner als  $\Omega$ . Die Zeitskalen für MAC Wellen liegen im Bereich

$$\tau_{\text{MAC}} = 2\Omega\bar{\mathcal{L}}^2/\nu_A^2 = 2\Omega\mu_0\rho_0\bar{\mathcal{L}}^2/\mathcal{B}^2, \quad (\text{A.149})$$

oder etwa 4000 Jahre für  $\mathcal{B} = 0.002 \text{ T}$ . Das ist ungefähr die Zeitskala der westwärtigen Drift.

Die Corioliskraft hat als einzige Kraft eine bevorzugte Richtung. Die Lorentzkraft ist ebenfalls dominant, wirkt entgegen den Corioliskräften und bricht die rotatorischen Einschränkungen. Somit ergibt sich für sie ebenfalls die gleiche bevorzugte Richtung.

### Multipolinversion

Das intrinsische magnetische Feld kann durch Messungen im Orbit und mittels Analyse durch sphärische harmonische Funktionen bestimmt werden. Diese Technik basiert auf der Annahme, daß die Daten von quellfreien Gebieten des Raumes stammen, es gilt somit  $\nabla \times \vec{B} = 0$ . Das magnetische Feld  $\vec{B}$  kann als Gradient eines skalaren Potentials dargestellt werden

$$\vec{B} = -\nabla\Psi, \quad (\text{A.150})$$

und wird ausgedrückt durch sphärische harmonische Expansion für das interne Magnetfeld (ebenfalls Gl. A.99 und Gl. A.132):

$$\Psi = R \sum_{l=1}^{\infty} (R/r)^{l+1} \times \sum_{m=0}^l (g_l^m \cos(m\lambda) + h_l^m \sin(m\lambda)) P_l^m(\cos(\theta)). \quad (\text{A.151})$$

In A.151 sind  $P_l^m$  die Schmidt-normalisierten Legendre Polynome und  $g_l^m, h_l^m$  die sphärischen harmonischen Koeffizienten welche die Multipolkonfiguration des magnetischen Feldes beschreiben. Für eine Anzahl von Magnetfeldmessungen bestimmt A.150 ein System von linearen Gleichungen

$$\underline{A} \underline{m} = \underline{d}, \quad (\text{A.152})$$

dabei enthält die Matrix  $\underline{A}$  Ableitungen der sphärischen harmonischen Expansion des Potentials entsprechend den drei Komponenten des magnetischen Feldes, der Datenvektor  $\underline{d}$  besteht aus den Messungen und  $\underline{m} = (g_l^m, h_l^m)^T$  ist der zu bestimmende Modellvektor. Ein Lösung mit kleinsten Fehlerquadraten (least square solution) des linearen Gleichungssystems A.152 ist für gewöhnlich durch Singular Value Decomposition (SVD) bestimmt, sie ermöglicht die Zerlegung der Matrix  $\underline{A}$  in ein Produkt aus Matrizen

$$\underline{A} = \underline{U} \underline{\Lambda} \underline{V}^T, \quad (\text{A.153})$$

mit  $\underline{U}$  und  $\underline{V}$  orthogonale Matrizen und  $\underline{\Lambda}$  einer Diagonalmatrix mit positiven oder null Elementen, den singulären Werten. Bestimmt man die Pseudoinverse  $\underline{A}^+ = \underline{V} \underline{\Lambda}^{-1} \underline{U}^T$  ist der Modellvektor  $\underline{m}$  gegeben durch

$$\underline{m} = \underline{V} \underline{\Lambda}^{-1} \underline{U}^T \underline{d}. \quad (\text{A.154})$$

Die Fehlerbalken der Modellparameter können bestimmt werden durch die Analyse der Modell-Kovarianzmatrix

$$\text{cov}(\underline{m}) = \underline{A}^+ \text{cov}(\underline{d}) (\underline{A}^+)^T. \quad (\text{A.155})$$

Wenn die Daten unkorreliert sind ist die Daten-Kovarianzmatrix  $\text{cov}(\underline{d})$  eine Diagonalmatrix, die Elemente sind die Varianzen  $\sigma_d^2$  der Daten. Nimmt man an, daß alle Varianzen identisch sind, wird die Modell-Kovarianzmatrix

$$\text{cov}(\underline{m}) = \sigma_d^2 \underline{A}^+ (\underline{A}^+)^T = \sigma_d^2 (\underline{V} \underline{\Lambda}^{-2} \underline{V}^T). \quad (\text{A.156})$$

Unter der Annahme, daß alle Unsicherheiten instrumentell sind, können die Varianzen  $\sigma_d^2$  aus den Daten abgeschätzt werden:

$$\sigma_d^2 \approx \frac{1}{N_d - N_m} (\underline{d} - \underline{A} \underline{m})^2, \quad (\text{A.157})$$

mit  $N_d$  der Anzahl der Datenpunkte und  $N_m$  der Anzahl der Modellparameter. Substituiert man A.157 in A.156 sind die statistischen Fehler der sphärischen harmonischen Koeffizienten  $g_l^m$  und  $h_l^m$  gegeben durch die Diagonalelemente der Modell-Kovarianzmatrix

$$\sigma_{m,j} = \sqrt{\text{cov}(m_{jj})}. \quad (\text{A.158})$$

Wichtig ist dazu anzumerken, daß die statistischen Fehler in Gl. A.158 keine Information bezüglich der systematischen Fehler liefern. Die Elemente außerhalb der Diagonale der Modell-Kovarianzmatrix liefern zusätzliche Information über die gegenseitige Abhängigkeit der Modellparameter durch die Korrelationskoeffizienten

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(m_{ij})}{\sigma_{m,i}\sigma_{m,j}}, \quad (\text{A.159})$$

im Bereich von  $[-1,1]$ . Idealerweise sind alle Modellparameter unkorreliert und die Korrelationskoeffizienten deshalb null. In der Praxis gibt die räumlich Dichte und Verteilung der Meßwerte Aufschluß über die Korrelation zwischen unterschiedlichen Modellparametern. Der Korrelationskoeffizient ist eine geeignete Maßzahl zur Bestimmung der Unabhängigkeit von Dipol und Quadrupoltermen in der Inversion. Sie hängt nur vom Datenkern und der Kovarianz der Daten ab, nicht von den Daten selbst, dies kann man sehen von Gl. A.156 und Gl. A.158.

### Sekulare Variationen und Feldumkehr

Bereits im 17. Jahrhundert war bekannt, daß das geomagnetische Feld nicht statisch unveränderlich ist, sondern in Stärke und Richtung in einer bestimmten Art und Weise großflächig auf der Erdoberfläche variiert. Diese Variationen sind wesentlich größer als transiente Änderungen durch Ereignisse in der Ionosphäre und Magnetosphäre (oder auch plötzliche Änderungen im Erdkern), nachfolgend wird das anhand von Messungen während magnetischer Teilstürme (Substorms) gezeigt, siehe Kapitel A.3 Abb. A.18 und A.19. Sie treten auf mit Zeitskalen von etwa 10 bis  $10^9$  Jahren. Direkte Beobachtungen sind verfügbar für die letzten Jahrhunderte, sie zeigen Zeitskalen bis zu  $10^4$  Jahren. Die wichtigsten beobachteten sekularen Effekte sind folgende:

- Die Dipolkomponente vermindert sich im Betrag um  $\sim 0.04\%$  pro Jahr ( $d(g_1^0)/dt \sim 12$  nT/Jahr) und driftet westwärts mit  $\sim 0.06^\circ$  pro Jahr, entsprechend einer Periode von 6000 Jahren. Der Ursprung – zahlreiche Änderungen in der Morphologie des Feldes – liegt primär in der südlichen Hemisphäre.
- Der nicht-dipol Teil des Feldes verändert sich rascher,  $\sim 50$  nT/Jahr, allerdings mit größerer Streuung. Diese Variationen liefern eine mittlere westwärtsgerichtete Bewegung von  $0.2\%$ /Jahr, korrespondierend mit einer Periode von  $\sim 1800$  Jahren in bezug auf die feste Erde, mit starker Abhängigkeit nach Breite und unterschiedlicher harmonischer Komponente. Tatsächlich verschieben, deformieren, etc. sich diese Strukturen, sie verhalten sich wie Wirbel im Fluid und nicht wie permanente oder quasi-permanente Strukturen.
- Die größten Feldänderungen (Sekularvariation und Sekularbeschleunigung) sind bei niederen und mittleren geografischen Breiten über dem atlantischen Bereich, in der östlichen Region des Indischen Ozeans und den Kokos Inseln.

Die alternierende magnetische Polarität, wie sie neben Bruchstellen am Boden der Ozeane beobachtet werden kann, z. B. am Atlantischen Rücken, enthält wichtige Information über das historische terrestrische Magnetfeld, die Zeitskala wird als Geomagnetic Polarity Time Scale (GPTS) bezeichnet. Neben atmosphärischen Forschungen gehen wichtige Beiträge für die (physikalische) Ozeanographie zurück auf Albert Joseph Maria Defant (1884 – 1974).

### A.1.7 Meßmethoden und Instrumente

**Methoden** Für Galaxien, Galaxienhaufen und andere astrophysikalische Objekte gibt es zur Bestimmung des magnetischen Feldes die Methoden der (i) Synchrotronemission, (ii) Faradayrotation, (iii) die Zeeman-Aufspaltung und (iv) optische Polarisation des Sternenlichtes, siehe Kap. A.1.5. Im nahen Weltraum erfolgt

die Beobachtung und Messung bei solaren Magnetfeldern mittels (i) Zeeman- oder (ii) Hanle-Effekt und bei der Erde, Planeten, Asteroiden (erinnert sei hier an Arbeiten von Franz Xaver von Zach, 1754 – 1832, und an den Asterioden 21109, benannt nach dem Geodäten Hans Sünkel, 1948–) und Kometen (z. B. Beobachtungen durch Johannes Vögelin, 1500 – 1549, Komet 1531; Sigismund Ferdinand Hartmann, 1632 – 1681, Komet von 1664, somit 350 Jahre vor P67 und Rosetta, siehe Kap. 2.5; Wilhelm Freiherr von Biela, 1782 – 1856, Komet 3D/Biela aus 1826) im Regelfall durch in situ Bestimmung.

**Instrumente** Wie bereits Abschnitt A.1.4 mit historischem Bezug erahnen läßt, werden Instrumente zur Messung des magnetischen Feldes in Stärke (und Richtung) ganz allgemein Magnetometer bezeichnet und für Anwendungen in der Weltraumforschung auf Satelliten, planetaren Proben, Raketen, ebenso auf Flugzeugen/Dronen, Ballonen, etc. gewöhnlich in zwei Klassen unterteilt: (i) Skalarmagnetometer, sie messen nur den Betrag des Umgebungsfeldes  $|\vec{B}|$  unabhängig von der Richtung (Protonen-Magnetometer, optische gepumpte Magnetometer, Coupled Dark State Magnetometer – CDSM [Pollinger et al., 2012], magnetoresistive Effekte  $\Delta R/R$  bei Festkörpern) und (ii) Vektormagnetometer, sie erlauben es die einzelnen Komponenten des Magnetfeldvektors – Betrag und Richtung  $\vec{B}$  – zu ermitteln (Fluxgate Magnetometer – FGM, Searchcoil Magnetometer für AC von einigen Hz bis  $\sim 10$  kHz; neuere Designs sind hier Dualband-Instrumente aufgebaut mit einem einzelnen Sensor, z. B. bei BepiColombo). Skalarmagnetometer haben einen typischen dynamischen Bereich von einigen tausend nT, können somit keine schwachen Felder wie z. B. das interplanetare magnetische Feld (IMF) hinreichend genau messen. Die Verwendung liegt meist im niederen Erdorbit zusammen mit Vektormagnetometern um Kartierungen des Erdmagnetfeldes oder ionosphärische Untersuchungen vornehmen zu können, des weiteren, wieder im Zusammenhang mit Vektormagnetometern, als Kalibrierwerkzeug zur Echtzeitbestimmung von Korrekturfaktoren, z. B. hat das SWARM Absolut Skalarmagnetometer  $\sim 1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  bei einer Bandbreite von 0 – 100 Hz (Burst Mode). Die oberen Limits des dynamischen Bereiches sind bei  $\approx 2 \times 10^6$  nT, eine wichtiger Kennwert für Missionen zu Planeten mit starken Feldern, besonders Jupiter  $\zeta$  ( $\sim 1.2 \times 10^6$  nT gleich  $\sim 12$  G Hintergrundfeld) aber auch Saturn  $\eta$ . Im Gegensatz zu Skalarmagnetometern, deren Genauigkeit durch quantenmechanische Konstanten bestimmt ist, müssen Vektormagnetometer in speziellen Anlagen mit genauen Referenzen des Magnetfeldes in Betrag und Richtung kalibriert werden, siehe Abb. C.2. Die Stabilität vom Nullpunkt (zero level, bias) bezüglich Zeit und Temperatur und das Rauschen von Vektormagnetometern sind die wichtigsten Parameter für kleine Magnetfeldwerte wie sie im Zusammenhang mit dem IMF, der Erdmagnetosphäre und bei dia/para-magnetischen Objekten auftreten. Die Leistungsspektraldichte von wissenschaftlichen FGMs zeigt ein "shot noise" Verhalten, charakterisiert durch das  $1/f$  Spektrum mit typischen Werten von  $\approx 10^{-5} \text{ nT}^2/\text{Hz}$  bei 1 Hz. Die Quelle des Rauschens liegt im Barkhausen Mechanismus, d. h. in der Bewegung der magnetischen Domänen von ferromagnetischen Materialien im Sensorkern. Ein Fluxgate Magnetometer an Stand der Technik liefert Schwankungen des Nullpunktes von  $< 0.2 \text{ nT}/\text{Jahr}$  und  $< 0.5 \text{ nT}$  über einen Temperaturbereich  $\Delta T$  von  $-50^\circ\text{C} < T < 75^\circ\text{C}$ . Das Rauschen des Fluxgates wird stark durch mechanischen und thermischen Stress beeinflusst, ist i. A. also zeitlich und örtlich variabel. Die Maximalwerte treten während der Entwicklungs- und Testphase auf, d. h. nach dem Start im operativen wissenschaftlichen Betrieb sind kleinere Werte zu erwarten. Für weltraumtaugliche Magnetometer in wissenschaftlicher Anwendung, z. B. der Cluster Mission, siehe Kap. A.4, sind folgende Charakteristika ausschlaggebend: (i) Zuverlässigkeit, siehe Kap. B.3, (ii) Genauigkeit, (iii) geringe Leistungsaufnahme, (iv) kleine Masse und geringes Volumen, (v) großer dynamischer Bereich, (vi) geringes Rauschen, (vii) hohe Stabilität und (viii) niedrige Kosten. Die Länge eines eventuell vorhandenen Booms bei einem gegebenen S/C Design wird bestimmt durch (i) hohe Kosten eines ausklappbaren Auslegers, (ii) den potentiellen Auswirkungen auf den Dynamik des Satelliten, (iii) den Erfordernissen der Mission, (iv) der Ausrichtung der Magnetometer und (v) der Komplexität einhergehend mit dem dynamischen System.

### A.1.8 Systemkonzepte für weltraumtaugliche Magnetometer

Messungen des magnetischen Feldes ermöglichen eine Fernerkundung – "remote sensing" – vom Inneren eines Planeten oder Mondes (speziell Europa im Jupiter-System mit einem Ozean unter der Eisdecke), d. h. nicht nur Oberfläche oder Atmosphäre, etwas das ansonsten nur Schwerkraftmessungen imstande sind. Planetare Missionen konnten Messungen in der unmittelbaren Nähe der meisten Planeten unseres Son-

nensystems durchführen, ebenfalls an Monden, Kometen (sie haben im Auftreten eine näherungsweise uniforme Verteilung aus allen Richtungen), z. B. DS1 oder Rosetta (Kap. 2.5) und an Asteroiden (zum Vergleich, der Asteroiden-Gürtel enthält  $\sim 4\%$  der Mondmasse). Anwendungen von Magnetfeldmessungen in der Raumfahrttechnik inkludieren (i) Bestimmung und Kontrolle der S/C Ausrichtung, (ii) S/C Momentummanagement and (iii) Ausrichtung von wissenschaftlichen Instrumenten. Momentum wheels von S/C werden im Regelfall mit magnetischen Einrichtungen entsättigt. Das Erdmagnetfeld  $\delta$  in mittleren/höheren Breiten hat eine Größe von  $\sim 1 \text{ G} = 10^5 \text{ nT}$  (Karte Abb. A.9), Jupiters  $\zeta$  markantes Feld hat  $\sim 12 \text{ G}$  (größer bei den Polen). Solare/Stellare magnetische Felder im Zusammenhang mit koronalen Schleifen und weiteren Strukturen können Werte von einigen tausend Gauss erreichen (Kap. A.2.2 und Kap. A.1.5). Am anderen Ende des dynamischen Bereiches liegt das IMF bei Erdentfernung (1 AU) mit einer typischen Größe von  $5 - 10 \text{ nT}$ , bei Planeten wie Uranus  $\delta$  und Neptun  $\zeta$  kann es Werte von  $0.05 \text{ nT}$  unterschreiten, für den Heliosheath mit Voyager-Messungen siehe Kap. A.2.3. Dieser enorme dynamische Bereich von Feldstärken stellt eine große Herausforderung im Design von weltraumtauglichen Instrumenten für unterschiedlichste Missionen dar, für duale Techniken in diesem Zusammenhang siehe Abschnitt C.2.2.

### Boden- und Flugkalibration, Ausrichtetechniken

Die bestmögliche (Boden- resp. pre-flight-) Kalibration von Vektormagnetometern zur Anwendung im Weltraum mit einem dynamischen Bereich von sub- bis kilo-nT in der Vollaussteuerung (siehe voriges Kap. A.1.7) erfordert spezielle Techniken und Anlagen, folgende Herausforderungen sind typisch: (i) Schirmung ( $\mu$ -Metall) oder Kompensation (Helmholtz-Spulensystem) des Erdmagnetfeldes und die Erzeugung von präzisen eigenen, zum Teil sehr schwachen, Testfeldern in allen Achsen, d. h. nach Betrag und Richtung, Bestimmung des "wahren Nullfeldes" und die Minimierung von thermoelektrisch induzierten magnetischen Feldern verursacht durch Temperaturgradienten  $\Delta T$ . Der typische Frequenzbereich ist zwischen DC und  $\sim 128 \text{ Hz}$  (z. B. Venus Express Magnetometer), (ii) der extreme Umgebungsbereich, speziell für Sensoren, aber auch für die Elektronik, für den spezifiziert und getestet werden muß, darunter Temperatur, Druck, Strahlung, Vibration und Schock ist durch Mission und Orbit gegeben. Die relevanten Parameter sind (ii<sub>a</sub>) minimales Rauschen, (ii<sub>b</sub>) Nullpunkt, (ii<sub>c</sub>) Skalenfaktor und (ii<sub>d</sub>) dynamische Antwort in jedem Bereich, (iii) Bestimmung der Winkelausrichtung der Sensoren zu einem externen Referenzsystem im gesamten Parameterraum der Umgebungsbedingungen, (iv) Bestimmung, Kalibration und Beseitigung von induzierten magnetischen Effekten verursacht durch ferromagnetische Materialien von hoher relativer Permeabilität  $\mu_r$ . Selbst wenn die Materialien nicht wesentlich zum Streufeld beitragen sind sie u. U. durch ihre Permeabilität dennoch Verursacher von Veränderungen in der Geometrie des Umgebungsfeldes für die Sensoren.

In der Startumgebung, nach der Inbetriebnahme und im Übergang zur wissenschaftlichen Phase, tritt eine i. d. R. minimale Änderung der Kalibrierparameter und Leistungsmerkmale auf, außer wenn Absolutinstrumente verwendet werden. Es ist deshalb notwendig während des Fluges Techniken der in-flight Kalibration anzuwenden um die ursprüngliche Präzision wiederzuerlangen. Zu diesem Zweck können S/C Ausrichtemanöver eine wichtige Quelle der Kalibration und Verifikation darstellen. Sie können effizient zur Bestimmung des effektiven Nullpunktes und der Sensorausrichtung mit Bezug auf eine Referenzachse (Koordinatensysteme Tab. C.7) benutzt werden (mehrfach bei Cassini, Mission Cassini-Huygens). Für Magnetometer im erdnahen Orbit können Kalibrierparameter aus dem Vergleich der Meßdaten mit Modellwerten des geomagnetischen Feldes über Fits (Methode kleinste Fehlerquadrate) abgeleitet werden. Bei Magnetometern für interplanetare Missionen ist dies nicht möglich, das IMF ist stark variabel. Messungen haben dennoch gezeigt, daß die primäre Variation in der Richtungsänderung und nicht im Betrag liegt. Damit ist es mit statistischen Methoden der kleinsten Fehlerquadrate möglich den Nullpunkt des Magnetometers zu eruieren, für einen Vergleich von Methoden (Belcher, Hedgecock, Davis-Smith) siehe [Leinweber et al., 2008] und [Leinweber, 2011].

## A.1.9 Quantenmechanik, Klassische- und Relativitäts-Theorie

### Quantenmechanik

Das Ehrenfest Theorem (Paul Ehrenfest, 1880 – 1933) stellt grundsätzlich die Verbindung zwischen klassischer Mechanik und Quantenmechanik her. Klassische Elektrodynamik ist ein Teilgebiet des Standard-Modells der Elementarteilchenphysik, einer einheitlichen Beschreibung von Teilchen und deren Wechselwirkung. Das Standard-Modell gibt eine kohärente quantenmechanische Beschreibung der (i) elektromagnetischen-, (ii) schwachen- und (iii) starken-Wechselwirkung (Tab. A.2),  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , basierend auf fundamentalen Bestandteilen – Quarks und Leptonen (Tab. A.3) – die Träger der Wechselwirkung (Kräfte) sind Photonen, W- und Z-Bosonen, sowie Gluonen. Das einheitliche theoretische System wird erzeugt durch das Prinzip der Eichinvarianz (tatsächlich Phase) der Kräfte und diskreten Symmetrien von Teilcheneigenschaften. Tab. A.4 zeigt die Aufschlüsselung von Hadronen in Mesonen und Baryonen.

Nr.	Kraft	Träger, Wechselwirkungsteilchen (Elektrische Ladung, Masse)
1	Elektromagnetisch (makroskopisch)	$\gamma$ Photon (0, 0)
2	Schwache Wechselwirkung (mikroskopisch)	$W^\pm$ -Bosonen ( $\pm 1$ , 80.4 GeV), Z-Boson (0, 91 GeV)
3	Starke Wechselwirkung (mikroskopisch)	$g$ Gluon (0, 0)

**Tabelle A.2:** Standardmodell: 3 (+1) fundamentale Arten, ohne makroskopische Gravitation  $\rightarrow$  Kräfte und Träger der Wechselwirkung, Bosonen. Das Higgs Boson laut CERN Messungen  $H$  (0, 125 GeV) liefert die Masse für Quarks, Leptonen,  $W$ - und  $Z$ -Bosonen (bestimmt durch Detektion der unterschiedlichen Teilchen beim Zerfall).

Gen.	Leptonen (Elektrische Ladung, Masse)	Quarks (Elektrische Ladung, Masse)
1	Elektron $e^-$ (-1, 0.511 MeV)	Up $u$ (+2/3, 2 MeV)
2	Myon $\mu^-$ (-1, 106 MeV)	Charm $c$ (+2/3, 1.25 GeV)
3	Tau $\tau^-$ (-1, 1.78 GeV)	Top $t$ (+2/3, 171 GeV)
		Down $d$ (-1/3, 5 MeV)
		Strange $s$ (-1/3, 95 MeV)
		Bottom $b$ (-1/3, 4.2 GeV)

**Tabelle A.3:** Standardmodell: 2 Arten  $\rightarrow$  (i) Leptonen und (ii) Quarks mit 12 elementaren (fundamentalen) := keine innere Struktur) Teilchen (und Antiteilchen) gruppiert nach Masse in 3 Generationen. Anmerkung  $\ast$ : Planck-Daten [Planck Collaboration et al., 2016] ergeben Neutrino-Gesamtmassen  $\sum m_\nu < 0.234$  eV und  $N_{\text{eff}} = 3.15 \pm 0.23$  Neutrinoarten. Teilchen können ihre eigenen Antiteilchen sein (Majorana Fermionen), relevant für Feld-Theorien bezüglich Neutrino-massen.

Nr.	Hadronen	
	Mesonen (Quark-Antiquark Zustände)	Baryonen (3-Quark Zustände)
1 Light unflavored	$\pi/\rho$	$\Delta^+$ (Proton p), $\Delta^{++}$
2 $S = C = B = 0$	$\eta/\phi$	$\Delta^0$ (Neutron n), $\Delta^-$
3 Strange $S = \pm 1$	$K^0, K^+$	$\Lambda^0$
4 $C = B = 0$	$K^+, K^-$	$\Lambda_c$
5 Charmed	$D^0, D^+$	$\Sigma^0$
6 $C = \pm 1$	$D^+, D^-$	$\Sigma^+, \Sigma^-$
7 Bottom	$B^0, B^+$	$\Xi^0$
8 $B = \pm 1$	$B^+, B^-$	$\Xi^-$
9	$J/\psi$	$\Omega^-$

**Tabelle A.4:** Standardmodell: Mesonen und Baryonen hervorgegangen aus Hadronen (zusammengesetzte Teilchen aus Quarks).

Aus der Sicht des Standardmodells der Elementarteilchenphysik ist die klassische Elektrodynamik ein Limit der Quantenelektrodynamik (QED), nämlich für geringe Impulse und Energieüberträge sowie für eine große Anzahl an reellen oder virtuellen Photonen. Die Lagrange-Dichte der QED ist gegeben durch

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}(x)F^{\mu\nu}(x) + \bar{\psi}(x)(i\cancel{\partial} - m)\psi(x) - q\bar{\psi}(x)\gamma_{\mu}\psi(x)A^{\mu}(x), \quad (\text{A.160})$$

das elektromagnetische Feld (linker Term) ist gekoppelt (Kopplungsterm rechts in der Summe) mit dem Dirac Feld (mittlerer Term von Gl. A.160 ist freies Dirac Feld). QED selbst ist eine Konsequenz eines Symmetriebruches in der Theorie in welcher ursprünglich die schwache und elektromagnetische Wechselwirkung vereint und die Kraftträger von beiden masselos sind. Der Bruch der Symmetrie hinterläßt die elektromagnetischen Kraftträger – die Photonen – masselos mit dem Coulomb'schen Gesetz von unendlicher Reichweite, die Kraftträger der schwachen Wechselwirkung erlangen Massen im Bereich von  $80 - 90 \text{ GeV}/c^2$  mit einer schwachen Wechselwirkung bei niedrigen Energien von extrem kurzer Reichweite ( $2 \times 10^{-18} \text{ m}$ ). Aufgrund des Ursprungs in einer vereinheitlichten Theorie stehen Bereich und Stärke der schwachen Wechselwirkung in Beziehung mit der elektromagnetischen Kopplung, der Feinstrukturkonstante  $\alpha = \Omega_0/2R_K \approx 1/137$  mit  $\Omega_0$  dem Feldwellenwiderstand und  $R_K$  der von Klitzing Konstante. Abgesehen davon, daß eine große Anzahl der Parameter vom Experiment genommen werden müssen, ist des Standardmodell zusammen mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, siehe Seite 140 ff., bei großen Skalen eine hochgenaue Beschreibung der Natur in all ihren Aspekten und Facetten.

Quantenfeldtheorie (QFT) ist der Rahmen in dem die aktuellen Theorien von elektroschwacher und starker Wechselwirkung, zusammen bilden sie das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, formuliert sind. Die QED liefert die vollständige Grundlage der Atomphysik und Chemie, erinnert sei hier an Arbeiten von Victor Frederick Weisskopf (1908 – 2002), er war in den Jahren 1961 – 1966 ebenfalls Direktor des CERN (er bezeichnete Teilchenbeschleuniger als "Gotische Kathedralen des 20. Jahrhunderts"), und an Kurt Gottfried (1929–). In der Quantenchromodynamik (QCD) sind die Wechselwirkungen stärker, sie manifestiert eine größere Vielfalt an Phänomenen, ein Charakteristikum der Quantenfeldtheorie, speziell die Abhängigkeit der effektiven Kopplungskonstanten von Entfernung und Energieskala und die Erscheinung des "Confinement". Die QFT liefert ebenfalls mächtige Werkzeuge für die Physik der kondensierten Materie, speziell in Verbindung mit Vielteilchenproblemen, die Kernideen sind dabei zweifach: (i) Erstens, die grundlegenden dynamischen Freiheitsgrade sind Operatorfunktionen in Raum und Zeit – sogenannte Quantenfelder, sie gehorchen geeigneten Kommutator-Relationen und (ii) Zweitens, die Interaktion zwischen diesen Feldern ist lokal. Die QFT erklärt (i) die Existenz von ununterscheidbaren Teilchen, (ii) die Phänomene der Quantenstatistik und (iii) die Existenz von Antiteilchen. Diese drei herausragenden Fakten sind im wesentlichen Konsequenzen der freien Quantenfeldtheorie. Zwei zusätzlich bedeutende Tatsachen – zitiert sei hier L. Wittgenstein: *Die Tatsachen gehören alle nur zur Aufgabe, nicht zur Lösung und Wir machen uns Bilder der Tatsachen* – (iv) die Möglichkeit der Teilchenerzeugung und Teilchenvernichtung sowie (v) die Assoziierung von Teilchen mit Kräften, sind wesentliche Konsequenzen der klassischen Feldtheorie. Die Lagrange'sche Dichte zur Beschreibung des elektromagnetischen Feldes (via Variationsprinzip) bei Abwesenheit eines materiellen Mediums führt nicht über die 6 Feldkomponenten  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$ , sie sind nicht unabhängig voneinander und eignen sich deshalb nicht als generalisierte Koordinaten (generalisierte Koordinaten  $\eta_i(x_1, x_2, x_3, t)$  dienen dazu – ein Feld := eine/mehrere unabhängige Funktionen von Raum und Zeit – zu definieren). Stattdessen werden die Potentiale  $\vec{A}$  und  $\phi$  als generalisierten Koordinaten des Feldes verwendet. Die Lagrange'sche Dichte, die auf die Feldgleichungen  $\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$ ,  $\nabla \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{4\pi\vec{J}}{c}$  führt, lautet

$$\mathcal{L} = \frac{E^2 - B^2}{8\pi} - q\phi + \frac{\vec{j} \cdot \vec{A}}{c}, \quad (\text{A.161})$$

wobei  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  durch  $\vec{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ ,  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  auszudrücken sind. Das Volumenintegral der Lagrange'sche Dichte ist die vollständige Lagrange-Funktion. Die Lagrange'sche Dichte des elektromagnetischen Feldes  $\mathcal{L}$  enthält ebenfalls nicht die Ableitung  $\partial_t\phi$ , demnach gibt es keinen zu  $\phi$  konjugierten kanonischen Impuls und die Hamilton'sche Formulierung läßt sich nicht anwenden. Die Schwierigkeiten rühren daher, daß das Skalar- und Vektorpotential keine vollständig unabhängigen Größen sind, sie sind durch eine Eichbedingung verknüpft. Diese Eichforderung erlaubt eine der generalisierten Koordinaten

zu eliminieren, so daß das Feld nur durch unabhängige Koordinaten beschrieben ist, siehe nachstehendes Kap. A.1.9 Seite 135.

Die vollständige Lagrange-Funktion für ein Teilchen-System mit Ladungen und Strömen enthält sowohl einerseits das elektromagnetische Feld als auch andererseits die mechanische Bewegung der  $n$  Teilchen

$$\mathcal{L} = \int \frac{E^2 - B^2}{8\pi} dV + \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 - \sum_i q_i \left( \phi_i - \frac{\vec{v}_i \cdot \vec{A}_i}{c} \right). \quad (\text{A.162})$$

Sie ist eine Funktion der generalisierten Koordinaten  $\phi, \vec{A}$  mit stetigen Ortsindizes  $x_1, x_2, x_3$  und der generalisierten Koordinaten  $\vec{r}_i$  der Teilchen. Ein einziges Hamilton'sches Prinzip ist also ausreichend für beide Systeme und zeigt hervorragend diese innere Entfaltung der Zusammenhänge. Eine Variation bezüglich der {Potentiale, Teilchenkoordinaten} erzeugt die {Maxwell'schen Feldgleichungen, Bewegungsgleichungen der Teilchen}. Der erste Term ist die Lagrange-Funktion für das Feld bei Abwesenheit der geladenen Teilchen, der mittlere Term die Lagrange-Funktion für die Teilchen bei Abwesenheit des Feldes und der letzte Term liefert die Wechselwirkung zwischen Teilchen und Feld (genau der Teil von  $\mathcal{L}$  für die Teilchen, der die auf die Teilchen wirkenden elektromagnetischen Kräfte hervorruft), analog Gl. A.160.

Als Maxwell seine Gleichungen der Elektrodynamik fertig hatte, stellte er fest, daß sie freie elektromagnetische Wellen ohne Quellterm ermöglichen. Die klassischen elektrischen und magnetischen Felder scheinen ihr "eigenes Leben" zu führen. Elektrische und magnetische Kräfte zwischen geladenen Teilchen entstehen durch die Wirkung eines Teilchens als Quelle für elektrische und magnetische Felder, welche dann andere Teilchen beeinflussen. Mit der Beziehung zwischen Feldern und Teilchen, wie sie in der Quantenfeld-Theorie ist, korrespondiert Maxwell's Entdeckung mit der Existenz von Photonen und die Erzeugung von Kräften entspricht dem Austausch von virtuellen Photonen. Die Vorstellung, daß Kräfte – oder allgemeiner, Wechselwirkungen – mit dem Austausch von Teilchen verbunden sind, ist eine generelle Eigenschaft der QFT.

Das klassische elektromagnetische Feld kann in unabhängige Oszillatoren mit beliebig hoher Wellenzahl zerlegt werden. Entsprechend dem Gleichverteilungs-Theorem der klassischen statistischen Mechanik muß im thermischen Gleichgewicht bei einer Temperatur  $T$  jeder Oszillator die mittlere Energie  $kT$  haben. Die Quantenmechanik verändert die Situation durch Einführung von Oszillatoren der Frequenz  $\omega$  mit quantisierten Energien in Einheiten  $\hbar\omega$ . Die hochfrequenten Moden werden exponentiell durch den Boltzmann-Faktor unterdrückt, anstelle von  $kT$  erhält man

$$\frac{\hbar\omega e^{-\hbar\omega/kT}}{1 - e^{-\hbar\omega/kT}}. \quad (\text{A.163})$$

Die Rolle des Quantums ist somit eine Verhinderung der Ansammlung von Energie in der Form von sehr kleinen Amplituden-Anregungen von beliebig hohen Frequenz-Moden. Es ist sehr effektiv in der Unterdrückung der thermischen Anregung von hochfrequenten Moden. Allerdings, abgesehen von der Beseitigung dieser beliebig kleinen Amplitudenanregungen, führt die Quantentheorie ein, daß die Moden immer intrinsisch angeregt sind, proportional zu  $\hbar$ . Diese sogenannte Nullpunkts-Bewegung ist eine Konsequenz der Unbestimmtheits-Relation. Für einen harmonischen Oszillator der Frequenz  $\omega$  ist die Grundzustands-Energie nicht null sondern  $\hbar\omega/2$ . Im Falle von elektromagnetischen Feldern, durch Summation der hochfrequenten Moden, führt dies zu divergenten Gesamtgrundzustands-Energien. Für die meisten physikalischen Zwecke ist die absolute Normalisierung der Energie unbedeutend, diese spezielle Divergenz macht die Theorie somit nicht wertlos, insoweit, als nur Differenzen in der Energie physikalisch signifikant sind – diese Singularität kann ignoriert werden. Allerdings kann die Änderung der in der Nullpunktsenergie wenn man ein magnetisches Feld einführt nicht vernachlässigt werden. In der nichtgravitativen Physik sind nur Energiedifferenzen sinnvoll, man "kehrt dieses Problem unter den Teppich". Gravitation sollte diese Energie allerdings sehen.

### Eichinvarianz

Eichinvarianz ist die Basis der Theorien von elektroschwacher und starker Wechselwirkung, dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik (Seite 132). Die Anfänge gehen zurück in das Jahr 1820 als die ersten

Theorien zum Elektromagnetismus entwickelt wurden. Verschiedene Formen des Vektorpotentials, unterschiedlich im Gradienten einer Skalarfunktion, sind physikalisch äquivalent wenn das skalare Potential mitverändert wird:  $\vec{A} \rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \nabla\chi$ ,  $\phi \rightarrow \phi' = \phi - \partial\chi/c\partial t$ ,  $\psi \rightarrow \psi' = \psi e^{(ie\chi/\hbar c)}$ . Die Invarianz der Theorie unter kombinierter Transformation dieser Gleichungen wird als Eichinvarianz (gauge invariance, gauge symmetry) bezeichnet. Der dänische Physiker Ludvig Valentin Lorenz (1829 – 1891) hat die sogenannten retardierten Skalar- und Vektorpotentiale eingeführt und zeigte, daß sie den sogenannten "Lorentz" Bedingungen genügen, obwohl dieser niederländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz (1853 – 1928) mehr als 1/4 Jahrhundert nach ihm wirkte (man denke an Stiglers Gesetz, das Gesetz der Eponyme). Eichinvarianz ist eine Manifestation der Nichtbeobachtbarkeit von  $A^\mu$ . Jedoch sind integrale Größen, berechnet über einen geschlossenen Pfad, beobachtbar – als Beispiel dient der Aharonov-Bohm Effekt. Das geschlossene Integral über das Vektorpotential kann mittels Stoke'schen Theorem in den magnetischen Fluß durch die Schleife konvertiert werden, d. h. des Ergebnis ist darstellbar in Termen des magnetischen Feldes, wenn auch in einer nichtlokalen Art und Weise. Man ist frei in der Entscheidung ob man mit Feldern oder Potentialen arbeitet, das lokale Vektorpotential ist jedoch keine Observable.

Die Eichinvarianz der klassischen Feldtheorie und der Elektrodynamik im speziellen erlaubt, daß man Potentiale  $A^\mu$  mit unterschiedlichen Eichbedingungen, die meisten davon nicht Poincaré invariant, betrachtet: (i)  $\partial_\mu A^\mu = 0$ , ( $\mu = 1, 2, 3, 4$ ) Lorenz Eichung, (ii)  $\nabla \cdot \vec{A} = \partial_j A_j = 0$ , ( $j = 1, 2, 3$ ) Coulomb- oder Strahlungseichung, (iii)  $n_\mu A^\mu = 0$  ( $n^2 = 0$ ) Lichtkegeleichung, (iv)  $A_0 = 0$  Hamilton'sche oder zeitliche Eichung, (v)  $A_3 = 0$  axiale Eichung, (vi)  $x_\mu A^\mu = 0$  Fock-Schwinger Eichung, (vii)  $x_j A_j = 0$  Poincaré Eichung. Eine günstige Wahl der Eichung erleichtert die Berechnungen.

In der Störungstheorie erhält man den Propagator eines virtuellen Photons mit Viererimpuls  $k$  in der Form  $D(k)^{\mu\nu} = -[g^{\mu\nu} + (\alpha - 1)k^\mu k^\nu / k^2] / k^2$ , die beiden am häufigsten verwendeten Fälle sind die Feynman Eichung  $\alpha = 1$  und Landau Eichung  $\alpha = 0$ . Im korrekten Result einer Berechnung ist der Eichparameter  $\alpha$  nicht mehr enthalten. Im statischen Limit, d. h. Frequenz gleich null, vereinfacht sich der Propagator zu  $D_{ij}(\vec{k}, 0) = (\delta_{ij} + (\alpha - 1)k_i k_j / |\vec{k}|^2) / |\vec{k}|^2$ ,  $D_{00}(\vec{k}, 0) = 1 / |\vec{k}|^2$ ,  $D_{0j}(\vec{k}, 0) = D_{j0}(\vec{k}, 0) = 0$ , das ist gleichzeitig der Propagator für das Helmholtz Potential und das statische Coulomb Potential.

### Klassische Elektrodynamik

Die quantitativen Gesetze der elektromagnetischen Erscheinungen ({sichtbarer / gesamter kosmischer} Spektralbereich  $\{1/ \gtrsim 75\}$  Oktaven) werden durch die Maxwell'schen Gleichungen ausgedrückt, diese Gleichungen erweisen sich als gültig für jeden Beobachter, wie er sich auch bewegen mag. Die Grenze der Maxwell'schen Gleichungen (James Clerk Maxwell, 1831 – 1879) stellt die Quantennatur der abgestrahlten Energie dar. Solange die vorkommende Energie  $E$  bei gegebenen Erscheinungen wesentlich größer als die Energie  $h\nu$  ist, d. h. eine sehr große Anzahl von Teilchen (Photonen) vorhanden ist, behalten die Maxwell'schen Gleichungen ihre Gültigkeit. Die Maxwell'schen Gleichungen folgen aus der Ladungs- und Flußerhaltung. Jede Ladung ist proportional zur Elementarladung  $e$ , jeder Fluß ist proportional zum elementaren Fluß  $h/2e$ . Der Gültigkeitsbereich von Methoden ist bestimmt durch die Relation zwischen Wellenlänge  $\lambda$  und Strukturgröße  $D$ . Bei  $\lambda \gg D$  gilt Schaltkreistechnik (passive Elemente sind Widerstand, Induktivität, Kondensator, Memristor),  $\lambda \sim D$  fordert Wellenphysik und  $\lambda \ll D$  Strahlenphysik.

Das elektrische und magnetische Feld  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  wurde ursprünglich mit Hilfe der Kraftgleichung eingeführt. In Coulomb'schen Experimenten (Charles Augustin de Coulomb, 1736 – 1806) wurden Kräfte zwischen lokalisierten Ladungsverteilungen beobachtet. Das elektrische Feld  $\vec{E}$  wurde als Kraft pro Ladungseinheit definiert. Ganz ähnlich wurden in Ampère'schen Experimenten (André Marie Ampère, 1775 – 1836) die gegenseitigen Kräfte in Stromschleifen studiert. Hans Christian Ørsted (1777 – 1851) erkannte, daß elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt, Jahrzehnte später entdeckte Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894) die Radiowellen. Mit der Festlegung von  $NAq\vec{v}$  als der Strom in einem Leiter mit Querschnitt  $A$  und  $N$  Ladungsträgern pro Volumeneinheit mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$ , kann man erkennen, daß  $\vec{B}$  als Kraft pro Einheitsstrom definiert ist. Das Konzept von  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  als gewöhnliche Felder ist eine klassische Notation. Die Felder können als klassisches Limit – das Limit bei großen Quantenzahlen – von der quantenmechanischen Beschreibung Seite 132 in Termen von reellen und virtuellen Photonen aufgefaßt werden. Im Bereich von makroskopischen Phänomenen und einigen atomaren Bereichen kann der diskrete Photonenaspekt des elektromagnetischen Feldes vernachlässigt werden. Die Gleichungen (Postulate) für klassische elektromagnetische Phänomene sind die Maxwell'schen Gleichungen, von Oliver Heaviside (1850 – 1925)

im Jahr 1884 auf die vektorielle Form gebracht,

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad \nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}, \quad (\text{A.164})$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{A.165})$$

und für die externen Quellen im Vakuum gilt,  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$  und  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ . Die ersten beiden Gleichungen werden zu

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \nabla \times \vec{B} - c^{-2} \partial \vec{E} / \partial t = \mu_0 \vec{J}. \quad (\text{A.166})$$

Implizit in den Maxwell'schen Gleichungen steckt die Kontinuitätsgleichung für Ladungs- und Stromdichte,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = 0. \quad (\text{A.167})$$

Dies folgt aus der Kombination der zeitlichen Ableitung der ersten Maxwell Gleichung mit der Divergenz der zweiten Gleichung. Ebenfalls essenziell in der Betrachtung der Bewegung von geladenen Teilchen ist die Lorentz Gleichung,

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = m\vec{a} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \quad (\text{A.168})$$

Sie liefert die Kraft auf eine punktförmige Ladung der Masse  $m$  und Ladung  $q$  in der Anwesenheit von elektromagnetischen Feldern. Die zeitliche Ableitung der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  gibt die Beschleunigung  $\vec{a}$ ,  $\vec{p}$  ist der lineare Impuls. Die Gleichungen sind im internationalen Einheitensystem SI geschrieben. Um die Bewegung von Teilchen bei relativistischen Energien zu beschreiben verwendet man die Lorentz Gleichung,

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \vec{v}) = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (\text{A.169})$$

mit  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . Ein Teilchen mit relativistischer Geschwindigkeit in einem konstanten magnetischen Feld  $\vec{B}$  mit Energie  $E = \gamma m c^2$  hat eine Larmor Frequenz von

$$\Omega = \frac{eB}{m\gamma}. \quad (\text{A.170})$$

### Maxwell'sche Gleichungen in makroskopischen Medien

Bis jetzt wurden elektromagnetische Felder und Quellen im Vakuum betrachtet. Die Maxwell'schen Gleichungen für die elektrischen und magnetischen Felder  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  geben die Felder überall im Raum, vorausgesetzt alle Quellen  $\rho$  und  $\vec{J}$  sind gegeben. In makroskopischen Feldern sind die Mittelwerte der Felder oder Quellen betrachtet über das Volumen groß verglichen mit den Größen von einzelnen Atomen oder Molekülen. Die makroskopischen Maxwell'schen Gleichungen sind von der selben Form mit  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  den Mittelwerten  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  der mikroskopischen oder Vakuum Maxwell'schen Gleichungen, allerdings sind  $\vec{D}$  und  $\vec{H}$  nicht mehr einfache Vielfache von  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$ . Die makroskopischen Feldgrößen  $\vec{D}$  und  $\vec{H}$ , d.h. dielektrische Verschiebung und magnetisches Feld (mit  $\vec{B}$  der magnetischen Induktion), haben Komponenten gegeben durch

$$D_\alpha = \epsilon_0 E_\alpha + (P_\alpha - \sum_\beta \frac{\partial Q'_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} + \dots), \quad (\text{A.171})$$

$$H_\alpha = \frac{1}{\mu_0} B_\alpha - (M_\alpha + \dots). \quad (\text{A.172})$$

Die Größen  $\vec{P}$ ,  $\vec{M}$ ,  $Q'_{\alpha\beta}$  – und ähnlich für höhere Ordnungen – stellen die makroskopisch gemittelten elektrischen Dipole, magnetischen Dipole, elektrische Quadrupole und höhere Momente des Mediums

in der Anwesenheit der angelegten Felder dar. Ganz ähnlich sind die Ladungs- und Stromdichten  $\rho$  und  $\vec{J}$  makroskopische Mittelwerte der "freien" Ladung und Stromdichten des Mediums. Die gebundenen Ladungen treten in den Gleichungen via  $\vec{P}$ ,  $\vec{M}$  und  $Q'_{\alpha\beta}$  in Erscheinung. Die makroskopischen Maxwell Gleichungen sind ein Verbund aus acht Gleichungen mit den Komponenten von vier Feldern  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{D}$  und  $\vec{H}$ . Die vier homogenen Gleichungen können rein formal gelöst werden wenn man  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  in Termen eines skalaren Potentials  $\Phi$  und eines Vektorpotentials  $\vec{A}$  ausdrückt. Die inhomogenen Gleichungen können nicht gelöst werden solange die abgeleiteten Felder  $\vec{D}$  und  $\vec{H}$  in Termen von  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  nicht bekannt sind. Diese impliziten Abhängigkeiten sind bekannt als materialspezifische Werte,

$$\vec{D} = \vec{D}[\vec{E}, \vec{B}], \quad \vec{H} = \vec{H}[\vec{E}, \vec{B}]. \quad (\text{A.173})$$

Für leitfähige Medien gilt zusätzlich das verallgemeinerte Ohm'sche Gesetz

$$\vec{J} = \vec{J}[\vec{E}, \vec{B}]. \quad (\text{A.174})$$

Die eckige Klammer deutet an, daß die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern nicht gerade einfach sein müssen, von der Vorbehandlung des Materials abhängig sein können, z. B. Hysterese, Nicht-linearitäten auftreten können, et cetera.

### Randbedingungen zwischen zwei unterschiedlichen Medien

Die Diskontinuitätsgleichungen werden benötigt um die Lösungen der Maxwell Gleichungen in den einzelnen Medien zu verbinden und eine Gesamtlösung für die Felder im ganzen Raum zu erreichen. Die Normalkomponenten von  $\vec{D}$  und  $\vec{B}$  auf beiden Seiten des Randes sind verknüpft mit

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \sigma, \quad (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0. \quad (\text{A.175})$$

Die Normalkomponente von  $\vec{B}$  ist stetig und die Diskontinuität der Normalkomponente von  $\vec{D}$  in jedem Punkt des Randes ist äquivalent der Oberflächen-Ladungsdichte in diesem Punkt. Die tangentialen Komponenten von  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  an beiden Seiten des Randes stehen in Beziehung über die Relationen

$$\vec{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0, \quad \vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K}. \quad (\text{A.176})$$

Die Stromdichte an der Oberfläche  $\vec{K}$  hat selbstverständlich nur Komponenten parallel zur Oberfläche in jedem Punkt des Randes. Die tangentialen Komponenten von  $\vec{E}$  über den Rand hinweg sind stetig, hingegen sind die tangentialen Komponenten von  $\vec{H}$  unstetig, und zwar genau mit der Größe der Oberflächen-Stromdichte, mit der Richtung parallel zu  $\vec{K} \times \vec{n}$ .

Die Maxwell'schen Gleichungen in einer geometrischen, vom Bezugssystem unabhängigen Form lauten

$$F^{\alpha\beta}_{;\beta} = \begin{cases} 4\pi J^\alpha & \text{in Gauß'schen Einheiten,} \\ J^\alpha/\epsilon_0 = \mu_0 J^\alpha & \text{in SI Einheiten,} \end{cases} \quad (\text{A.177})$$

$$\epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} F_{\gamma\delta;\beta} = 0. \quad (\text{A.178})$$

$J^0 = \rho_e$  ist die Ladungsdichte und  $J^i = i_i$  die Stromdichte, die Lichtgeschwindigkeit wurde auf 1 gesetzt, d. h.  $\epsilon_0 = 1/\mu_0$ . Die Maxwell'schen Gleichungen in frameabhängiger Form lauten

$$\nabla \cdot \vec{E} = \begin{cases} 4\pi\rho_e & \text{in Gauß'schen Einheiten} \\ \rho_e/\epsilon_0 & \text{in SI Einheiten} \end{cases}, \quad (\text{A.179})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (\text{A.180})$$

$$\nabla \times \vec{B} - \partial\vec{E}/\partial t = \begin{cases} 4\pi\vec{j} & \text{in Gauß'schen Einheiten} \\ \mu_0\vec{j} & \text{in SI Einheiten} \end{cases}, \quad (\text{A.181})$$

$$\nabla \times \vec{E} + \partial\vec{B}/\partial t = 0. \quad (\text{A.182})$$

Der Energie-Impuls Tensor (stress energy tensor) für das elektromagnetische Feld lautet

$$T^{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi}(F^{\alpha\mu}F_{\mu}^{\beta} - \frac{1}{4}g^{\alpha\beta}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}), \quad (\text{A.183})$$

mit den einzelnen Komponenten  $T^{00} = (E^2 + B^2)/8\pi$ ,  $T^{0j}\vec{e}_j = T^{j0}\vec{e}_j = \vec{E} \times \vec{B}/4\pi$  und  $T^{jk} = 1/8\pi[(E^2 + B^2)\delta_{jk} - 2(E_j E_k + B_j B_k)]$ . Für Teilchen mit Ladung  $q$ , Ruhemasse  $m$  und 4er-Geschwindigkeit  $\vec{u}$  im elektromagnetischen Feld  $F$  ergibt sich die elektromagnetische Kraft in Indexnotation

$$dp^\alpha/d\tau = qF^{\alpha\beta}u_\beta. \quad (\text{A.184})$$

Dabei gilt  $F^{0j} = -F^{j0} = E_j$ ,  $F^{ij} = \epsilon_{ijk}B_k$ ,  $dt/d\tau = u^0 = \gamma$ ;  $dp^j/d\tau = \gamma dp^j/dt = q\gamma(E_j + \epsilon_{ijk}v_j B_k)$ ,  $dp^0/d\tau = \gamma dp^0/dt = \gamma E_j v_j$ ,  $E = p^0$  ist die Teilchenenergie,  $d\vec{p}/dt = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ ,  $dE/dt = \vec{v} \cdot \vec{E}$ .

### Relativistische Elektrodynamik

Oftmals sind auch die konstitutiven Relationen – also die Relationen, die die Feldgrößen in Anwesenheit der eventuell sich bewegenden Materie miteinander oder mit den Polarisationsgrößen in Verbindung bringen – wichtig, siehe [Simonyi, 1989]. Man will also die Lorentz-invariante Form der Gleichungen

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (\text{A.185})$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} + \vec{M}, \quad (\text{A.186})$$

herleiten. Bekannt ist der elektromagnetische Feldtensor  $F$ , der  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  in sich vereinigt. Es muß also noch einen Tensor, der aus  $\vec{D}$  und  $\vec{H}$ , und einen weiteren, der aus  $\vec{P}$  und  $\vec{M}$  aufgebaut ist, konstruiert werden. Bezeichnet man den ersten mit  $G$  und den zweiten mit  $M$  (diesen letzteren könnte man ebensogut mit  $P$  bezeichnen), dann lauten die Beziehung zwischen diesen drei Tensoren

$$G = \frac{1}{\mu_0} F + M, \quad (\text{A.187})$$

mit

$$M = \frac{\kappa_m}{\mu_0} F + \frac{\kappa_e - \kappa_m}{\mu_0 c^2} u \times (Fu), \quad (\text{A.188})$$

und  $\kappa_m = 1/\mu_0 - 1$ ,  $\kappa_e = \epsilon_r - 1$ . Hier bedeuten  $u \times (Fu)$  das Vektorprodukt der Vierervektoren  $u$  und  $Fu$ . Unter dem Vektorprodukt der Vierervektoren  $a$  und  $b$  versteht man einen Tensor, dessen Komponente  $T_{ik} = a_i b_k - a_k b_i$  ist. Es ergibt sich

$$G = \frac{1}{\mu_0} F + M = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} [F + \frac{\epsilon_r \mu_r - 1}{c^2} u \times (Fu)]. \quad (\text{A.189})$$

Die Gleichungen vereinfachen sich, wenn die Glieder mit  $(v/c)^2$  vernachlässigt werden können,

$$\vec{P} = \epsilon_0(\kappa_e \vec{E} - (\kappa_m - \kappa_e) \vec{v} \times \vec{B}), \quad (\text{A.190})$$

$$\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} (\kappa_m \vec{B} - (\kappa_m - \kappa_e) \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c^2}), \quad (\text{A.191})$$

oder

$$\vec{P} = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \epsilon_0(1 - \frac{1}{\mu_r}) \vec{v} \times \vec{B}, \quad (\text{A.192})$$

$$- \mu_0 \vec{M} = (1 - \frac{1}{\mu_r})(\vec{B} - \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c^2}) - (\epsilon_r - 1) \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c^2}. \quad (\text{A.193})$$

Ein bewegter magnetisierbarer Stoff ist äquivalent der elektrischen Polarisierung  $P_{aequ} = \epsilon_0(1 - 1/\mu_r) \vec{v} \times \vec{B}$ , ein bewegter Isolierstoff bedeutet dagegen  $M_{aequ} = -(\epsilon_r - 1) \vec{v} \times \vec{E}$ . Es gilt weiters

$$\vec{D} = \epsilon_0(\epsilon_r \vec{E} - \frac{\epsilon_r \mu_r - 1}{\mu_r} \vec{v} \times \vec{B}), \quad (\text{A.194})$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} (\frac{1}{\mu_r} \vec{B} + \frac{\epsilon_r \mu_r - 1}{\mu_r c^2} \vec{v} \times \vec{B}). \quad (\text{A.195})$$

Das Ohm'sche Gesetz kann zudem folgendermaßen geschrieben werden kann:

$$\vec{J} = \gamma \kappa (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = \gamma \kappa \vec{E}'. \quad (\text{A.196})$$

### Spezielle Relativitätstheorie

Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) entstand ursprünglich um elektromagnetischen Erscheinungen Rechnung zu tragen. Einstein's spezielle Theorie der Relativität behandelt sogenannte Inertialsysteme, ist aber ebenfalls auf beschleunigte Systeme anwendbar, man denke z. B. ans Ehrenfest'sche Paradoxon (Paul Ehrenfest). Ein Inertialsystem ist gemäß Newton's Theorie ein System  $\ddot{x} = 0$ ,  $x = at + b$ , d. h. es gibt keine Beschleunigung und die Bewegung des Inertialsystems ist gleichmäßig mit konstanter Geschwindigkeit entlang einer geraden Linie. Ein System, daß sich gleichmäßig zu einem Inertialsystem bewegt, ist ebenfalls ein Inertialsystem. Gemäß der klassischen Mechanik sind diese beiden Systeme mittels einer Galilei Transformation verbunden. Das Michelson-Morley Experiment bestätigte die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, gültig für jedes Inertialsystem. Das ist unvereinbar mit der Galilei Transformation, die korrekten Beziehungen liefert die Lorentz Transformation (Lorentz, 1904). Ihre allgemeine Gültigkeit für die Physik, inklusive der Mechanik, wurde von Albert Einstein (1879 – 1955) im Jahre 1905, also etwas mehr als vor einem Jahrhundert, erkannt. Die klassische Mechanik wurde ersetzt durch Einsteins spezielle Theorie der Relativität, sie hat die Anschauung von der grundlegenden Struktur der Welt gewandelt. Dazu folgende Anmerkungen und Beobachtungen:

- Die Geschwindigkeit des Lichts (Tab. C.10) ist konstant in allen Inertialsystemen, diese stehen in Bezug mittels Lorentz Transformation, d. h.  $c$  ist invariant bezüglich Lorentz Transformation. Eine Transformation dieser Art ist einigermäßen "schwer zu fassen" und gegen den "gesunden Menschenverstand".
- Für kleine Geschwindigkeiten,  $v \ll c$  bzw.  $v/c \ll 1$ , stimmt die Lorentz Transformation praktisch mit der Galilei Transformation überein. Somit ist unter "normalen Bedingungen" die spezielle Relativitätstheorie mit der Newton'schen Mechanik in Übereinstimmung.
- Die spezielle Relativitätstheorie wurde in zahlreichen Experimenten verifiziert, ohne jede Ausnahme, z. B. bei Teilchenexperimenten am Europäischen Kernforschungszentrum (Organisation / Conseil Européene pour la Recherche Nucléaire, CERN).

Die Mechanik von Galilei und Newton wurde von den Anhängern der Aristotelischen Mechanik ebenfalls als "nicht eingängig" betrachtet. Es kann gezeigt werden, daß das raum-zeitliche Linienelement  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$  ebenfalls invariant mit bezug auf die Lorentz Transformation ist. Mit der "imaginären Zeitkoordinate"  $x_4 = ict$ , mit  $i = \sqrt{-1}$  und  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$  kann das Linienelement in der Form  $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$  geschrieben werden, das ist nichts anderes als das Pythagoräische Theorem für 4 Dimensionen. Dies wurde von Hermann Minkowski (1864 – 1909) zuerst erkannt. Abgesehen davon, inzwischen ist es üblich als Koordinate für die Zeit nicht  $x_4$  sondern  $x_0 = ct$  zu verwenden, es ist eine einfache reelle Transformation der Zeitachse und das Linienelement wird zu  $ds^2 = -dx_0^2 + dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$ . Alle Größen sind danach reell, die Form wird pseudo-Euklidisch, bzw. für Mathematiker "nicht-positiv-definit" genannt.

### Allgemeine Relativitätstheorie

Das Linienelement einer ebenen Fläche in kartesischen Koordinaten  $x$  und  $y$  ist  $ds^2 = dx^2 + dy^2$ . In Polarkoordinaten  $r$  und  $\phi$  wird es zu  $ds^2 = dr^2 + r^2 d\phi^2$  mit  $x = r \cos(\phi)$ ,  $y = r \sin(\phi)$  und in allgemeinen krummlinigen Koordinaten  $u$  und  $v$  wird es geschrieben als  $ds^2 = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2$ . Die Parameter  $E$ ,  $F$ ,  $G$ , eingeführt von Carl Friedrich Gauß, sind Funktionen von  $u$  und  $v$ . Die Unterscheidung zwischen einer ebenen und gekrümmten Fläche kann nur auf der Basis bestimmter nichttrivialer Ausdrücke gemacht werden, der Gauß'schen Krümmung  $K$ , bestimmt aus  $E$ ,  $F$  und  $G$ . Wenn  $K \equiv 0$  ist die Oberfläche eine flache Ebene, ansonsten ist sie gekrümmt. Neben Gauß sind weiters János Bolyai (1802 – 1860) und Nikolai Ivanovich Lobachevski (1792 – 1856) mit nichteuklidischer Geometrie in Verbindung zu bringen (2D Raum mit konstanter negativer Krümmung). In moderner Schreibweise setzt man  $E = g_{11}$ ,  $F = g_{12} = g_{21}$ ,  $G = g_{22}$  und  $u = u_1$ ,  $v = u_2$ . Das Linienelement wird geschrieben  $ds^2 = g_{11} du_1^2 + 2g_{12} du_1 du_2 + g_{22} du_2^2$ , oder kompakter  $ds^2 = g_{ij} du_i du_j$ . Dabei wird die Summenkonvention verwendet: ein wiederholter Index bedeutet Summation über diesen Index.

Gauß'sches Theorem – Theorema egregium (1827):

Die Gauß'sche Krümmung  $K$  ist eine Größe der inneren Geometrie. Für jede Parametrisierung einer orientierten Fläche  $M$  gilt  $K = R_{1212}/g$  mit  $R_{lkij} \equiv g_{lm}R_{kij}^m$  und  $g = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}$ .

Im vorigen Beispiel laufen sowohl für  $i$  als auch für  $j$  die Summationsindizes von 1 - 2. Diese Darstellung ist besonders wertvoll, sie ist unverändert wenn die Summation von 1 - 4 oder von 0 - 3 sich erstreckt. Diese Form repräsentiert somit ebenfalls die Metrik für die vierdimensionale Raumzeit! Wenn die Koordinaten  $u_i$  bezeichnet werden mit  $x_i, i = 0, 1, 2, 3$  dann ist  $ds^2 = g_{ij}dx_i dx_j$ . In der pseudo-Euklidischen Darstellung für das Linienelement formen die  $g_{ij}$  die Matrix  $g_{ij} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ . Die  $g_{ij}$  können Funktionen der Koordinaten  $x_i$  sein und die Matrix  $g_{ij}$  wird allgemein als metrischer Tensor bezeichnet. Ähnlich zum Fall  $n = 2$  definieren die  $g_{ij}$  eine flache oder gekrümmte Raumzeit. Das Kriterium, ähnlich zur Gauß'schen Krümmung, ist nun der Riemann'sche Krümmungstensor  $R_{ijkl}$ , welcher ebenfalls von den  $g_{ik}$  gebildet wird. Wenn  $R_{ijkl} \equiv 0$  ist hat man "gekrümmte Koordinaten" in einer flachen Raumzeit der speziellen Relativitätstheorie. Diese Koordinaten korrespondieren mit rotierenden oder beschleunigten (nicht-inertialen) Koordinatensystemen. Ein nicht konstanter metrischer Tensor für den  $R_{ijkl} \equiv 0$  gilt impliziert "Trägheitskräfte" in flacher Raumzeit. Der Fall eines von Null verschiedenen Riemann'schen Tensors ist von speziellem Interesse, man kann schreiben  $R_{ijkl} = \text{Gravitationsfeld}$ . Gekrümmte Raumzeit ist äquivalent mit der Existenz eines "realen" Gravitationsfeldes, ausgedrückt (näherungsweise) vom Newton'schen Gesetz. Das ist der wesentliche Inhalt von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, d. h. die *Gravitation = Raumzeit Krümmung*. Aus dem  $R_{ijkl}$ , kann der Einstein-Tensor  $G_{ij}$  gebildet werden, Einstein schrieb  $G_{ij} = \kappa T_{ij}$ , mit  $\kappa$  als Konstante und  $T_{ij}$  ist der Energie-Impuls-Tensor. Der Tensor  $g_{ij}$  repräsentiert Geometrie,  $R_{ijkl}$  repräsentiert Krümmung und somit ebenfalls Geometrie und das gleiche gilt für den Einstein Tensor  $G_{ij}$ , abgeleitet auf rein mathematischem Wege von  $g_{ij}$ . Infolgedessen ist die linke Seite von  $G_{ij} = \kappa T_{ij}$  Repräsentant für Geometrie. Nachdem der Tensor  $T_{ij}$  Masse repräsentiert und  $\kappa$  nur eine Konstante darstellt um die Dimensionen richtig zu stellen, gilt *Masse ist dargestellt durch Geometrie*, oder exakter in Termen der Raumzeit Krümmung. In der Allgemeinen Relativitätstheorie startete Einstein mit dem Prinzip der Kovarianz: Die Gleichungen der ART sind kovariant, d. h. invariant in Bezug auf allgemeine Koordinatentransformationen – sie haben die selbe Form in jedem Koordinatensystem. In gekrümmter Raumzeit sind Inertialsysteme theoretisch unmöglich, praktisch können Systeme definiert werden die sehr knapp an Inertialsysteme herankommen und damit eine Art bevorzugtes System darstellen. Das macht den Übergang zur Newton'schen Mechanik möglich.

Seit der Zeit von Newton wurde bereits erkannt, daß Gravitations- und Trägheitskräfte in der gleichen Art und Weise agieren, sie können nicht voneinander getrennt werden. Der Grund ist die Äquivalenz zwischen "träger Masse",  $m$  im Newton'schen Gesetz der Bewegung und "schwerer Masse", das  $m$  in Newton'schen Gravitationsgesetz. In der ART sind schwere und träge Massen ident weil Schwerkraft und Trägheitskräfte sind im wesentlichen die gleichen Phänomene. Sie treten auf, wenn das Koordinatensystem in der Raumzeit gekrümmt ist. An einem einzelnen Punkt sind Gravitations- und Trägheitskräfte untrennbar miteinander verwoben. Will man nur Gravitation anstelle von Schwerkraft, muß die berechnete Zentrifugalkraft von der gemessenen Schwerkraft subtrahiert werden, d. h. "Schwerkraft = Gravitation + Trägheitskräfte". Für historische Belange sind weiters zu erwähnen Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach (1838 – 1916) (Mach'sches Prinzip), Roland Weizenböck (1885 – 1955), er hatte einen Ansatz mit Torsion anstatt Krümmung bei der ART (Otto Neugebauer war einer seiner Studenten), Walter (Walther) Mayer (1887 – 1948), seine Arbeiten beschäftigten sich mit der Vereinigung von Gravitation und Elektromagnetismus und Kurt Friedrich Gödel (1906 – 1978) mit seinen Unvollständigkeits-Sätzen und geschlossenen zeitartigen Weltlinien in der ART.

### Feldstärketensor $F_{\mu\nu}$ und Maxwell'sche Gleichungen in Vierervektoren

Der elektromagnetische Feldstärketensor  $F_{\mu\nu}$  ist ein einzelnes Tensorfeld zur Beschreibung des Elektromagnetismus

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_1 & -E_2 & -E_3 \\ E_1 & 0 & B_3 & -B_2 \\ E_2 & -B_3 & 0 & B_1 \\ E_3 & B_2 & -B_1 & 0 \end{pmatrix} = -F_{\nu\mu},$$

als antisymmetrischer (0,2) Tensor ist er immer spurlos.

Die Maxwell'schen Gleichungen

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu \quad (\text{A.197})$$

$$\partial_{[\mu} F^{\nu\lambda]} = 0 = \partial_\mu F^{\nu\lambda} + \partial_\nu F^{\lambda\mu} + \partial_\lambda F^{\mu\nu} \quad (\text{A.198})$$

entsprechend A.197 den inhomogenen Gleichungen  $\nabla \times \vec{B} - \partial_t \vec{E} = \vec{J}$  und  $\nabla \cdot \vec{E} = \rho$  und A.198 den homogenen Gleichungen  $\nabla \cdot \vec{E} + \partial_t \vec{B} = 0$  und  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  transformieren als Tensoren, d. h. aufgrund ihrer Gültigkeit in einem Inertialsystem sind sie gültig für alle Lorentz transformierten Systeme.

Die inhomogenen Gleichungen A.197 erhält man ebenfalls aus der Euler-Lagrange Gleichung A.199

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_\nu} - \partial_\mu \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu A_\nu)} \right) = 0 \quad (\text{A.199})$$

mit der Lagrangedichte (einer skalaren Funktion in der Raumzeit)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\nu\mu} + A_\mu J^\mu. \quad (\text{A.200})$$

Der Feldstärketensor ausgedrückt durch das Vektorpotential  $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$  ist eichinvariant, d. h. durch Eichtransformation des Vektorpotentials  $A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \lambda(x)$  bleibt der Feldstärketensor  $F_{\mu\nu} \rightarrow F_{\mu\nu} + \partial_\mu \partial_\nu \lambda - \partial_\nu \partial_\mu \lambda$  unverändert, weil  $[\partial_\mu \partial_\nu] = 0$  gilt.

Der Energie-Impuls Tensor für das elektromagnetische Feld lautet

$$T^{\mu\nu} = F^{\mu\lambda} F^\nu_\lambda - \frac{1}{4} \eta^{\mu\nu} F^{\lambda\sigma} F_{\lambda\sigma}. \quad (\text{A.201})$$

Das Standardmodell der Teilchenphysik (Seite 132) gliedert sich in (i) Eichfelder (Spin 1) entsprechend "Kräften" (starke, schwache, elektromagnetische) in der Natur, (ii) Higgsfelder (skalare Spin 0 Felder) und (iii) Fermionen (Spin 1/2) nochmals unterteilt in (iii<sub>1</sub>) Leptonen (Elektronen, Neutrinos) und (iii<sub>2</sub>) Quarks, welche durch Spinoren beschrieben werden.

### Die kovariante Ableitung

Die Krümmung hängt von der Metrik ab, welche die Geometrie der Mannigfaltigkeit festlegt. Die Mannigfaltigkeit selbst ist ein Raum, eventuell gekrümmt mit komplizierter Topologie, der sich lokal wie ein n-dimensionaler Euklidischer Raum  $\mathbb{R}^n$  verhält. Die glatte Vereinigung dieser lokalen Gebiete bildet die vollständige Mannigfaltigkeit. Die Krümmung manifestiert sich selbst in der "Konnektion", sie gibt die Möglichkeit Vektoren von Tangentenräumen naheliegender Punkte in Beziehung zu setzen. Eine einzigartige "Konnektion", konstruiert von der Metrik und deren partiellen Ableitungen, ist gegeben durch das Christoffel-Symbol

$$\Gamma_{\mu\nu}^\lambda = \frac{1}{2} g^{\lambda\sigma} (\partial_\mu g_{\nu\sigma} + \partial_\nu g_{\sigma\mu} - \partial_\sigma g_{\mu\nu}). \quad (\text{A.202})$$

Die Differenz zweier Konnektionen ist allerdings ein (1,2) Tensor, z. B. ist der Torsionstensor (antisymmetrisch in den unteren Indizes) gegeben durch

$$T_{\mu\nu}^\lambda = \Gamma_{\mu\nu}^\lambda - \Gamma_{\nu\mu}^\lambda = 2\Gamma_{[\mu\nu]}^\lambda, \quad (\text{A.203})$$

Torsionsfreiheit bedeutet  $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda = \Gamma_{(\mu\nu)}^\lambda$ , also Symmetrie in den unteren Indizes. Eine Konnektion ist metrikkompatibel, wenn die kovariante Ableitung der Metrik verschwindet. Eine grundlegende Bedeutung des Christoffel-Symbols A.202 (kein Tensor) liegt darin, daß es die Bildung der kovarianten Ableitung zusammen mit der partiellen Ableitung erlaubt

$$\nabla_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma_{\mu\sigma}^\nu V^\sigma, \quad (\text{A.204})$$

sie ist koordinaten-unabhängig und eine Abbildung vom (k,l) Tensorfeld auf ein (k,l+1) Tensorfeld. Weiters erscheint A.202 ebenfalls in der Definition der Geodäte A.205, eine gekrümmte Raum Verallgemeinerung des Konzeptes der geraden Linie vom Euklidischen Raum

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma_{\rho\sigma}^\mu \frac{dx^\rho}{d\lambda} \frac{dx^\sigma}{d\lambda} = 0. \quad (\text{A.205})$$

Der mathematisch-technische Ausdruck von Krümmung ist gegeben durch den Riemann-Tensor (Krümmungstensor), einem (1,3) Tensor bestimmt von der Konnektion – d. h. durch nichttensorielle Elemente – und deren partiellen Ableitungen

$$R_{\sigma\mu\nu}^{\rho} = \partial_{\mu}\Gamma_{\nu\sigma}^{\rho} - \partial_{\nu}\Gamma_{\mu\sigma}^{\rho} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\rho}\Gamma_{\nu\sigma}^{\lambda} - \Gamma_{\nu\lambda}^{\rho}\Gamma_{\mu\sigma}^{\lambda}. \quad (\text{A.206})$$

Sämtliche Eigenschaften bezüglich der Krümmung einer Mannigfaltigkeit sind durch den Riemann-Tensor [A.206](#) gegeben, ist er null ist die Metrik flach. Die Einstein'sche Gleichung setzt bestimmte Komponenten dieses Tensors in Verbindung mit dem Energie-Impuls-Tensor. Der Ricci-Tensor

$$R_{\mu\nu} = R_{\mu\lambda\nu}^{\lambda} \quad (\text{A.207})$$

ist die einzige unabhängige Kontraktion bei Christoffel Konnektion, er ist symmetrisch  $R_{\mu\nu} = R_{\nu\mu}$ , eine Konsequenz der Symmetrien des Riemann-Tensors. Der Ricciskalar ist die Spur des Ricci-Tensors

$$R = R_{\mu}^{\mu} = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} \quad (\text{A.208})$$

und enthält alle Informationen bezüglich Spuren des Riemann-Tensors. Der spurfreie Teil wird gebildet durch den Weyl-Tensor, d. h. im Riemann-Tensor sind alle Kontraktionen entfernt; er ist invariant unter konformen Transformationen. Der Einstein-Tensor wird gebildet mit der spur-invertierten Version des Ricci-Tensors

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R, \quad (\text{A.209})$$

seine kovariante Ableitung  $\nabla^{\mu}G_{\mu\nu} = 0$  verschwindet.

### Einstein'sche Gleichung

Ausgehend von der Poisson Gleichung für Newtonische Felder

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho \quad (\text{A.210})$$

soll eine relativistische Verallgemeinerung über die Relation von Tensoren ebenfalls die Form einer Differentialgleichung (DGL) zweiter Ordnung

$$\nabla^2 g_{\mu\nu} \propto T_{\mu\nu} \quad (\text{A.211})$$

haben. Letztlich ergibt sich die Einstein'sche Gleichung der ART mit ihrer nichtlinearen Struktur als Beziehung einerseits zwischen Geometrie, dargestellt durch den Ricci-Tensor, Ricciskalar und der Metrik und andererseits dem Energie-Impuls-Tensor zu

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}. \quad (\text{A.212})$$

Durch Vergleich mit dem Newtonischen Limit und der Fluidbeschreibung  $T_{\mu\nu} = (p + \rho)U_{\mu}U_{\nu} + pg_{\mu\nu}$  erhält man die Konstante  $\kappa$  und abermals den Zusammenhang zwischen Krümmung der Raumzeit bei Vorhandensein von Energie und Impuls und zusätzlich der kosmologischen Konstante (Seite [73](#)) um die Möglichkeit einer Vakuum-Energiedichte zu berücksichtigen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}. \quad (\text{A.213})$$

Die nichtlineare Struktur – damit gilt das Superpositionsprinzip nicht – der Einstein'schen Gleichung macht es schwierig exakte Lösungen zu finden. Symmetrien der Metrik, sogenannte Isometrien, implizieren Erhaltungsgrößen und sind extrem hilfreich um das Verhalten von Testteilchen in gekrümmter Raumzeit zu untersuchen. Killing Vektorfelder, sie erfüllen die Killinggleichung

$$\nabla_{(\mu}K_{\nu)} = 0, \quad (\text{A.214})$$

auf einer Mannigfaltigkeit sind in eins-zu-eins Korrespondenz mit kontinuierlichen Symmetrien der Metrik auf der Mannigfaltigkeit. Jeder Killingvektor impliziert die Existenz von Erhaltungsgrößen im Zusammenhang mit geodätischer Bewegung, die Geometrie ist unverändert entlang eines Killing Vektorfeldes. Zeitartige Killingvektoren stehen im Zusammenhang mit Energieerhaltung, raumartige mit Impulserhaltung (Noether'sches Theorem).

Ein maximalsymmetrischer Raum hat  $n(n+1)/2$  Killingvektoren,  $n$  ist die Anzahl der Dimensionen. Die lokale Geometrie steht mittels Gauß-Bonnet-Theorem im Zusammenhang mit der globalen Topologie. Ein alternativer Zugang zur Einstein'schen Gleichung ist über das "Prinzip der kleinsten Wirkung" mit der Einstein-Hilbert Wirkung

$$S_H = \int \sqrt{-g} R d^n x. \quad (\text{A.215})$$

Variert man diese Wirkung in Bezug auf die Metrik erhält man die Bewegungsgleichung. Stationäre Punkte  $\delta S / \delta \Phi^i = 0$  liefern die Gleichung

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\delta S_H}{\delta g^{\mu\nu}} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 0, \quad (\text{A.216})$$

d. h.  $T_{\mu\nu} = 0$ . Betrachtet man zusätzlich Materie  $S = S_H / (16\pi G) + S_M$  ergibt sich der Energie-Impuls-Tensor zu

$$T_{\mu\nu} = -2 \frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\delta S_M}{\delta g^{\mu\nu}}, \quad (\text{A.217})$$

dies kann gleichzeitig als Definition betrachtet werden, und somit ebenfalls die Einstein'sche Gleichung

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}. \quad (\text{A.218})$$

Die Energie-Impuls Erhaltung ist eine Konsequenz der Symmetrie des Lagrangian unter Raum-Zeit Translation. Noethers Theorem (Amalie "Emmy" Noether, 1882 – 1935): *Jede Symmetrie des Lagrangian impliziert eine Erhaltungsgröße.*

**Integrationsmethoden** Stochastisches Sampling (Monte Carlo) liefert Informationen über statische Prozesse und kann zeitabhängige Eigenschaften nicht ohne Weiteres einbinden. Innerhalb der gegebenen Rechenressourcen und im Hinblick auf das Langzeitverhalten der (Bewegungs-)Gleichungen ist die (i) Gesamtgeschwindigkeit entscheidend, zudem ist es wünschenswert, daß der Algorithmus (ii) exakt für große Zeitsprünge arbeitet. Ein weiteres Kriterium für eine gute Integrationsmethode ist die (iii) Übereinstimmung mit Erhaltungsgrößen, relevant sind (iv) die Erhaltung von Energie und Phasenraumvolumen sowie (v) das Verhalten bei Zeitumkehr. Diese Eigenschaften stehen ebenfalls in enger Beziehung zur Stabilität des Algorithmus und zu seiner Genauigkeit bei größeren Zeitschritten. Generell läßt sich sagen, daß ein Integrationsalgorithmus folgende Eigenschaften erfüllen soll: (i) Genauigkeit bei größeren Zeitschritten, (ii) Zeitumkehrbarkeit, (iii) Erhaltung der Energie und (iv) Erhaltung des Phasenraumvolumens, d. h. symplektisches Verhalten.

Standard-Integrationsalgorithmen wie (i) beschränkte Taylorexansion, (ii) Verlet Algorithmen (Lösung der Newton'schen Bewegungsgleichungen, siehe auch Kap. A.1.9) mit (ii<sub>1</sub>) Orts Verlet Algorithmus, (ii<sub>2</sub>) Geschwindigkeits Verlet Algorithmus und (iii) Prädiktor-Korrektor Algorithmen sind

- weder zeitumkehrbar noch symplektisch,
- haben große Langzeitdriften in der Energie, außer bei sehr kleinen Zeitschritten.

Algorithmen basierend auf der Zerlegung von Exponentialoperatoren (Suzuki Trotter Zerlegung) sind

- zeitreversibel,
- symplektisch,
- haben begrenzte Fluktuationen in der Energie,

Invariante	Charakteristische Bewegung Periodizität $\Leftrightarrow$ Gültigkeitsdomäne
Magnetisches Moment $\mu_B = W_{\perp}/B$	Larmor orbit $\tau_L = 2\pi/ \Omega  \Leftrightarrow \tau_L \ll t_F$
Longitudinale Invariante $J = \oint v_{\parallel} ds$	Bewegung zwischen magnetischen Spiegelpunkten $\tau_{\parallel}, \langle v_{\parallel}^2 \rangle \tau_{\parallel} \simeq \text{konst.} \Leftrightarrow \tau_L \ll \tau_{\parallel} \ll t_F, \mu_B \text{ konstant}$
Invarianter Fluß $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$	Azimutale Präzession; Driftgeschwindigkeit $v_p$ $\tau_p, \langle v_p^2 \rangle \tau_p \simeq \text{konst.} \Leftrightarrow \tau_L \ll \tau_{\parallel} \ll \tau_p \ll t_F, \mu_B \text{ und } J \text{ konstant}$

**Tabelle A.5:** Adiabatische Invarianten der Einzelteilchentheorie mit ihren charakteristischen Bewegungen, Periodizitäten und Gültigkeitsdomänen.

- in einigen Fällen kann die Energie exakt erhalten bleiben, zumindest innerhalb der Rechengenauigkeit des Computers,
- genauer bei großen Zeitschritten und damit die Möglichkeit der Integration für längere Zeitperioden,
- haben ein breites Anwendungsspektrum.

## A.2 Magnetosphäre und Plasma

### A.2.1 Plasmabeschreibungen: Einzelteilchen, MHD, Kinetik

Die Eigenschaften magnetisierter Plasmen hängen von verschiedensten Faktoren ab, z. B. von (i) der Homogenität und (ii) Stärke des magnetischen Feldes, (iii) Dichte, (iv) Temperatur, (v) Ionisationszustand, (vi) chemischer Zusammensetzung und (vii) weiterer Parameter. Zur Klassifikation dienen die mittlere freie Weglänge  $\lambda$ , der Larmorradius der Elektronen  $\rho_e$  und die charakteristische Länge  $l_c$  der betrachteten Region. Es gilt für Plasmen hoher Dichte  $\lambda \ll \rho_e$ , für Plasmen mittlerer Dichte  $\rho_e \ll \lambda \ll l_c$  und für Plasmen kleiner Dichte  $l_c \ll \lambda$ . In einem Plasma niedriger Dichte ist das elektrische Feld parallel zum magnetischen Feld nur dann null, wenn das magnetische Feld homogen ist, d. h.  $dB/ds = 0$ . Die Grenze zwischen einem Plasma hoher und einem niedriger Dichte ist gegeben durch  $\omega\tau = 1$ . Aufgrund von  $\omega = |e|B/(m_e c)$  hängt diese Grenze vom magnetischen Feld ab. Die kritische Stoßfrequenz ist  $1/\tau = \omega$ . Die Unterscheidung zwischen einem Plasma mittlerer und kleiner Dichte hängt von der mittleren freien Weglänge  $\lambda$  ab. Der mittlere freie Weg eines Elektrons in einem voll ionisierten Plasma kann geschrieben werden als  $\lambda = v_e \tau$ , dabei ist  $\tau$  die Zeit zwischen zwei Ablenkungen. Verwendet man für  $v_e$  die mittlere thermische Geschwindigkeit  $(3kT_e/m_e)^{1/2}$ , so erhält man für ein Elektron-Proton Plasma  $\lambda_e = 1.3 \times 10^5 / \ln \lambda T_e^2/n_e$ . Der Wert des Coulomb-Logarithmus  $\ln \lambda$  variiert nur wenig mit Temperatur und Dichte. Für ein Abschätzung kann man  $\lambda \approx 10^4 T_e^2/n_e$  setzen. Außer wenn  $\omega_e \tau_e \ll 1$  gilt, dann sind das elektrische Feld  $\vec{E}$  und die Stromdichte  $\vec{i}$ , welche vom Feld erzeugt wird, im allgemeinen nicht parallel. Somit verhalten sich Plasmen hoher Dichte elektrisch isotrop, Plasmen mittlerer Dichte im Gegensatz dazu stark anisotrop. Der Hall Strom  $\vec{i}_H$  ist gegeben durch  $\vec{i}_H = (\sigma_H^e - \sigma_H^i) \vec{B}/B \times \vec{E}_{\perp}$  und erzeugt durch die Driftbewegung senkrecht zu  $\vec{B}$ , für Elektronen und Ionen. Die Größe  $\sigma_{\perp} = \sigma_{\perp}^e + \sigma_{\perp}^i$  bezeichnet man als Querleitfähigkeit oder "Pedersen Leitfähigkeit", und  $\sigma_H = \sigma_H^e - \sigma_H^i$  wird "Hall Leitfähigkeit" genannt. In Plasmen hoher Dichte hat man  $\omega_e \tau_e \ll 1$  und die Leitfähigkeit ist isotrop. Wenn z. B. das Plasma vollständig ionisiert ist, der Reibungsterm  $\beta(\vec{v}_e - \vec{v}_n)$  verschwindet und zusätzlich die Drücke  $p_e$  und  $p_i$  vernachlässigt werden, dann wird das allgemeine Ohm'sche Gesetz reduziert auf die Form  $\vec{i} = \sigma(\vec{E} + (\vec{v}/c) \times \vec{B})$ . Das ist die vereinfachte Gleichung gültig für ein ideales Magnetofluid. Die Unterbindung des Hall Stroms, das kann erreicht werden durch einfügen elektrisch isolierender Ebenen parallel zu  $\vec{B}$  und  $\vec{E}$ , ersetzt die Querleitfähigkeit durch die gewöhnliche Leitfähigkeit. Zur gleichen Zeit wird ein elektrisches Polarisationsfeld erzeugt. Die Einzelteilchentheorie beschreibt Gyration, Oszillationen und Driften in Plasmen. Es lassen sich drei adiabatische Invariante  $-\mu_B$ ,  $J$  und  $\Phi$  ableiten, siehe Tabelle A.5.

Plasma	Parameter in logarithmischer Angabe: $\log(x) \leftrightarrow x^{\log}$								
	$n_e^{\log}$ (1/m <sup>3</sup> )	$T^{\log}$ (K)	$B^{\log}$ (T)	$\lambda_D^{\log}$ (m)	$N_D^{\log}$ (m <sup>3</sup> )	$\omega_p^{\log}$ (1/s)	$\nu_{ee}^{\log}$ (1/s)	$\omega_c^{\log}$ (1/s)	$r_L^{\log}$ (m)
Gasentladung	16	4		-4	4	10	5		
Tokamak	20	8	1	-4	8	12	4	12	-5
Ionosphäre	12	3	-5	-3	5	8	3	6	-1
Magnetosphäre	7	7	-8	2	10	5	-8	3	4
Kern der Sonne	32	7		-11	0	18	16		
Sonnenwind (1 AU)	6	5	-9	1	11	5	-6	2	4
Interstellar	5	4	-10	1	10	4	-5	1	4
Intergalaktisch	0	6		5	15	2	-13		

**Tabelle A.6:** Charakteristische Plasmagrößen: Dichte, Temperatur, Magnetfeld, Debye-Länge, Protonenanzahl, Plasmafrequenz, Stoßfrequenz, Zyklotronfrequenz, Larmorradius. Grenzbereiche sind gegeben durch (i) Ionisation vs. Rekombination, (ii) Degeneration ( $k_B T = \epsilon_F$ , mit  $\epsilon_F$  der Fermienergie), (iii) Paarerzeugung, (iv) relativistische Plasmen.

Parameter	Relation	Zahlenwert-Darstellung
Elektronen Plasmafrequenz	$(n_e e^2 / m_e \epsilon_0)^{1/2}$	$56.4 \times n_e^{1/2}$ rad/s
Ionen Plasmafrequenz	$(n_i (Ze)^2 / m_i \epsilon_0)^{1/2}$	$1.32 \times Z(n_i/A)^{1/2}$ rad/s
Elektronen Zyklotronfrequenz	$eB/m_e$	$1.76 \times B \times 10^{11}$ rad/s
Ionen Zyklotronfrequenz	$ZeB/m_i$	$9.58 \times (ZB/A)10^7$ rad/s
Debyelänge	$(\epsilon_0 k_B T_e / n_e e^2)^{1/2}$	$69.1 \times (T_e/n_e)^{1/2}$ m
Elektronen Larmorradius	$m_e v_{\perp} / eB$	$5.68 \times 10^{-12} v_{\perp} / B$ m
Ionen Larmorradius	$m_i v_{\perp} / ZeB$	$1.04 \times 10^{-8} v_{\perp} (A/ZB)$ m
Elektronen thermische Geschwindigkeit	$(k_B T_e / m_e)^{1/2}$	$3.89 \times 10^3 T_e^{1/2}$ m/s
Ionen thermische Geschwindigkeit	$(k_B T_i / m_i)^{1/2}$	$90.9 \times T_i / A^{1/2}$ m/s

**Tabelle A.7:** Plasma Parameter und Zahlenwert-Darstellungen, siehe ebenfalls Tab. C.10.

Dabei ist  $\tau_{\parallel}$  die Laufzeit für Oszillation,  $t_F$  die Zeitskala für Variationen des magnetischen Feldes,  $\Omega$  die Larmor Frequenz (Zyklotron- oder auch Gyro Frequenz),  $v_{\perp}$  und  $v_{\parallel}$  die Komponenten der Geschwindigkeit senkrecht und parallel zu  $\vec{B}$ ,  $\tau_L$  die Larmor Periode,  $\tau_p$  die Dauer der Präzession des Führungszentrums (guiding center).

Die MHD ist eine Fluidtheorie und die Kinetik eine statistische Theorie für ein geladenes Teilchengas. Die MHD wird zur Interpretation von physikalischen Phänomenen auf "großen" Skalen eingesetzt, dann wenn die Teilchennatur der Materie und Strahlungseigenschaften sekundär sind im Verhalten zu Gruppeneigenschaften, wenn also die Statistik der Gesamteilchen eine Rolle spielt und die inhärente Teilchennatur nicht in Erscheinung tritt. Die Tabelle A.6 zeigt die Grenz- und Parameter-Bereiche von Plasmen wie sie in der Natur und im Labor vorkommen. In den Relationen der Tabelle A.7 sind Dichten  $n_{i,e}$  ausgedrückt in m<sup>-3</sup>,  $B$  in Tesla,  $T_e$  und  $T_i$  in K und  $v_{\perp}$  in m/s ist die Geschwindigkeitskomponente des Teilchens senkrecht zu  $\vec{B}$ . Die Gleichungen für ein stoßfreies Plasma setzen sich zusammen aus (i) den Bewegungsgleichungen

$$D\rho/Dt = 0, \quad \rho(D\vec{u}_{\perp}/Dt)_{\perp} = (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}/\mu_0 - \nabla_{\perp} P, \quad (\text{A.219})$$

$$DP/Dt = 0, \quad \partial\vec{B}/\partial t = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}), \quad (\text{A.220})$$

(ii) Bestimmungsgleichungen

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (\text{A.221})$$

(iii) den Definitionen

$$\vec{E} = -\vec{u} \times \vec{B}, \quad \vec{j} = (\nabla \times \vec{B})/\mu_0, \quad q = -\epsilon_0 \nabla \cdot (\vec{u} \times \vec{B}), \quad (\text{A.222})$$

(iv) mit den Näherungen Stoßfreiheit  $\tau_H \ll \tau_i$ ,  $L_H \ll \lambda_c$ , nichtrelativistische Betrachtung  $\omega/k \sim L_H/\tau_H \sim u \ll c$ , Quasineutralität  $\omega|\Omega_e|/\omega_p^2 \ll 1$  und kleiner Larmorradius  $r_{L_i}/L_H \ll \beta^{1/2}$ .

### Diskontinuitäten im interplanetaren Raum

Diskontinuitäten sind (:=) diskontinuierliche, räumliche Änderungen in Parametern und Charakteristiken von Plasmen und magnetischen Feldern. Durch Unterteilung der Richtungs-Diskontinuitäten (directional discontinuities, DDs) in 4 Klassen ergeben sich (i) Schocks (Massenfluß  $\rho v_n \neq 0$ , Magnetfeld  $[\vec{H}_t] \neq 0$ ,  $H_n \neq 0$ ,  $[H_t] \neq 0$ ), (ii) rotatorische Diskontinuitäten (rotational discontinuities, RDs,  $\rho v_n \neq 0$ ,  $[\vec{H}_t] = 0$ ,  $H_n \neq 0$ ), (iii) tangentiale Diskontinuitäten (tangential discontinuities, TDs,  $\rho v_n = 0$ ,  $[\vec{H}_t] \neq 0$ ,  $H_n = 0$ ) und (iv) Kontakt-Diskontinuitäten (contact discontinuities, CDs,  $\rho v_n = 0$ ,  $[\vec{H}_t] \neq 0$ ,  $H_n \neq 0$ ).

Die MHD Gleichungen erlauben 3 lineare, anisotrope (d. h. die Geschwindigkeit der Welle hängt ab vom Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung und Magnetfeld) Wellenmoden: (i) fast-, (ii) intermediate- (der Alfvén-) und (iii) slow-Mode. Diese Wellenmoden können sich durch Aufsteilung im stoßfreien Plasma zu Schocks entwickeln: (i) fast- (FS), intermediate- (IS) und slow-Schock (SS) mit der gemeinsamen Eigenschaft der Koplanarität, d. h. (:=) das Magnetfeld in Flußrichtung (downstream) liegt in der Ebene gegeben durch das Feld vor dem Schock (upstream) und der Schocknormalen. Ist die Ausbreitung der Schocks {mit der / gegen die} Richtung des Verursachers (Drivers) handelt es sich um {vorwärtige / rückwärtige} Schocks ({forward / reverse} shocks).

Planetare Bugstoßwellen sind schnelle, rückwärtige Schocks (fast reverse shocks, FRSs). Ist der relative Winkel  $\Theta_{Bn}$  zwischen Schocknormale und Magnetfeld  $B_o$  (nahezu) parallel spricht man von (i) quasi-parallelen Schocks, charakteristisch sind große Fluktuationen in der Amplitude, Aufheizung des Plasmas und Teilchenströme entgegen der Sonnenwindrichtung (upstream) verbunden mit der Erzeugung von Plasmawellen durch Instabilitäten im Vorschock-Gebiet. Ist (ii)  $\Theta_{Bn}$  nahe  $90^\circ$  spricht man von senkrechten Schocks (perpendicular shocks), sie sind markant ausgeprägt und leicht erkennbar. Zur Bestimmung ob ein Schocks vorliegt muß bei der Diskontinuität die Schocknormale berechnet und eine Rankine-Hugoniot Analyse durchgeführt werden.

Die Erdmagnetopause ist eine {RD, TD} wenn {eine, keine} magnetische Rekonnektion vorliegt. Bei Wechselwirkung von TDs mit der terrestrischen Bugstoßwelle können Bereiche mit stark erhitztem Sonnenwind auftreten, sogenannte (:=) hot flow anomalies (HFAs), zugleich Strukturen mit geringer Dichte in konvektiver Bewegung durch den Sonnenwind.

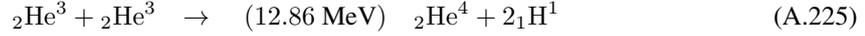
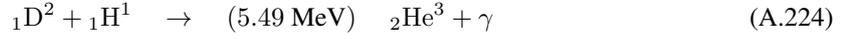
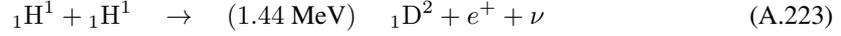
Schnelle vorwärtige Schocks (fast forward shocks, FFSs) energetisieren in der Magnetfeldkonfiguration gefangene Teilchen durch Kompression, verursachen tagseitige Polarlichter, erzeugen neue Strahlungsgürtel und lösen magnetische Teilstürme auf der Nachtseite der Erde aus. FRSs führen zur magnetosphärischen Expansion und Einstellung geomagnetischer Aktivität. HFAs führen zu einer nach außen gerichteten Expansion der lokalen Magnetopause und Verstärkung der tagseitigen Polarlichter. Einige DD verursachen plötzliche Südwärts-Drehung des IMF und damit magnetische Rekonnektion und Energieeintrag in die Magnetosphäre, Teilstürme (Abb. A.17, künstlerische Darstellung eines Nordlichtes) können eine Folge davon sein. DDs die eine Nordwärts-Drehung des IMF zur Folge haben können ebenfalls Teilstürme auslösen.

## A.2.2 Sonne

### Reaktionskette in Sternen

Aus historischer Sicht ist die Physik der Sonne (ein G2-Stern mit einem Alter von immerhin  $\sim 4.567 \times 10^9$  Jahren), oder umfangreicher betrachtet – die kosmische Elektrodynamik – eine der Wurzeln aus denen die Plasmaphysik entstanden ist. Speziell die MHD wurde durch die Arbeiten von Hannes Olof Gösta Alfvén (1908 – 1995) etabliert. Die Bezeichnung Plasma geht zurück auf Irving Langmuir (1881 – 1957) in das Jahr 1928 zur Beschreibung von ionisierten Zuständen in Gasentladungen. Thermonukleare Fusion wurde bereits sehr früh als die Quelle der Energieerzeugung in Sternen erkannt, Pioniere waren Hans Albrecht Bethe (1906 – 2005) und unabhängig davon Carl Friedrich von Weizsäcker (1912 – 2007), Details gehen zurück auf Arbeiten in das Jahr 1938 – betrifft es Untersuchungen der Kernspaltung im gleichen Zeitraum sind Arbeiten von Lise Meitner (1878 – 1968) und Otto Frisch (1904 – 1979) zu erwähnen. Die Reak-

tionskette vorgeschlagen von Bethe, bekannt als Bethe-Weizsäcker-Zyklus oder auch CNO-Zyklus, hat die herausragende Eigenschaft, daß nach der thermonuklearen Reaktion mit Stickstoff und Sauerstoff der Kohlenstoff als Endprodukt regeneriert wird und der Zyklus von neuem beginnen kann. Für Sterne mit niedrigerer Kerntemperatur ist der Proton-Proton Zyklus



mit  $e^+$ ,  $\nu$  und  $\gamma$  als Positron, Neutrino und Gammaquant wichtiger und in der Tat die dominierende Reaktionskette in Sternen der niedrigeren Hauptreihe [Salpeter, 1952] (Edwin Ernest Salpeter, 1924 – 2008, [Salpeter, 2002]) im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Die Zahlen in den Klammern geben die Energie pro Reaktion an. In der ersten Reaktion A.223 ist die Energie des Photons, nachfolgend der Positron-Elektron Annihilation (1.18 MeV) inkludiert. Die Differenz von 0.26 MeV wird mit den Neutrinos aus dem Stern entfernt. Die dritte Reaktion A.225 im Zyklus ist nur möglich bei Temperaturen über  $\sim 10^7$  K, liefert aber etwa die Hälfte der freigesetzten Energie von 26.2 MeV. Der Proton-Proton Zyklus ist dominierend in der Sonne, der Übergang zum Kohlenstoffzyklus erfolgt bei Sternen mit etwas größerer Masse. Die erzeugte Energie stellt nicht nur die Stabilität gegen den gravitativen Kollaps sicher, sie ist ebenfalls die Quelle der Luminosität und allen weiteren Aspekten der Physik der äußeren Bereiche eines Sternes.

Dopplergeschwindigkeits-Messungen von Global Oscillation Network Group (GONG) Instrumenten bestimmen den nahezu stetigen Oberflächenfluß in der Photosphäre und liefern mittels sphärischer harmonischer Expansion (i) die "solid-body" Rotation der Sonne mit 2043 m/s, (ii) die differentielle Rotation beträgt  $v_\Phi(\theta) = (1837 - 195 \cos^2 \theta - 342 \cos^4 \theta) \sin \theta$  m/s und (iii) die meridionale Zirkulation ergibt sich zu  $v_\theta(\theta) = -54 \cos \theta \sin \theta$  m/s mit statistischen Unsicherheiten von  $\sim 1$  m/s für jede Komponente. Diese  $\sim 2$  km/s am Äquator entsprechen einer Abplattung (Äquator-Pol Radius Differenz) der nichtmagnetischen Sonne von  $8.01 \pm 0.14$  Milli-Bogensekunden (Winkeldurchmesser der Sonne bei 1 AU beträgt nominell 1919.26 Bogensekunden). Die relevanten Gleichungen zur Beschreibung von Sternen wurden von Tolman, Oppenheimer und Volkov (TOV) erstmals aufgestellt [Oppenheimer and Volkoff, 1939],

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{(\rho + p/c^2)G(m(r) + 4\pi r^3 p/c^2)}{r(r - 2Gm(r)/c^2)}, \quad (\text{A.226})$$

sie ist die Gleichung für hydrostatisches Gleichgewicht von sphärischen Objekten in der ART. Die Massenverteilung  $m(r)$  steht in Bezug zur Dichte  $\rho(r)$  über  $m(r) = 4\pi \int_0^r \rho(r)r^2 dr$ , damit ist der Zusammenhang zwischen Druck und Dichte hergestellt. Die Zustandsgleichung vervollständigt das geschlossene Gleichungssystem, sie setzt den Druck in Beziehung zur Dichte und spezifischen Entropie,  $p = p(\rho, S)$ . Meist kann der Entropieanteil vernachlässigt werden, die Zustandsgleichung wird zu  $p = p(\rho)$ . Für astrophysikalische Systeme verwendet man öfters eine polytropische Zustandsgleichung  $p = K\rho^\gamma$  mit zwei Konstanten  $K$  und  $\gamma$ .

### Zustandsgrößen

Zustandsgrößen charakterisieren einen Stern "als Ganzes", die wichtigsten sind (i) Masse, (ii) Radius, (iii) Dichte, (iv) Schwerebeschleunigung, (v) Leuchtkraft, (vi) Farbe, (vii) Spektraltyp, (viii) Effektivtemperatur, (ix) Rotation, (x) Magnetfeld, (xi) chemische Zusammensetzung und (xii) Helligkeit, wobei letztere genau genommen keine exakte Zustandsgröße ist da sie von der Entfernung abhängt. Sonnenflecken entstehen, wenn magnetische Flußröhren durch magnetischen Auftrieb durch die Photosphäre treten. Diese magnetischen Flußröhren werden durch die differentielle Rotation langgezogen und unter der Oberfläche aufgewickelt. Das {toroidale, poloidale} Magnetfeld ist das {zonal ost-west, nord-süd} gerichtete Feld. Die Sonnenatmosphäre lässt sich grob unterteilen in

- Photosphäre ("sichtbare Scheibe"); Schicht aus der das Licht stammt mit einer Dicke  $\sim 200$  km,
- Chromosphäre ("Farbhülle"); nur bei Finsternissen als farbiger Saum sichtbar, Dicke  $\sim 1700$  km,
- Korona, der "Strahlenkranz", die äußerste nur bei Finsternissen sichtbare Atmosphäre mit einer Dicke von einigen Millionen km.

**Photosphäre** Die Oberfläche der ungestörten Photosphäre zeigt eine waben- oder zellenförmige Struktur, ihre Elemente sind die Granulen. Granulen sind aus der Wasserstoffkonvektionszone aufsteigende heiße Elemente. Der mittlere Durchmesser beträgt  $\sim 1400$  km, die mittlere Lebensdauer 5 – 10 min und die Aufstiegs geschwindigkeit einige km/s. Als Folge der Granulation treten Inhomogenitäten auf und an der Rändern der Granulen (dunkles Waben-Netzwerk) sinkt die kühlere Materie wieder ab. Bei der Supergranulation betrachtet man großräumige Strukturen mit einem Durchmesser von  $40''$  ( $\sim 30000$  km) auf, die Begrenzungen sind Gebiete erhöhter magnetischer Feldstärke. Zusätzlich wirkt der Stern als kugelförmiger 3D Resonanzkörper, es bilden sich Oszillationen und Systeme stehender Wellen mit charakteristischen Eigenfrequenzen (für Methoden der Helioseismologie siehe die Satellitenmission Seite 191). Diese Eigenschwingungen – mit einer Periode von etwa 5 min, entdeckt von Robert Benjamin Leighton (1919 – 1997) – sind Reflexionen von Schallwellen unterhalb der Photosphäre mit einem ganzen Spektrum nicht-radialer Obertöne.

**Chromosphäre** Die Dichte der Chromosphäre ist sehr gering, nur  $10^{-3} - 10^{-4}$  der Photosphäre. Am Sonnenrand beobachtet man sogenannte Spikulen ("brennende Prärie"), eine zerfranste, jetartige Plasma-Struktur mit einer Lebensdauer von einigen Minuten die in die Korona hineinragt. Für den Energietransport durch die Chromosphäre und in weiterer Folge die Aufheizung der Korona kommen (i) direkter Plasmaeintrag, (ii) Dissipation von kleinräumigen Stromstrukturen und (iii) Wellen in Betracht, aktuelle Messungen favorisieren dissipative Alfvén-Wellen ( $\sim 20$  km/s, Perioden von 100 – 500 s) als Ursache für die ruhige Sonnenkorona und den schnellen Sonnenwind. Typische Oszillationen in der Chromosphäre (über Sonnenflecken) haben eine Periode von  $\sim 3$  min.

**Korona** Die Helligkeit ist  $\sim 10^{-6}$  der Photosphäre, das entspricht ungefähr der Vollmondhelligkeit und sie ist somit bei totaler Sonnenfinsternis hervorragend zu beobachten. Die Korona verläuft langsam nach außen, es ist keine Grenze angebar und vermutlich ein kontinuierlicher Übergang zum Zodiaklicht. Ihre Form ist zudem variabel, bei einem Fleckenminimum ist die Ausdehnung in der Äquatorzone und mit Polarstrahlen. Im Fleckenmaximum, siehe Abbildung A.12, ist die Struktur symmetrisch nach allen Seiten. In der ruhigen Korona unterscheidet man zwei morphologische Strukturen: (i) Großräumige Strukturen (Large-Scale-Structures, LSS), die magnetischen Feldlinien sind über große Entfernungen geschlossen, aber meist nur von geringer Höhe (einige Zehntel des Sonnenradius; Strukturen sind Strahlen, Bögen, Schleifen und gelegentlich Knoten) und (ii) koronale Löcher (coronal holes, CH). Bei ihnen sind die magnetischen Feldlinien über große Flächen offen, auf Röntgenbildern wirken sie wie Löcher. Im Unterschied dazu haben "coronal helmet streamer" eine Struktur mit geschlossenen magnetischen Feldlinien. Kometen die nahe an die Sonne kommen können (ansonsten in-situ instrumentell unzugängliche) Magnetfeld-Strukturen entlang ihrer Trajektorie sichtbar machen. Die Korona ist eine nahezu isotherme Kugel im thermischen Gleichgewicht. Trotz der hohen Temperatur tritt wegen der geringen Dichte die Korona nicht in Erscheinung. Gerade wegen der geringen Dichte stellt sich eine hohe Temperatur ein, weil sonst die Abstrahlung zu gering wäre, um die zugeführte Energie loszuwerden. Aus instrumenteller Sicht (EUV Kamera) beträgt die beste räumliche Auflösung von dynamischen Strukturen in der Korona momentan unter  $\sim 150$  km.

### Aktivität der Sonne

Solare Aktivität erschließt sich vielschichtig aus (i) der Anzahl der Sonnenflecken, (ii) Fläche der Sonnenflecken (Seite 160 ff.), (iii) 10.7 cm Radiostrahlung, (iv) Strahlungsdichte, (v) dem Magnetfeld, (vi) Flares und CMEs, (vii) geomagnetischer Aktivität, (viii) kosmischer Strahlung und (ix) Radioisotopen in Baumringen und Eiskernen, siehe [Hathaway, 2010]. Die Quelle der Sonnenaktivität ist das magnetische Feld, ersichtlich aus Magnetogrammen, z. B. vom Michelson Doppler Imager (MDI) auf SOHO. Aktive Regionen entsprechen Sonnenflecken "sun spots", bipolaren Regionen, d. h. "magnetic loops" und "salty features" mit Zufallsbewegung dieser Strukturen. Mit Hilfe von TiO und dem Zeeman-Effekt (Seite 109 ff.) kann das magnetische Feld  $B$  in unterschiedlichen Höhen gemessen werden. Neue diagnostische Möglichkeiten ergeben sich durch den molekularen Zeeman-Effekt, die Sonne ist kühl genug für zweiatomige Moleküle, z. B. OH, sichtbar im IR-Spektrum. Im Unterschied zum Atom haben Moleküle zusätzliche Drehmomente, es gibt den Paschen-Back-Effekt.

- Sonnenflecken: Fleckenrelativzahl, Wolf'sche Zahl, Zürich- oder Internationale Sonnenfleckenanzahl  $R = k(10g + f)$  mit  $g$  Zahl der Gruppen, einzelfleck zählt als Gruppe,  $f$  Anzahl der einzelnen Flecken,  $k$  individuelle Konstante zum Anschluß an das Züricher System; {monatliche / geglättete}  $\max(R_I) \sim \{250/200\}$ , kontinuierliche Aufzeichnung seit 1749.
- Aufhellungen, Fackeln: Größere Gebiete, die im Mittel einige Prozent heller sind als die ungestörte Photosphäre und alle Flecken sind in größere Gebiete von Aufhellungen eingebettet, siehe Seite 162.
- Protuberanzen, Filamente: Außerhalb der Photosphäre in die Korona eingebettete Materie-Wolken (kondensierte Koronamaterie).
- Eruptionen (Flares): Quasi-Blitze, helles Aufleuchten und Auftreten immer in Aktivitätsgebieten. Klassifikation {B,C,M,X} :=  $\log(I_{\max}) = \{-6, -6\dots-5, -5\dots-4, >-4\}$  W/m<sup>2</sup>, die Maximalintensität  $I_{\max}$  wird im Röntgenband 0.1 – 0.8 nm gemessen (siehe ebenfalls [Eichelberger et al., 2011]).
- Veränderungen in der  $\lambda = 10.7$  cm Radiostrahlung mit sehr unterschiedlichen Phänomenen.

Flecken, Protuberanzen, Fackeln stehen nicht in einer Ursache-Wirkung Beziehung zueinander, sondern sind verschiedene Folgen einer tiefer liegenden Störung. Neben der ( $i_1$ ) Internationalen Sonnenfleckenanzahl (Solar Influences Data Analysis Center, SIDC) gibt es weitere ( $i_2$ ) von Boulder, ( $i_3$ ) die American und ( $i_4$ ) die Gruppen Sonnenfleckenanzahl  $R_G = 12.08/N \sum_{i=1}^N k_i G_i$  mit  $N$  der Anzahl der Beobachter,  $k_i$  Korrekturfaktor und  $G_i$  Anzahl der Sonnenflecken-Gruppen rückreichend bis zu den ersten Teleskopbeobachtungen (siehe Kap. A) im Jahre 1610 (NOAA National Geophysical Data Center, NGDC). Sonnenflecken-Flächen sind ein physikalisches Maß verglichen mit Sonnenflecken-Anzahl, sie sind gegeben in der Einheit Millionstel der solaren Hemisphäre (millionths of solar hemisphere,  $\mu\text{Hem}$ ), beide Größen korrelieren sehr gut. Der 10.7 cm (2.8 GHz) über die Sonnenscheibe integrierte Radiofluß-Aktivitätswert kann unter allen Wetterbedingungen erhalten werden, hat einen zeitlichen Versatz zur Sonnenfleckenanzahl von  $\sim 1$  Monat und steht mit dieser über  $F_{10.7} = 67 + 0.97R_I + 17.6(e^{-0.035R_I} - 1) = 67 + 0.572R_I + (0.0575R_I)^2 - (0.0209R_I)^3$  sfu in Beziehung, 1 sfu =  $10^4$  Jy =  $10^{-22}$  W/m<sup>2</sup>/Hz, die Umkehrung ergibt sich zu  $R_I = 1.61(F_{10.7} - 67) - [0.0733(F_{10.7} - 67)]^2 + [0.024(F_{10.7} - 67)]^3$ . Weitere Kenngrößen wie Strahlungsdichte werden auf Seite 162, CMEs und Flares in Kap. A.2.3, Magnetfeld auf Seite 160, geomagnetische Aktivität mit Indizes in Kap. A.2.5, Solar-terrestrische Beziehung und Kosmische Strahlung in Kap. A.2.5 und Radioisotope mit Klima auf Seite 154 behandelt.

Individuelle Sonnenzyklen Charakteristiken sind (i) Minima und Maxima, (ii) Periode, (iii) Amplitude, (iv) Form des Zyklus, (v) Anstiegszeit  $T_A$  in Monaten vs. Amplitude  $A$  in Sonnenfleckenanzahl (Waldmeier Effekt),  $t_A \sim 35 + 1800/A$ , (vi) Periode vs. Amplitude, (vii) aktive solare Breiten (unabhängig von der Amplitude starten die Sonnenflecken-Zonen zentriert bei  $\sim 25^\circ$ ). Die aktiven Breitenbänder sind schmal beim Minimum, verbreitern sich Richtung Maximum und verengen sich erneut in der Abschwungphase des Zyklus. Weiters (vii) aktive Hemisphären mit nord-süd Asymmetrien in Aktivitäts-Indizes und (viii) aktive Längen (die aktiven Längen der nördlichen Hemisphäre tendieren zu einem Versatz von  $180^\circ$  in Länge verglichen mit denen der südlichen Hemisphäre).

Die langzeitliche Veränderung manifestiert sich (i) in längeren Minima, (ii) sekularen Trends, (iii) dem Gleißberg Zyklus, (iv) in der Gnevyshev-Ohl Regel (even-odd-effect) und (v) in Variationen von Radioisotopen (Suess Zyklus).

Die kurzzeitlichen Variationen, d. h. kürzer als der 11-jährige Sonnenzyklus, sind primär gegeben durch (i) Rotationseffekte der Sonne ( $\sim 27$  Tage) und (ii) Sonnenzyklus-Effekte, dabei betrifft ( $i_1$ ) die 154 Tage Periodizität und ( $i_2$ ) die quasi zweijährige Variation mit doppelten Spitzen im Maximum. Vorhersagen des Aktivitätszyklus betreffen (i) den aktuellen Zyklus und (ii) zukünftige Amplituden, sie sind basierend auf ( $ii_1$ ) statistischen Methoden, ( $ii_2$ ) geomagnetischen Indizes,  $\max(R) = 7.95 \min(aa) \pm 18$  und ( $ii_3$ ) solaren Dynamotheorien.

### Aktivitätszyklus

Die Sonne, und mit ihr das solare magnetische Feld, ist variabel auf allen zeitlichen und räumlichen Skalen welche mittels Beobachtung zugänglich sind, jeweils verbunden mit unterschiedlichen zugrundeliegenden physikalischen Prozessen. Konvektive Bewegungen von magnetischen Flußröhren ("flux tubes", d. h.

Bündel von magnetischen Feldlinien) wechselwirken auf Zeitskalen im Minutenbereich (Granulation) bis Tagesbereich (Supergranulation). Die Evolution von aktiven Gebieten (Aktivitätszyklus) und der globale Transport von magnetischem Fluß auf der Sonnenoberfläche geschieht innerhalb von Tagen bis zu einigen Jahren, Jahrzehnten, vermutlich Jahrhunderten und darüber hinaus. Die Grafik in [Abbildung A.12](#) zeigt die Korona während der totalen Sonnenfinsternis am 11. August 1999 (ansteigender Ast von Zyklus 23), aufgenommen am Grazer Ruckerlberg. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist der "Canon der Finsternisse" (Wien 1887), ein Monumentalwerk von Theodor von Oppolzer (1841 – 1886), als Zusammenstellung aller Sonnen- und Mondfinsternisse von 1207 v. Chr. bis zum Jahre 2162 mit 8000 Sonnen- und 5200 Mondfinsternissen (sein Nachfolger an der Universität war Samuel Oppenheim, 1857 – 1928). Speziell Sonnenfinsternisse waren und sind von Bedeutung bei der Messung der Lichtablenkung (erstmalig erfolgreich 1919) als Test der ART ([Kap. A.1.9](#)) und bei klimatischen Studien. Großes Aufsehen in der Öffentlichkeit erregte die totale Sonnenfinsternis quer über die USA am 21. August 2017 mit einer Kernschatten-Breite von 115 km zwischen Oregon und Süd-Carolina. Unter den Experimenten sind u. a. Messungen zu Magnetfeldern der Korona (IR Bereich, Polarisation, Temperatur), Bestimmung des Sonnenradius und terrestrische atmosphärische Untersuchungen, z. T. durchgeführt mit Flugzeugen, Ballonen und Satelliten (Messungspunktmessungen, siehe [Kap. A.3.2](#)). Das Magnetfeld der Sonne ist verantwortlich für die



**Abbildung A.12:** Totale Sonnenfinsternis vom 11. August 1999, aufgenommen am Ruckerlberg, Graz.

große Vielfalt an Erscheinungen, zusammengefaßt unter der Bezeichnung "Sonnenaktivität", und fungiert als Energiequelle bei (i) koronalen Massenauswürfen (coronal mass ejections, CMEs) (siehe Seite [168](#)) und (ii) Flares (relevant bei VLF, siehe [Kap. 4.1.4](#)). Sie beeinflussen die unmittelbare terrestrische Umgebung und führen oft zu spektakulären Weltraumwetter Erscheinungen (space weather, Solar-Terrestrische Beziehung), siehe Abschnitt [A.2.5](#). Die wichtigste Zeitskala der solaren magnetischen Aktivität ist der 11-jährige Zyklus, bzw. der 22-jährige magnetische Zyklus, von aktiven Regionen und Sonnenflecken. Mit dem Zyklus zusammenhängend ist eine Modulation der Gesamtstrahlung (Solarkonstante in  $\text{W/m}^2$ ) und starke Veränderungen im UV- und Röntgenbereich, sowie einhergehende Veränderungen der Intensität (negative Korrelation) der kosmischen Strahlung. Für terrestrische UV-B (280 – 320 nm) Abschirmung ist Ozon in der Stratosphäre verantwortlich. Einige Organismen, darunter Zooplankton aber auch Insekten, Fische und Vögel, sind abhängig von UV (UV-A 320 – 400 nm, höhere Eindringtiefe in Gewässern) in ihrer Umwelt. Infolge der begrenzten Länge der verfügbaren Daten ist es unklar ob solare Veränderungen eine Superposition von (quasi-)periodischen Prozessen ist, oder ein chaotisches oder stochastisches Verhalten

vorliegt. Eine der größten Störungen des 11-jährigen Zyklusses war das Auftreten von "grand minima" – die Sonnenaktivität war für mehrere Dekaden stark reduziert. Das beste dokumentierte Beispiel für eine langanhaltende Periode war das Maunder Minimum zwischen 1640 und 1710 mit möglichen klimatischen Auswirkungen – Abbildung A.13 zeigt eine Winterlandschaft des Holländischen Malers Aert van der Neer (1603 – 1677) aus dem Jahre 1660, retrospektiv eine Synergie zwischen Kunst und Wissenschaft – es wurden zu dieser Zeit nur wenige Sonnenflecken beobachtet. Die Solar-Terrestrische Beziehung ist auch dargestellt in Bildern von Hendrik Avercamp (1585 – 1634) und anderen Künstlern, neben den genannten Minima gibt es weitere Zyklen mit unterschiedlicher Ausprägung. Wichtig für Naturstudien in den Alpen und im Hochgebirge ist der Maler Joseph Anton Koch (1768 – 1839). Es könnte angenommen werden, daß der Zyklus im Maunder Minimum auf niedrigem Niveau weiter vorhanden war. Das war mit Sicherheit für eine andere Periode verminderter Aktivität der Fall, nämlich dem Dalton Minimum im frühen 19. Jahrhundert (1790 – 1830). Weitere markante solare Variationen mit den ungefähren Zeiträumen sind (i) Spörer- (14{2/5}0 – 15{7/5}0), (ii) Wolf- (1280 – 1340) und (iii) Oort-Minimum (1010 – 1050) sowie das (iv) Mittelalterliche Maximum (1100 – 1250). Mit der Hilfe der veränderlichen Erzeugungsrate von kosmogenen Isotopen, etwa  $^{14}\text{C}$  (Halbwertszeit  $t_{1/2} = 5730\text{ y}$ ,  $\beta$ -Zerfall) und  $^{10}\text{Be}$  ( $t_{1/2} = 1.51 \times 10^6\text{ y}$ ,  $\beta$ -Strahlung), kann die langzeitliche Veränderung der Sonnenaktivität weit in die Vergangenheit hinein verfolgt werden. Diese Isotope werden durch die kosmische Strahlung als Spallationsprodukte in der oberen Atmosphäre der Erde erzeugt. Von dort gelangen sie zur Oberfläche und werden u. U. konserviert. Die Ablagerungen in Eisborkernen aus Grönland, der Antarktis (eine aktuelle Bohrung bei Allen Hills lieferte einen Kern mit  $\sim 2.7$  Millionen Jahren; der European Project for Ice Coring in Antarctica – EPICA – Kern aus 2004 reicht 740000 Jahre in die Vergangenheit) und Gletschern ganz allgemein können verwendet werden um die Veränderungen der galaktischen kosmischen Strahlung zu bestimmen. Die Strahlung selbst ist antikorreliert mit der Sonnenaktivität. Folglich korrespondiert eine höherer Konzentration der kosmogenen Isotope mit niedrigerer Sonnenaktivität – und umgekehrt. Der Ursprung dieser langzeitlichen Veränderungen ist nur schwer zu erklären. Markante kurzzeitige Variationen gibt es z. B. durch Vulkanismus, etwa (i) der Santorin (Thira) Vulkanausbruch (datiert auf  $\sim 1620 - 1600\text{ v. Chr.}$ ), (ii) drei massive Ausbrüche ( $\sim 426$  und  $44\text{ v. Chr.}$ ,  $536\text{ n. Chr.}$ ) deren Quellregion noch nicht bekannt ist, (iii) der Samalas 1257 in Indonesien, (iv)  $\sim 1452$  der Kuwae auf Vanuatu, (v) 1782 – 1785 die Laki-Eruptionen mit einem Extremwinter 1783/84, (vi) der Ausbruch des Tambora (1815) mit einem nachfolgenden "Jahr ohne Sommer" (Hungerjahre), (vii) die Mount Mazama Eruption (Oregon, USA) vor  $\sim 7000$  Jahren, (viii) die Kikai-Akahoya Eruption (Japan), ebenfalls vor  $\sim 7000$  Jahren, (ix) die Taupo Oruanui-Eruption (Neuseeland) vor  $\sim 25400$  Jahren (Mikro-Fossilien im Gestein ermöglichen die exakte Lokalisierung und Spezifikation der Umgebung), (x) die Toba Eruption auf der Indonesischen Insel Sumatra vor  $\sim 74000$  Jahren oder unlängst (xi) der Novarupta (1912, Katmai-Nationalpark, Alaska, USA), Pinatubo (1991, Insel Luzon, Philippinen), Mount St. Helens (1980, Bundesstaat Washington, USA), Eyjafjallajökull (Island) im Jahr 2010. Zwei markante Ereignisse (Evidenz von Baumringen und Eiskernen) in den Jahren 775 und 994 dürfen kosmischen Ursprungs sein. Eine genaue Schilderung gibt es vom Ausbruch des Vesuvs – die Pompeji-Eruption vom 24. Aug. 79 – unter den Opfern war auch Plinius der Ältere (23/24 – 79). Steinzeitliche Ausgrabungen, speziell im Übergang zwischen Mittel- und Jung-Paläolithikum, ein wesentlicher Zeitraum für das Studium von Neandertalern (oder auch Denisovians) und ersten anatomisch modernen Menschen (der Homo sapiens datiert nachweislich mindestens  $\sim 300000$  Jahre zurück; Fossilien aus Jebel Irhoud, Marokko), können mittels Vulkanablagerungen synchronisiert / datiert werden, z. B. durch die Kampanien-Ignimbrite-Eruption (Phlegräische Felder, Italien) vor  $\sim 40000$  Jahren. Erwähnt sei, daß Alfred Wegener (1880–1930) mit Grönland eng verbunden war. Er unternahm gemeinsam mit Kollegen Anfang der 1930'er Jahre im Inlandeis bei Station Eismitte ( $\sim 3000\text{ m}$  über dem Meeresspiegel) wissenschaftliche Untersuchungen, u. a. mit Ballonen und Drachen im Bereich der Meteorologie (Zeppelinrouten), Magnetismus und Seismik – Sprengungen dienten dabei um die Eisdicke über die Laufzeit mit Reflexion an der Unterseite der Eisschicht zu bestimmen. Heute kennt man subglaziale Vertiefungen, z. B. den Grönland-Canyon mit 750 km Länge, bis zu 800 m Tiefe und 10 km Breite, radio-stratigraphische Untersuchungen zeigen Schichten vom Eem(Riß-Würm)-Interglazial vor  $(126 - 115) \times 10^3$  Jahren, der anschließenden Kaltzeit (Würm) und dem heutigen Holozän. Zudem gibt es (aktuell) mannigfaltige physikalische und biologische Faktoren die zum Verlust des Eises beitragen und diesen beschleunigen, darunter – A) Oberflächenverluste – (i) abgerundete Kristalle (sie absorbieren mehr als frischer Schnee) durch Zyklen gefrieren  $\leftrightarrow$  tauen, (ii) mehr Firn, nicht kompakter Schnee schmilzt schneller, (iii) verfärbter und schmutziger Schnee (Ruß, Aerosole, Staub)

inklusive Algen und Mikroben, sie gedeihen wenn mehr Flüssigkeit vorhanden ist, (iv) Schmelzwasserseen verdunkeln die Oberfläche und die Erosion nimmt zu, z. B. durch Mouline/Gletschermühlen (Gletscherdolen) und subglaziale Abflüsse, (v) Kryokonitlöcher (Hohlformen am Eis aufgrund organischer Materie) verbunden mit entstehenden Schmelzvertiefungen und Rinnen sowie – B) dynamische Verluste – sprich (i) kalbende Gletscher/Eisberge. In primär meteorologischen und seismischen (generell geophysikalischen) Belangen sind ebenfalls zahlreiche Arbeiten von Karl Kreil (1798 – 1862) (erster Direktor der Zentralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus, nunmehr Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG), Victor Conrad (1876 – 1962) (Conrad-Diskontinuität und das neu errichtete Conrad Observatorium), Julius von Hann (1839 – 1921) (Pionier der modernen Meteorologie und Klimatologie, z. B. Arbeiten über die Entstehung des Föhns; Sonnblick-Observatorium seit 1886, Hannwarte am Hochobir – Eröffnung 1891 – verbunden mit dem Rainer-Schutzhaus; Hann-Fenster in der Signalverarbeitung), Heinrich von Ficker (1881 – 1957), Max Margules (1856 – 1920) (u.a. "Über die Energie der Stürme"), Robert Daublebsky von Sterneck (1839 – 1910) (relative Schweremessungen), Wladimir Peter Köppen (1846 – 1940) (Schwiegerater von Alfred Wegener), Hans Benndorf (1870 – 1953) (Luftlektrizität, Erdbeben) und Angelika Székely (1891 – 1979) (Luftionisation, HF-Ausbreitung) zu nennen. In Bezug auf das Klima und die globale hemisphärische Temperatur (z. B. die "kleine Eiszeit", charakterisiert durch ihre Gletschervorstöße; neben der Temperatur auch weitere thermodynamische Größen) und dessen Dynamik spielen vermutlich neben der Sonnenaktivität weitere Faktoren eine wichtige Rolle, wie vorhin bereits erwähnt Vulkanismus (Aerosole/Schwefel muß in die Stratosphäre gebracht werden; sub- $\mu\text{m}$  Schwefelsäure –  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – Tröpfchen), wie aus (i) Korallenbänken, (ii) Baumringanalysen – Dendrochronologie; unterschiedliche Zuwachsraten bei Jahrringreihen (Breite und Dichte), z. B. gegeben in Chronologien von Nadelhölzern (Koniferen), etwa Lärche und Zirbe, siehe [Nicolussi et al., 2009]; die Zirbe kann bis zu 1000 Jahre alt werden, verträgt Temperaturen bis zu  $-50^\circ\text{C}$  und wächst ab einer Höhe von  $\sim 1500$  m, also kurz vor der Baumgrenze/Temperaturmangelgrenze (diese ist als wiederum ein Indikator für Temperatur und Vegetationsdauer), (iii) Sedimenten von Eisbohrkernen, (iv) lichenometrischen Untersuchungen (Durchmesser von Flechten) und (v) anderen natürlichen Erdarchiven hervorgeht. Ein ähnliches Verfahren gibt es bei Vulkanen, die sogenannte Diffusions-Chronometrie, chemische Variationen entlang von Kristallen können Wachstumsbänder – hervorgerufen durch unterschiedliche Verweildauern in Magmakammern – aufweisen. Zur zeitlichen Einordnung dienen ebenfalls die Biostratigraphie (Fossilien) und Warven (Schichten in Seen oder Meere), all diese Methoden der Altersbestimmung geben Einblicke in die ferne Vergangenheit und Fragmente können wie in einem Puzzle zusammengesetzt werden. Aus klimatischer Sicht sind es primär drei Pfade wie die Sonne das Klima beeinflussen kann: Variationen (i) in der Gesamtstrahlung – "total irradiance", (ii) im Ultravioletten – "UV irradiance" und (iii) Modulationen von kosmischer Strahlung – "cosmic ray modulation". Nachgewiesen sind Veränderungen in der nördlichen Hemisphäre während der letzten Eiszeit durch Dansgaard-Oeschger klimatische Oszillationszyklen – 23 Ereignisse in den Greenland Ice Core Project (GRIP), Greenland Ice Sheet Project (GISP2) und North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) Grönland Eiskernen – mit einer Periode von  $\sim 1470$  Jahren in Verbindung mit Heinrich-Events (Unterbrechung der thermohalinen Zirkulation), möglicherweise hervorgerufen durch Superposition von Sonnenzyklen-Perioden (11, 88, 205). Die heute wahrscheinlich bekannteste klimatische Variation ist die El Niño / Southern Oscillation (ENSO), charakterisiert durch großräumige Änderungen in der äquatorialen pazifischen Meerestemperatur – Nino 3/4 sea surface temperature (SST) Index, irreguläres Auftreten im Bereich von 2 – 7 Jahren, phasenverbunden mit dem Jahreszyklus, atypische {kalte, warme} {La Niña, El Niño} Bedingungen – und verbunden damit veränderte hemisphärische Niederschlagsmuster. Historische ENSO Untersuchungen basieren primär auf Baumringanalysen, Untersuchung von Korallen (Sauerstoff-Isotop  $\delta^{18}\text{O}$  Anomalien) und Sedimentkernen von Seen. Betreffend des Atlantiks ist momentan eine Abnahme der thermohalinen Zirkulation (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC; mittlere Stärke  $\sim 17.5$  Mill.  $\text{m}^3$  pro Sekunde; gemessene starke Abnahme am subtropischen Array von 20 Sv auf 15 Sv in nur einer Dekade seit 2004; Sverdrup:  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Golfstrom max. bei  $\sim 150$  Sv, siehe ebenfalls Kap. B.1.4) zu messen, ob die Änderungen der Klimaerwärmung oder der Atlantischen Multidekaden Oszillation (AMC, Atlantic Multidecadal Oscillation, eine natürliche 60 – 70 jährige Oberflächen-Temperaturschwankung im Atlantik) zuzuschreiben sind werden langfristige Messungen zeigen. Bei lebenden Zellen zerfällt die DNA ("deoxyribonucleic acid"; Desoxyribonukleinsäure – DNS) ohne den Reparaturmechanismus durch Enzyme. Die chemische Stabilität ist primär umgebungsabhängig, speziell eine Funktion der Temperatur  $f(T)$ , je

kälter die Umgebung desto geringer die Degeneration der DNA (exponentieller Zusammenhang). Daraus ergibt sich eine Datierungs-Methode, unter günstigen Bedingungen läßt sich DNA von einigen  $10^5$  bis mehrere Millionen Jahre alten Fossilien wiedererlangen. Selbst bei alten (mittelalterlichen) Objekten, z. B. Büchern, ist es bereits möglich DNA (von Bücherwürmern) und weitere biologische Materialien (Proteine) zu extrahieren und damit umfangreichere Analysen zu erstellen.



**Abbildung A.13:** Winterlandschaft mit Golfspielern und Schlittschuhläufern auf einem zugefrorenen Kanal, 1660, Aert van der Neer.

### Aufzeichnung von Sonnenzyklen, Klima

Kontinuierliche direkte Aufzeichnungen der Variabilität der Sonne, z. B. Sonnenflecken, sind (i) im abendländischen Raum limitiert auf den Zeitraum seit Erfindung des Teleskops, d. h. auf die letzten vier Jahrhunderte, (ii) sporadische Aufzeichnungen aus Asien gibt es ab 165 v. Chr., speziell von den chinesischen Dynastien (man denke an ebenfalls frühe Erkenntnisse im Zusammenhang mit Magnetismus, siehe Kap. A.1.4) aber auch Korea und Japan. Erstmalige Beobachtungen sind dokumentiert von Christoph Scheiner (1573 – 1650) in Verbindung mit Christoph Grienberger (1561 – 1636), weiters Thomas Harriot (1560 – 1621), Galileo Galilei (1564 – 1642) und Johann Fabricius (1587 – 1617), künstlerische Belange sind dargestellt u. a. in Abb. A.13 und Seite 157. Bei optischen Instrumenten sei hier Simon Plöchl, (1794 – 1868) mit seinem dialytischen Fernrohr und Mikroskopen erwähnt, weiters die Naturwissenschaftler Joseph Johannes von Littrow (1781 – 1840), dessen Sohn Karl Ludwig von Littrow (1811 – 1877) und dessen Sohn Otto von Littrow (1843 – 1864) mit dem Littrow-Spektrometer. Für längere Datenreihen ist man auf indirekte Indizes angewiesen wie sie kosmogene Radionuklide darstellen. Die Modulation des differentiellen Energiespektrums der galaktischen kosmischen Strahlung (GCR) durch die solare Aktivität findet innerhalb eines Bereiches von  $\sim 100$  AU um die Sonne herum statt (Seite 170). Während aktiver Perioden verursacht z. B. verstärkte CME Aktivität größere Störungen im interplanetaren Magnetfeld (IMF), daraus resultiert eine verstärkte Streuung der intergalaktischen kosmischen Strahlung weg von der inneren Heliosphäre. Als Konsequenz daraus ist der Nettofluß für die obere Atmosphäre vermindert, speziell im niederenergetischen Bereich des Spektrums. Abhängig von der Primärenergie entwickelt sich eine Kaskade von sekundären Teilchenpopulationen. Viele der Neutronen von solchen Kaskaden erzeugen durch Spallation und andere kernphysikalische Reaktionen eine große Anzahl neuer stabiler und auch kurzlebiger Kerne. Einige langlebige kosmogene Radionuklide sind  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  (kleine Erzeugungsrate, produziert durch hochenergetische Spallationsreaktionen) und  $^{36}\text{Cl}$  (sehr kleine Erzeugungsrate, entstanden aus  $^{36}\text{Ar}$ , nur 1 %

in the Atmosphäre,  $t_{1/2} = 301000 \text{ y}$ ), kurzlebig ist Tritium ( $^3\text{H}$ ,  $t_{1/2} = 12.32 \text{ y}$ ), es wird ebenfalls bei Fusions-Reaktoren angedacht (Deuterium-Tritium Brennstoff). Das geomagnetische Dipolfeld verhindert durch einen "cut off" daß niederenergetische kosmische Strahlung bei niederen Breiten auftritt, der solare Modulationseffekt ist stärker in polaren Regionen, d. h. die Erzeugungsrate ist abhängig vom (i) geomagnetischen Feld, (ii) der solaren Aktivität und (iii) der geomagnetischen Breite. Um für vergangene Perioden Veränderungen in der Erzeugungsrate erkennen zu können benötigt man Archive in denen die erzeugten Radionuklide in ungestörten Schichten gespeichert und angereichert sind. Solche Archive sind z. B. Eisschichten, Gletscher und Sedimente im Falle von  $^{10}\text{Be}$ , Baumringe, Sedimente, Korallen für  $^{14}\text{C}$ . Beide, sowohl  $^{14}\text{C}$  als auch  $^{10}\text{Be}$ , werden erzeugt durch Einflüsse der kosmischen Strahlung auf die Atmosphäre, das geochemische Verhalten ist allerdings komplett unterschiedlich. Als Richtlinie kann gelten, daß kurze Periodizitäten  $\lesssim 1 \text{ ky}$  mit hoher Wahrscheinlichkeit solaren Ursprungs sind, hingegen längere Perioden  $\gtrsim 3 \text{ ky}$  vermutlich durch Veränderung des magnetischen Feldes verursacht werden.

**Kohlenstoff** Die kurzzeitigen  $\Delta^{14}\text{C}$  (rel. Abweichung in ‰ von einem Standardwert des Verhältnisses  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  in der Atmosphäre) Fluktuationen sind charakterisiert durch Spitzen mit einer typischen Dauer von  $\sim 200$  Jahren, die sogenannten "Suess-wiggles", benannt nach Hans Eduard Suess, 1909 – 1993, [Waenke and Arnold, 2005]. Hans Suess konnte aus wenigen Daten korrekte Schlüsse ziehen, im Unterschied etwa zu Alexander von Humboldt, er hat umfangreiche empirische Studien betrieben – somit zwei konträre und trotzdem extrem erfolgreiche Arbeitsmethoden. En vogue ist ebenfalls der "Suess-Effekt", die Verdünnung von  $^{14}\text{C}$  am atmosphärischen  $\text{CO}_2$  aufgrund Verbrennung fossiler Energieträger (z. B. momentane Ölproduktion von  $\sim 75$  Mill. Barrels/Tag, stagnierend seit 2005, bei generell steigenden Preisen mit starken Preisschwankungen während einer Krise, besonders im Jahr 2008; In Emissionen von Kernkraftwerken ist ebenfalls  $^{14}\text{C}$  vorhanden) und in weiterer Folge die Zunahme von  $\text{CO}_2$  mit Auswirkungen auf das Klima – die prekäre Realität mit dem Pulverfaß der globalen Erwärmung (Ruß – black carbon – dürfte ebenfalls erheblich beitragen, aktuelle Werte gehen von  $1.1 \text{ W/m}^2$  aus). Erwähnt sei hier das Pariser Abkommen der 21. UN-Klimakonferenz 2015, es sieht eine Begrenzung der globalen Erwärmung von unter 2 Grad vor. Eine Verdopplung der atmosphärischen  $\text{CO}_2$  Konzentration (im Mai 2013 wurden 400 ppm überschritten, vorindustrielle Werte lagen bei 280 ppm) ergibt zusätzlich  $\sim 3.7 \text{ W/m}^2$  auf der Erdoberfläche mit unterschiedlichen Auswirkungen/Sensitivitäten von  $0.6 - 6.5 \text{ }^\circ\text{C}$  (Mittel  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) Erwärmung; (nichtlineare) Rückkopplungen, Kipp-Punkte (Irreversibilität) und unerwartete Übergänge ausgeschlossen. Letztlich geht aller Kohlenstoff in der Atmosphäre, Biosphäre und im Ozean von Gestein aus, die Zyklen in diesen Reservoirs werden modifiziert (u.U. in Zukunft zusätzlich auch künstlich durch Kohlenstoffspeicherung in Basaltgestein). Die  $\Delta^{14}\text{C}$  Daten von Baumringen der letzten 11 ky (Holozän) sind gekennzeichnet durch kurzzeitige Variationen überlagert von einem langzeitlichen Trend. Die kurzzeitigen Variationen können auf solare Modulation zurückgeführt werden, der langzeitliche Trend ist vorwiegend aufgrund von Variationen des geomagnetischen Feldes während der letzten 20 ky und möglicherweise aufgrund einer Änderung im Kohlenstoffsystem. Anstelle von Baumringen wurden andere Objekte und Materialien wie (i) Sedimente, (ii) Korallen (Unterwasseraufnahmen von Riffen aus der Ferne via Satellit oder Flugzeug erfolgen im Bereich 430 – 710 nm), flache biogene Riffe aus Steinkorallen bis in eine Tiefe von  $\sim 30 \text{ m}$  (dort Gorgonien) und darunter Tiefsee-Habitats in mesophotischen Ökosystemen (Korallen, Schwämme, Algen) bis  $\sim 150 \text{ m}$  in den Tropen (z. B. im Papahānaumokuākea Marine National Monument, NW Hawaii Inseln), (iii) Stalagmiten (Speläotheme/Höhlenminerale;  $\delta^{18}\text{O}$ ; in Verbindung mit Guano Ablagerungen) oder (iv) Pollen verwendet. Das absolute Alter wird bestimmt durch Anzahl der jährlichen Sedimentschichten oder durch radiometrische (z. B.  $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$  Reihe) Datierungstechniken, beispielsweise stellen Stalagmiten den Konnex zwischen asiatischem Monsun und eiszeitlichen Zyklen dar. Die bekannteste Periodizität ist der 11-jährige Schwabe Zyklus mit Variationen im Bereich von 7 bis 18 Jahren seit 1750, der Mittelwert liegt nahe bei 11 Jahren. Eine längere Periodizität, auch bekannt aus Aufzeichnungen von Polarlichtern, ist der 88-jährige Gleißberg Zyklus (Wolfgang Gleißberg, 1903 – 1986). Die stärkste Periodizität in den  $\Delta^{14}\text{C}$  Daten ist der 205-jährige de Vries (Suess) Zyklus (Hessel de Vries, 1916 – 1959). Solare Minimumperioden wie Maunder, Spörer und Wolf sind in einem groben 200 Jahr Rythmus, ein Indiz für den solaren Ursprung. Eine weitere Oszillation ist der Eddy-Zyklus im Bereich 900 – 1050 Jahre. Der 2100/2500-jährige Hallstatt Zyklus hat möglicherweise einen solaren Ursprung, allerdings sind momentan keine gesicherten Argumente zugunsten dieser Annahme. Eine alter-

native astronomische resp. planetare Interpretation wäre über eine Resonanz unter Einschluß von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun ( $\sim 2318$  Jahre) in ihrer periodischen Umrundung der Sonne (Exzentrizitäten von Orbits Sonne - planetares Massenzentrum).

Carbonate aus Höhlen (Speläotheme – wie vorhin erwähnt) eignen sich gut zur Datierung (U-Th Methode) von Permafrost Zeiten (gefrorener Boden während des gesamten Jahres; 24 % der Landfläche der nördliche Hemisphäre mit  $\sim 1700$  Gt an organischem Kohlenstoff) in der Klimageschichte, die Höhlentemperatur ist ein Proxy/Surrogat für die mittlere jährliche Lufttemperatur (Bufferung durch den umgebenden Felsen; Speläothem Wachstum hängt ebenfalls von der Feuchte ab). Ein auftauen des Permafrostes setzt massiv die Treibhausgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  frei, aber auch Sporen mit Auswirkungen auf Rentierherden und in unmittelbarer Folge auf die umgebende Bevölkerung, zusätzlich entsteht Erosion und Eisverflüssigung mit Einfluß auf Infrastruktur-Bauten in diesen Gebieten. Speläotheme markieren somit das Vorhandensein von flüssigem Wasser, also Zeiten ohne Permafrost und auch keine trockenen, wüstenartigen (aride) Bedingungen.  $\text{CO}_2$  Senken an Land sind ebenfalls semi-aride Ökosysteme, speziell in der südlichen Hemisphäre (z. B. Australien); zugleich sind sie mitverantwortlich für die jahreszeitlichen atmosphärischen  $\text{CO}_2$  Variationen. Eminente Bedeutung bei Betrachtung von  $\text{CO}_2$ , Wärmeaustausch und Nährstoffgehalt kommt dem Südlichen Ozean zu, er ist ein zentraler Bereich im System der Meeresströmungen (historische Anmerkung: Athanasius Kircher, 1602 – 1680, fertigte 1665 eine Karte von Meeresströmungen basierend auf einem Netzwerk an unterirdischen Kanälen; er hatte auch Arbeiten zu Magnetismus).

**Beryllium**  $^{10}\text{Be}$  Archive sind (i) Eisbohrkerne, sie sind optimal für die solare Variabilität, da sie direkte Proben der Atmosphäre darstellen, (ii) Sedimente und (iii) Löss. Sie (i) detektieren hervorragend bei hohen geomagnetischen Breiten die solare und geomagnetische Modulation der Erzeugungsrate von kosmogenen Radioisotopen, gemessene Periodizitäten können auf die solare Variabilität (11, 88, 205) zurückgeführt werden, es gibt (ii) keine Anreicherungseffekte, d. h. Speicherung der jeweils aktuellen Erzeugungsrate und sie sind (iii) besonders charakteristisch im GRIP Eiskern (zwischen 25 – 65 ky BP), weiters ist dort eine Spitze bei 38 ky BP, der sogenannte Laschamp-Event, er kann auf einen starken Exkurs des geomagnetischen Feldes zurückgeführt werden. Aktuelle Datierungen liefern für die Laschamp-Exkursion  $41.2 \pm 1.6$  ky (Abnahme 18 nT/y, Zunahme 10 nT/y) und für die Mono-Lake-Exkursion  $34.2 \pm 1.2$  ky (33 nT/y, 70 nT/y).

**Umwelt, Klima, kosmische Strahlung, Wolken und anthropogener Einfluß** Einige Beispiele sollen illustrieren wie auf der geologischen Zeitskala (siehe ebenfalls Seite 129 mit magnetischen Feldumkehrungen und der GPTS) bis herauf zum Holozän / Anthropozän (ein noch inoffizieller Name auf der geologischen Zeitskala, die stratigraphisch aufgebaut ist) die Erde einem stetigen Wandel unterzogen ist. Sei es, daß beispielsweise der Mond durch seine Phasen und Gezeiten die Rythmen des Lebens auf der Erde mitschreibt oder (ii) subtile und schwerer greifbare Ursachen vorliegen die über einen langen Zeitraum beträchtliche Wirkungen entfalten können. Der menschliche Einfluß ist unbestritten, z. B. (i) die  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  Anstiege und  $\text{O}_3$  Abnahme (Ozonloch – in Verbindung mit dem Montreal-Protokoll eine Stabilisierung und langsame Zunahme des stratosphärischen Ozons) in der Atmosphäre, (ii)  $\text{CO}_2$  Zunahme (pH-Wert Abnahme; Versäuerung; neben dem Temperaturanstieg ebenfalls reduzierter Sauerstoffgehalt) in den Ozeanen und Kontrolle das Süßwassers (Dämme, Kanäle, etc.) im hydrologischen Kreislauf, (iii) Zunahme von Erosion durch Änderungen an Wäldern, Landwirtschaft, Baumaßnahmen (Lithosphäre) und (iv) Variationen/Abnahme in der Biodiversität/Disparität (Überfischung der Meere, Abnahme an Meereseis, Jagd, Verlust von Lebensräumen, Zunahme an allochthonen Arten; die Planktonmenge ist ein Schlüssel-Indikator für das Meeresbefinden; Meeresverschmutzung kann z. B. mit Seevögel-Kolonien – u. U. tausende Individuen auf einer einzigen Insel, z. B. vor der Küste Perus; nahe Kolonien wettstreiten nicht direkt um das Nahrungsangebot, die Futtersuche erfolgt an unterschiedlichen Orten – bestimmt/nachvollzogen werden), d. h. in biologischen Kreisläufen. Galaktische kosmische Strahlung (Kap. A.2.5) kann die Bewölkung der Erde durch die Erzeugung von Aerosol-Teilchen (:= feste Teilchen, flüssige Tröpfchen oder Mischung aus beiden Phasen in Gas im Durchmesserbereich von 2 nm –  $2 \times 10^4$  nm; kleinere Aerosol-Teilchen haben in der {Troposphäre / Stratosphäre} eine Verweilzeit von einigen {Wochen / Jahren}) und nachfolgender vermehrter Wolkenbildung beeinflussen. Verblüffende Korrelationen wurden zwischen der Wolkenbedeckung und den Fluß der GCR in der Atmosphäre gemessen (kosmische Strahlung  $\rightarrow$  Wolkenbildung  $\rightarrow$

klimate Veränderungen). Weiters könnte die Ionisierung durch die GCR die Ströme bei Schönwetter-Bedingungen zwischen Ionosphere und Erdoberfläche, siehe Kap. B.1.4, modulieren. Damit einhergehen würde eine Änderung der Ladungsverhältnisse in der Nähe von Wolkenschichten, eine Variation im Verhältnis Wolkentröpfchen - Aerosolteilchen. Der GCR-Fluß in der unteren Atmosphère variiert um  $\sim 15\%$  im Laufe des 11-jährigen Zyklus, getrieben durch Änderungen im Sonnenwind mit höheren Flüssen in der Troposphere während Solarminimum. Die globale Wolkenbedeckung variiert zwischen  $2-4\%$  während des Sonnenzyklus, entsprechend einer gemittelten globalen Änderung in der Strahlung von  $1-2\text{ W/m}^2$ . Die Variation durch Wolken im kurzwelligen Bereich beträgt zirka  $47\text{ W/m}^2$ . Die Effekte der solaren Variabilität auf das irdische Klima bleiben ein kontroversielles Thema, ebenso wie Auswirkungen von geänderten Anbaumethoden in der Landwirtschaft (z. B. atmosphärisches  $\text{CH}_4$  durch Veränderung der Dungeprazis im Reisanbau; die  $\text{CH}_4$  Konzentration beträgt momentan  $\sim 1850$  ppb, die globale Zunahme von Methan  $\sim 6$  ppb/y). Untrennbar verbunden mit klimatischen Fragen ist in jüngster Zeit ebenfalls die vermehrte Rückbesinnung auf erneuerbare Energien. Korrelationen mit dem 11-jährigen Zyklus finden sich bei (i) Temperaturen der ( $i_1$ ) Meeresoberfläche, ( $i_2$ ) Troposphere, ( $i_3$ ) Stratosphere, weiters (ii) Druck an der Meeresoberfläche und (iii) Wolkenbedeckung. Generell reagiert die Natur blitzartig z. B. auf Feuchtigkeit und es entstehen hochkomplexe, differenzierte Abhängigkeiten. Oder es gibt Sträucher – der Diptam (*Dictamnus albus*) – die sich durch aetherische Öle selbst entzünden können. Generell gelten als klimatisch relevante Faktoren für (Exo-) Planeten: (i) der zentrale Stern(typ), (ii) der Planetenorbit und (iii) der Planet mit seinen Parametern (Masse, Atmospherenzusammensetzung, biologische- und geologische Aktivität, Meere, etc.) und die verbundene zeitliche Evolution dieser Größen.

**Klima und menschliches Wirken ersichtlich in Kunstwerken** Es fehlen im "Klima-Puzzle" keinesfalls Zeugnisse menschlicher Aktivität. Die (i) Kultur der Aborigines ist mit  $\sim 65\text{ kJ}$  die wahrscheinlich älteste noch existierende der Welt, bereits längst ausgestorbene Tierarten wurden in Australien von ihnen verewigt; Artefakte sind z. B. in der Pilbara-Region (Petroglyphen auf der Burrup-Halbinsel), den Kimberleys oder im Arnhemland (Madjedbebe) zu bewundern. Künstlerische Aktivitäten während der Altsteinzeit in Europa gibt es spätestens seit dem Fund der (ii) Venus ("Fanny") vom Galgenberg, eine der ältesten Frauenstatuetten (Steinplastik,  $7.2\text{ cm}$ ) der Welt, gefunden 1988 bei der Freilegung eines Wohnplatzes altsteinzeitlicher Jäger am Galgenberg bei Stratzing, nördlich von Krems a. d. Donau, um  $\sim 30000$  v. Chr. (Aurignacien) entstanden (erwähnt sei aus der Hallstattzeit die Situla von Kuffern, ein Weinkubel aus Bronze,  $\sim 5.$  Jhd. v. Chr., gefunden 1891 in Statzendorf, diesmal die Lage südlich von Krems a. d. Donau). Die (iii) Venus von Willendorf, gefunden 1908 in Willendorf a. d. Donau (SW von Krems), eine  $11\text{ cm}$  große anthropomorphe Kalksteinfigur aus dem Jungpaläolithikum (Gravettien), ist  $\sim 25\text{ kJ}$  alt und damit ebenfalls eines der ältesten Kunstwerke resp. ein Kultgegenstand aus dieser Zeit. Funde von Steinwerkzeugen bei Ausgrabungen in Willendorf dokumentieren die Besiedlung in Mitteleuropa nördlich der Alpen durch den modernen Menschen bereits vor  $43500$  Jahren. Vor  $\sim 17\text{ kJ}$  war Eiszeit in Europa, ersichtlich ist die Klimageschichte an den Höhlenmalereien (z. T. sind auch Fußspuren in ca.  $10$  der rund  $350$  Höhlen nachweisbar), beispielsweise in den Höhlen von Lascaux (manchmal als Sixtinische Kapelle der Urgeschichte bezeichnet) in Frankreich oder Altamira (Felsmalereien / Petroglyphen-Gravuren in der Zeitspanne vor  $35.000-15.200$  Jahren; bestimmt aus Kalzit-Ablagerungen; Aurignacien Kultur in Kantabrien) und El-Castillo ( $\sim 40.800$  Jahre; die aktuell älteste bekannte Höhlenmalerei; Pigmente mit Blastechniken aufgebracht; Teil eines ganzen Höhlen-Clusters, darunter Las Monedas, Las Chimeneas, La Pasiega, La Cantera), beide in Spanien (Abbildungen in der Maroshohle auf Sulawesi, Indonesien, haben ähnliches Alter; frühe Phasen finden sich u. a. auch in Arnhemland und Kimberley, Australien). In bekannten Orten der Alpen wie (iv) Hallstatt reicht die Besiedlungsgeschichte bis  $\sim 5000$  Jahre v. Chr. zurück (Schuhleistenkeil), die Hallstattzeit (beginnend mit der Stufe Hallstatt B um  $\sim 1200$  v. Chr.; Urnenfelderkultur; sehr bekannt ist der mit  $7.$  Jhd. v. Chr. datierte bronzene Kultwagen von Strettweg) umfaßt die Periode  $800-400$  v. Chr. (älteste Eisenzeit), Kreisgrabenanlagen datieren ebenfalls im  $5.$  Jahrtausend v. Chr. (z. B. Immendorf) und (v) Ausgrabungen / Datierungen von altsteinzeitlichen Neandertaler-Fundstücken (Feuerspuren, Steinwerkzeuge, fossile Säugetierreste) in der Repolusthohle (Badlgraben bei Peggau, Steiermark) reichen bis  $\sim 300000$  Jahre zurück. Geht man nach (vi) Südamerika in die Anden, z. B. nach Peru, trifft man u. a. beginnend mit Caral unweigerlich auf Inka-Kulturstätten wie Machu Picchu oder Choquequirao. Im Unterschied zu anderen Hochkulturen war der amerikanische Kontinent mit seinen Natur- und

Kultur-Landschaften bis ins 16. Jhd. isoliert. Abgeschlossenheit und unlösbare Umweltprobleme führten wahrscheinlich auch zum Untergang der Kultur auf der Osterinsel (Rapa Nui), heute eine karge Landschaft mit den weltbekannten, martialischen Steinstatuen (Moais). In Summe sind es archäologische Befunde, linguistische Muster, phenotypische Merkmale als biologische Evidenz und eine Vielfalt an ökologischen, kulturellen und (paläo)klimatischen Daten die ein stimmiges Ganzes ergeben können. Die aktuell ältesten bekannten Hominiden-Funde außerhalb Afrikas befinden sich in Dmanissi, Georgien, das Alter der Fossilien (*Homo erectus*) beträgt  $\sim 1.77$  Millionen Jahre, die Werkzeuge (Steinabschläge) sind vom Oldowan-Typ, d. h. noch keine Acheuléen'schen Faustkeile, und hergestellt aus unterschiedlichsten Rohmaterialien.

**Klimazyklen** Mehrere Zyklen im Zusammenhang mit der Aktivität der Sonne sind verfügbar:  $\sim\{11 / 88 / 205 / 2300\}$  Jahre = {Schwabe / Gleißberg / Suess, de Vries / Hallstatt}. Der Suess / de Vries Zyklus ist nachweisbar in  $^{10}\text{Be}$  Daten vom GRIP Eiskern während der letzten Eiszeit (25 – 50 ky BP). Analysen der Amplitude der Variation dieses Zyklus zeigen, daß er mit dem geomagnetischen Feld moduliert ist, ein Indiz dafür, daß der Suess / de Vries Zyklus solaren Ursprungs – anstelle von klimatischem Ursprung – ist. Generell werden mehrere Periodizitäten in den  $\Delta^{14}\text{C}$  Daten im Zusammenhang mit der veränderlichen solaren Aktivität interpretiert. Es sind dies der Gleißberg Zyklus (Periode näherungsweise 88 Jahre), der Suess / de Vries Zyklus (205 Jahre) und der Hallstatt Zyklus (2300 Jahre). Der solare Ursprung von Schwabe und Gleißberg Zyklus in den Daten wird durch die historischen Sonnenflecken Aufzeichnungen untermauert. Eine solare Beziehung für den Suess / de Vries Zyklus wird unterstützt durch die Tatsache, daß das Maximum in den  $\Delta^{14}\text{C}$  Daten mit den Maunder (1645 – 1715) und Spörer (1420 – 1540) Minima übereinstimmt. Der Suess / de Vries Zyklus wurde z. B. in den Ringen von Kieferbäumen datierend im Zeitraum von 3405 Jahren v. Chr. bis 1885 Jahre n. Chr. und in Thermolumineszenz-Daten von Meeresedimenten im Zeitraum für die letzten 2500 Jahre gefunden (Optisch Stimulierte Lumineszenz, OSL, erlaubt die Altersbestimmung von Mineralien – Quarz, Feldspat – in Sedimenten über die  $^{14}\text{C}$  Grenzen hinaus; sie zeigt das Alter wann das Objekt zuletzt der (Sonnen)-Strahlung ausgesetzt war, d. h. wie lange es vergraben war). Der älteste Baum (Kiefer "Methuselah", *pinus longaeva*) ist momentan  $\sim 4800$  Jahre alt (5062 Jahre – Status 2012 – für eine örtlich nicht bekanntgegebene Langlebige Kiefer in den White Mountains, Kalifornien), Rekordhalter in der Höhe sind (i) Küstenmammutbäume (*sequoia sempervirens*) mit über 115 m ("Hyperion" im Redwood Nationalpark, Kalifornien) oder knapp darunter, z. B. der "Stratosphere Giant". Die Gattung *Sequoia* – ursprünglich beschrieben von Stephan Ladislaus Endlicher (1804 – 1849), in diesem Zusammenhang seien aber auch der Pflanzenphysiologe Franz Unger (1800 – 1870) und der Orientalist Joseph Freiherr von Hammer-Purgstall (1774 – 1856) erwähnt – ist eine Unterfamilie der Mammutbäume (*sequoioideae*) mit zwei weiteren Arten, (ii) dem Riesenmammutbaum (*sequoiadendron giganteum*) und (iii) dem Urweltmammutbaum (*metasequoia glyptostroboides*). Selbst im tropischen Regenwald Amazoniens können Bäume – Jahresringe sind nicht immer existent oder ungleichmäßig, die Altersbestimmung erfolgt mit  $^{14}\text{C}$  – ein Alter von  $\sim 1000$  Jahren erreichen. Als einer der ältesten Bäume in Europa gilt die 1000-jährige Eiche in Bierbaum an der Safen, Oststeiermark, der älteste dendrochronologisch datierte Baum mit Namen "Adonis" ist eine Schlangenhaut-Kiefer im Pindosgebirge, Griechenland, mit mindestens 1075 Jahren. Schätzungen im Amazonasgebiet ( $\sim 6.3$  Millionen  $\text{km}^2$ , Unterteilung in 5 große Waldtypen) belaufen sich auf  $\sim 16000$  Baumarten ( $3.9 \times 10^{11}$  Bäume), nur 227 davon (Spezialisten in ihrem Habitat) machen die Hälfte aller Bäume aus. Die globale Anzahl an Bäumen beträgt  $\sim 3.04 \times 10^{12}$ , davon  $\{1.39, 0.74, 0.61\} \times 10^{12}$  in {tropischen/subtropischen, borealen, gemäßigten} Zonen – als Vergleich dazu – diese Menge übersteigt die Anzahl der Sterne in der Milchstraße um ein Vielfaches. Um klimatische von Produktionseffekten zu trennen ist es üblich Zeitreihen von  $^{10}\text{Be}$  und  $\Delta^{14}\text{C}$  zu vergleichen, weil die relativen Produktionsraten dieser Isotope aufgrund von solarer und geomagnetischer Modulation ähnlich sind, hingegen das Transportverhalten in der Atmosphäre stark voneinander abweicht. Wenn ein Zyklus solaren Ursprungs ist dann wird die Amplitude mit dem geomagnetischen Feld moduliert, ansonsten ist der Ursprung klimatisch. Die geomagnetische Modulation der Amplitude im  $^{10}\text{Be}$  Fluß vom Suess / de Vries Zyklus ist ein starkes Indiz auf solaren Ursprung dieser Periodizität von etwa 205 Jahren. Neben diesen anderen länger als 22 Jahr Perioden in der Spektralanalyse von verschiedenen solar-terrestrischen Datensätzen, ist der 88 jährige Zyklus einzigartig, weil er direkt auf die zyklische Sonnenfleckenaktivität zurückgeführt werden kann (bestimmt aus dem momentan längsten Datensatz über kosmogene Isotope, den IntCal09 Daten von atmosphärischen und maritimen

$^{14}\text{C}$  Häufigkeiten, zurückreichend von 0 – 12.55 ky BP mit Baumringen und von 12.55 – 50 ky BP mit Korallen). Während dieser vollen Periode hat der Gleißberg Zyklus in der  $^{14}\text{C}$  Konzentration eine Periode von 87.8 Jahren und im Mittel eine Amplitude von  $\sim 1\text{‰}$  in  $\Delta^{14}\text{C}$  Einheiten. Die Amplitude des Gleißberg Zyklus scheint moduliert zu sein von anderen längerperiodischen Prozessen im Bereich von  $\sim 2000$  Jahren. Der berühmte 11 jährige Schwabe Zyklus (respektive Hale Zyklus mit 22 Jahren bzgl. des solaren Magnetfeldes, George Ellery Hale; das Modell dazu ist der Babcock-Leighton Dynamo Zyklus, Horace Welcome Babcock, Robert Benjamin Leighton) im Prozess der auftauchenden, sich entwickelnden und wieder verschwindenden Sonnenflecken und Sonnenfleckengruppen auf der Sonnenscheibe ist lange bekannt seit der Entdeckung durch Christian Pedersen Horrebow (1718 – 1776) im Jahr 1770 und der Wiederentdeckung im Jahre 1843 durch Samuel Heinrich Schwabe (1789 – 1875). Die Waldmeier Regel für den 11-jährigen Zyklus besagt eine inverse Abhängigkeit zwischen Anstiegszeit zum Maximum und dessen Intensität. Radiokarbon wird in der Atmosphäre durch die Kernreaktion  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  erzeugt. Schnelle Neutronen werden in Spallationsreaktionen mit atmosphärischen Gasen durch nukleare Kaskadenprozesse erzeugt und sind ursprünglich hervorgerufen durch galaktische kosmische Strahlung. Die Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung für die Erdatmosphäre hängt von der Sonnenaktivität und dem interplanetaren magnetischen Feld ab. Wenn die Sonnenaktivität zunimmt erreicht weniger GCR die Atmosphäre, damit wird die Produktion von  $^{14}\text{C}$  bestimmt. Infolgedessen ist eine inverse Beziehung zwischen  $^{14}\text{C}$  Produktion und solarer Aktivität. Die Größe  $\Delta^{14}\text{C}$  erhält man aus

$$\Delta^{14}\text{C} = \left( \frac{A_{sn}}{A_{on}} e^{\lambda\tau_s} - 1 \right) 1000\text{‰}, \quad (\text{A.227})$$

mit  $\tau_s$  dem Alter der Probe vor 1950, der spezifischen Aktivität der Probe  $A_s = -\lambda N$ , mit  $\lambda$  als radioaktive Zerfallskonstante und  $N$  die Anzahl der Atome des Isotops pro 1 g der Probe,  $A_{on}$  ist ein normalisierter und isotopisch fraktionierter Korrekturstandard. Die  $^{14}\text{C}$  Analyse (natürliche Häufigkeit  $^{14}\text{C}/\text{C} \sim 1.2 \times 10^{-12}$ ) erfolgt mit Massenspektrometern (accelerator mass spectrometry, AMS, Sensitivität  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 10^{-15}$ ) oder neuerdings mit optischen (infrarot) Methoden. Dem 11-jährigen Zyklus sind mehrere Variationen überlagert, darunter auch der "Forbush decrease" (Scott Ellsworth Forbush, 1904 – 1984). Er steht in Verbindung mit Flares und liefert eine Reduktion der Temperatur der kosmischen Strahlung in Perioden von wenigen Stunden, bis zu Tagen oder sogar Wochen. Tabelle A.9 zeigt eine Auflistung der Atmosphärenschichten und deren Ionisationsquellen.

### Erscheinungen und Zyklen in Ökosystemen verbunden mit solaren und erdmagnetischen Einflüssen

Ungewöhnliche aber charakteristische Phänomene sind  $\sim 10$ -jährige Zyklen in den Populationen von mehreren Arten von Säugetieren und Vögeln im nördlichen Nadelwaldgürtel (Alaska, Kanada). Der prominenteste davon, der des Schneeschuh-Hasen (*Lepus americanus*), hat einen 8 – 11 jährigen Zyklus mit Änderungen in der Population im Bereich des 20–200 fachen. Verbißspuren in Ringen von Fichtenbäumen, verursacht durch eine veränderliche Hasenpopulation, stehen in Zusammenhang mit klimatischen Faktoren (bestimmt aus Eisbohrkernen) und mit dem Sonnenzyklus, speziell bei sehr hoher Aktivität der Sonne, siehe [Sinclair et al., 1993]. Es besteht Synchronisation in den Phasen, d. h. eine starre Kopplung. Die Mehrzahl der Anzeichen lassen vermuten, daß als Triebfeder sowohl das Nahrungsangebot als auch das Verhalten der Raubtiere, besonders des Luchses (*Lynx canadensis*), den dynamischen Zyklus bestimmen, zumindest in Zeiten niedriger Population, siehe [Hodges et al., 1999], [Krebs et al., 2001], [Sinclair and Gosline, 1997]. Die Vermutung liegt nahe, daß der Zyklus der Schneeschuh-Hasen indirekt über klimatische Veränderungen im Nadelwald durch die solare Variabilität beeinflusst oder synchronisiert wird.

Eng gekoppelte Systeme, z. B. die Nahrungskette auf der Isle Royale, Michigan, USA, können ein (in diesem Fall dreistufiges) top-down Muster aufweisen. Das Wachstum von Balsam-Tannen (*Abies balsamea*; beeinflusst von Elchen, besonders im Winter), sichtbar in Baumring-Analysen, wird reguliert durch (inzwischen durch starke Inzucht fast ausgestorbene) Wölfe (*Canis lupus*) und Elche (*Alces alces*; Pflanzenfresser-Population).

Eng verbunden mit dem Erdmagnetismus, neben vielen anderen Tierarten, scheint auch die Ausrichtung von ruhenden Rindern, Schafen und Hirschen zu sein, siehe [Begall et al., 2008]. Die individuellen Herden zeigen eine bevorzugte Nord-Süd Ausrichtung in Zeiten ohne Stressbelastung, d. h. in ungestörter Umgebung unter günstigen Bedingungen in den Habitaten.

### Feinstruktur von Sonnenflecken

Die Darstellung dieser Thematik bzgl. Sonnenflecken basiert z. T. auf [Thomas and Weiss, 2004], nachfolgend dazu ergänzende Überlegungen. Generell ist die Sonne mit Spektralklasse G2V ein relative inaktiver Stern, Sonnenflecken bedecken niemals mehr als  $\sim 0.1\%$  der Sonnenoberfläche. Es gibt schnell rotierende late-type Sterne (Starspots) mit wesentlich höherer Aktivität, dunkle Flecken können dort bis zu  $1/4$  der Oberfläche bedecken, siehe Seite 112. Jede detaillierte Modellierung von Flecken auf magnetisch aktiven Sternen muß basieren auf den solaren Beobachtungen und deren Interpretationen. Durch verbesserte Techniken in den vergangenen Jahren konnten hochaufgelöste terrestrische- und S/C-Beobachtungen die komplexe thermische und magnetische Struktur von Sonnenflecken deutlich machen, zusammen mit den dazugehörigen Flüssen und Oszillationen. Diese Beobachtungen mit effizienten Sonnen-teleskopen großer Apertur sind im weitesten Sinne breitbandig und inkludieren optimierte (i) räumliche, (ii) zeitliche und (iii) spektrale Auflösungen. Simulationen erlauben parallel dazu Fortschritte im theoretischen Verständnis der dynamischen Prozesse, z. B. der Magnetokonvektion innerhalb eines Sonnenfleckens. Bei Messungen können Feinheiten bis hinunter zu  $0.1''$  aufgelöst werden (70 km auf der Sonne). Sonnenflecken sind dunkler, sie besitzen ein starkes magnetisches Feld welches den normalen Transport von Energie durch Konvektion in der solaren Photosphäre verhindert bzw. hemmt. Ein voll entwickelter Flecken kann einen Radius von  $(10 - 20) \times 10^3$  km haben, einen dunklen zentralen Kernbereich (Umbra), umgeben von einer etwas helleren faserartigen Penumbra. Die Umbra strahlt mit  $\sim 20\%$  Energie der normalen photosphärischen Rate, entsprechend einem Temperaturunterschied  $\Delta T$  von 2000 K, die penumbrale Intensität beträgt im Mittel 75 % von der außerhalb eines Sonnenfleckens. Das magnetische Feld ist nahezu senkrecht im Zentrum des Fleckens (bis zu 3500 G), die Inklination zur Vertikalen steigt mit zunehmendem Radius, erreicht einen mittleren Wert von  $70^\circ$  am Rand des Fleckens mit einer Feldstärke von weniger als 1000 G. Es ist seit langem bekannt, daß die Umbra eines Sonnenfleckens  $\sim 600$  km unterhalb der normalen Photosphäre liegt (Wilson-Effekt). Dies ist aufgrund der reduzierten Opazität resultierend aus dem geringeren Gasdruck (aufgrund des höheren magnetischen Druckes) und der Temperatur in der Umbra. Die Betrachtung der Penumbra erfolgt nicht nur bezüglich der sichtbaren Struktur im Kontinuum, sondern auch hinsichtlich der komplexen Geometrie des magnetischen Feldes und der dazugehörigen Geschwindigkeiten im Zusammenhang mit dem Evershed-Fluß (radialer Penumbraler-Fluß der Photosphäre).

**Beobachtungstechniken, Korrekturen bezüglich atmosphärischer Störungen** Bei bodengestützten Sonnen-Teleskopen sind die atmosphärischen Bedingungen ("seeing") i. Allg. die limitierenden Faktoren um hohe Auflösungen erzielen zu können. Drei Methoden und deren Kombination zur Korrektur des Seings sind in Verwendung: (i) Selektion von Frames, (ii) Nachbearbeitung und Rekonstruktion von Aufnahmen sowie (iii) Methoden der adaptiven Optik. Speziell hochaufgelöste Magneto- und Dopplergramme, erzielt mit optischen Filtern, enthalten relevante Informationen zur Feinstruktur von Sonnenflecken (Polarimetrie). Effizientere Filter mit mehrfach Etalon Fabry-Pérot Interferometern verstärken diesen Ansatz. Zur Bestimmung aller Komponenten des magnetischen Feldes in einem Sonnenflecken muß das Licht in allen vier Stoke'schen Parameter  $I$ ,  $O$ ,  $U$  und  $V$  gemessen werden. Polarimetrische Messungen sind zudem sinnvoll um Probleme mit Streulicht zu minimieren. Beispielsweise sind Geschwindigkeiten basierend auf Dopplermessungen in Stokes  $V$  großteils wenig gestört durch Streulicht aus der nichtmagnetischen Photosphäre. Wegen der relativ langen Belichtungszeit sind polarimetrische Messungen besonders empfindlich hinsichtlich atmosphärischer Störungen.

**Theoretischer Hintergrund** Sonnenflecken sind Forschungsobjekte für die MHD Theorie unter astrophysikalischen Bedingungen. Das einfachste Modell einer Pore oder eines Sonnenfleckens ist symmetrisch mit meridionaler (poloidaler) Konfiguration des Magnetfeldes begrenzt durch eine azimutale Stromschicht. Obwohl der Energietransport vorwiegend durch Strahlung an der sichtbaren Oberfläche der Umbra erfolgt ist die Konvektion maßgebend unterhalb dieser Struktur, d. h. ein rein strahlungsdominiertes Sonnenfleckenmodell ist zur Beschreibung nicht zielführend. Detaillierte Simulationen unter Einschluß von Ionisationseffekten und Strahlungstransport sind zunehmend erfolgreich in der Berechnung der beobachtbaren Eigenschaften der solaren Atmosphäre. Im Zusammenhang mit Sonnenflecken ist der Ansatz mit dünnen Flußröhren ("thin flux tube approach") vielversprechend um den Evershed-Fluß zu verstehen, sowohl in stationären als auch bei transienten Modellen mit transversaler Bewegung der Flußröhre.

**Umbrale Feinstruktur** Umbrale Punkte sind klein, meist helle Strukturen eingebettet im dunklen umbralen Hintergrund. Sie treten im Wesentlichen in allen Sonnenflecken und Poren auf. Hochaufgelöste Beobachtungen zeigen nicht nur viele individuelle umbrale Punkte sondern auch diffuse Hintergrundmuster mit variierender Intensität je nach Position. Die beobachtete Größe von umbralen Punkten ist im Bereich von  $0.8''$  (580 km) hinunter bis zum momentanen Limit der Auflösung von  $\sim 0.2''$  (140 km), die größeren Punkte in diesem Bereich sind wahrscheinlich Gruppen von kleineren. In großen Umbra sind oft dunkle Kerne, uniforme schwarze Bereiche praktisch frei von zumindest größeren umbralen Punkten. Diese dunklen Kerne korrespondieren möglicherweise mit Bereichen stärkerer Magnetfelder in denen Konvektion unterbunden ist. Umbrale Punkte werden manchmal in zwei Klassen unterteilt, (i) zentrale Punkte findet man im inneren Teil der Umbra, (ii) periphere Punkte sind an der Grenze zur Penumbra. Umbrale Punkte haben unterschiedliche Lebensdauer, die Spanne reicht von wenigen Minuten bis zu mehr als eine Stunde. Für gewöhnlich zeigen die peripheren umbralen Punkte "upflows", die Mehrheit der kleineren zentralen umbralen Punkte hingegen schwache "downflows" mit Geschwindigkeiten bis zu 300 m/s. Es zeigt sich somit, daß bei der Beobachtung von umbralen Punkten Intensitäts- und Geschwindigkeits-Eigenschaften über einen weiten räumlichen und zeitlichen Bereich auftreten, je kleiner desto schneller und zahlreicher. Die Messungen legen einen konvektiven Ursprung für die umbralen Punkte nahe, sowohl stationäre als auch variable Muster der Konvektion sind in der Umbra gegeben. Dieses komplexe Bild, hervorgerufen durch Beobachtung, stellt eine große Herausforderung für die Theorie der Magnetokonvektion dar. In einem typischen Sonnenfleck ist das starke magnetische Feld im Zentrum der Umbra praktisch vertikal, d. h. Bewegungen in radialer Richtung sind stark bevorzugt. Während der Lebensdauer eines Sonnenfleckens kann seine Umbra durch einen oder mehrere schmale, helle Lichtbänder, bekannt als "light bridges", überdeckt werden. Schmale Lichtbrücken entstehen und vergehen im Laufe der Zeit. Gegen Ende der Lebensdauer eines Fleckens ist die Umbra oft aufgeteilt mit mehreren Lichtbrücken, sie wachsen in der Breite und erreichen photosphärische Bedingungen, d. h. photosphärische Intensität und ein nahezu granulares Muster. Die Geometrie des magnetischen Feldes variiert beträchtlich von einer Lichtbrücke zur nächsten, das Feld ist i. Allg. horizontaler als das der umgebenden Umbra, in einigen Fällen sogar horizontal oder mit inverser Polarität.

**Penumbrale Feinstruktur** Eine kennzeichnende Eigenschaft eines Sonnenfleckens ist das Vorhandensein einer Penumbra. Die auffälligste Eigenheit und zugleich eine markante Erscheinung der penumbralen Feinstruktur, leicht erkennbar selbst bei moderater räumlicher Auflösung ( $1'' - 2''$ ), sind helle und dunkle Filamente, fast radial ausgerichtet und die ganze Penumbra betreffend. Mit sub-millisekunden Auflösung erkennt man in einem hellen penumbralen Filament zahlreiche kleinere Strukturen, sogenannte penumbrale Körner. Die Breite der Körner ist typisch im Bereich von  $0.5''$  (350 km) oder sogar weniger, die Länge erstreckt sich von  $0.5'' - 3.5''$  (350 - 2500 km). Das Schwedische 1-m Sonnenteleskop (SST) auf La Palma zeigte lange penumbrale Filamente und segmentierte penumbrale Körner bei  $0.1''$  Auflösung. Die Bewegung der penumbralen Körner ist i. Allg. in radialer Richtung, typischerweise nach (i) innen gerichtet in der inneren Penumbra und (ii) nach außen in der äußeren Penumbra. Die sich nach innen bewegenden penumbralen Körner erreichen die Umbra und werden zu peripheren Punkten der Umbra. Weißlicht-Aufnahmen der Penumbra, gemittelt über 2 – 4 Stunden, zeigen filamentartige Strukturen, daraus erschließt sich eine langzeitliche Stabilität der Magnetfeldkonfiguration. Es ist ein offensichtlicher Widerspruch zwischen der Richtung des mittleren magnetischen Feldes in der Penumbra mit der starken vertikalen Komponente und vom horizontalen Evershed-Fluß. Es sollte sich in einem hochleitfähigen Plasma kein Fluß quer zum Feld ausbilden können. Die Inklination des magnetischen Feldes in der Penumbra variiert azimuthal, d. h. horizontaler in den dunklen Filamenten, die Felder in den hellen und dunklen Filamenten unterscheiden sich in der Inklination um  $30 - 40^\circ$ . In der äußeren Penumbra mit dem maximalen Evershed-Fluß ist das Feld in den dunklen Filamenten meist horizontal, hingegen ist es in den hellen Filamenten mit einer Inklination von  $50 - 60^\circ$  zur Vertikalen. Es ist evident aus diesen Resultaten, daß das magnetische Feld in den hellen und dunklen Filamenten als unterschiedlich betrachtet werden muß, diese Geometrie verbietet jeden signifikanten Austausch. Diese Struktur wird unterschiedlich bezeichnet: "spines" (etwas vertikalere Felder) und "inter-spines" (etwas horizontalere Felder), ebenso "fluted", "uncombed" oder "interlocking-comb" Strukturen. Der markante Übergangsbereich zwischen hellen penumbralen Filamenten und praktisch konturloser Umbra zeigt eine komplexe Kombination aus Feldstärke und Inklination.

Der spektroskopische Evershed-Effekt, bestehend aus einer Verschiebung und Asymmetrie der Spektrallinien der Penumbra, ist ein markantes Merkmal von einem voll entwickelten Sonnenfleck. Beginnend mit Evershed's Entdeckung (John Evershed, 1864 – 1956) im Jahre 1909 wurde dieser Effekt als Dopplerverschiebung interpretiert, verursacht – wie vorhin erwähnt – durch den radialen, nahezu horizontalen Fluß in der Penumbra. Der normale Evershed-Effekt, schwache Linien hervorgerufen in photosphärischen Höhen, ist konsistent mit der radialen Ausströmung von Gas in der Penumbra, der entgegengesetzte Evershed-Effekt, sichtbar in starken Linien in der Chromosphäre, stimmt mit dem Einströmen in die Umbra überein. Hochaufgelöste Beobachtungen haben im Allgemeinen bestätigt, daß eine zumindest schwache Korrelation zwischen den dunklen Filamenten um den Evershed-Fluß besteht. Invertierungen des Stoke'schen Profils basierend auf einem Zweikomponentenmodell der penumbralen Atmosphäre erzeugen adäquate magnetische Felder und Evershed Geschwindigkeiten. Die Flüsse sind beschränkt auf dünne, schleifenähnliche Kanäle erhöht über dem Kontinuumbereich der Penumbra. Viele dieser erhöhten Flußkanäle, zusammen mit ihrem magnetischen Feld, krümmen sich zurück oder tauchen unter die Oberfläche bei Fußpunkten in der äußeren Penumbra oder sogar außerhalb des Sonnenfleckens. Der Rückfluß an diesen Fußpunkten kann Überschallgeschwindigkeiten erreichen. Der Evershed-Fluß ist zeitabhängig mit variierender Geschwindigkeit entlang individueller Kanäle auf Zeitskalen zwischen 10-20 Minuten. Die Messungen des Evershed-Effektes sind im Allgemeinen konsistent mit Flüssen entlang individueller Flußröhren in der Penumbra. Die Konfiguration ist ebenfalls konsistent mit dem abrupten Verschwinden des photosphärischen Evershed-Effektes an der Außenseite von Sonnenflecken. Der photosphärische Evershed-Fluß ist eine Strömung entlang dünner magnetischer Flußröhren hervorgerufen durch den Druckgradienten entlang der Röhre, manchmal benannt als Siphon-Fluß. Ein typischer Evershed-Fluß entspringt in der inneren oder mittleren Penumbra und krümmt sich zurück unter die Oberfläche in der äußeren Penumbra oder knapp außerhalb des Sonnenfleckens. Ein nach außen gerichteter Fluß entlang der Röhre entsteht nur wenn der Gasdruck in der Röhre kleiner am äußeren Fußpunkt als am Inneren ist (vice versa der magnetische Druck, er ist am äußeren Fußpunkt der Röhre höher als am Inneren). Diese Druck-Voraussetzungen (Gleichgewichte) gelten ebenfalls für transiente Flüsse, es ist der Gradient im Gasdruck der den Fluß treibt. Typischerweise ist das der Fall für eine penumbrale Flußröhre, die magnetische Feldstärke am inneren Fußpunkt beträgt  $\sim 1000$  G, der äußere Fußpunkt ist im Bereich um 1500 G, entsprechend einem typischen photosphärischen magnetischen Element.

**Formierung einer Penumbra** Die Formierung der Penumbra, die Entwicklung einer aktiven Region an der Sonnenoberfläche, beginnt mit dem Auftreten einer steigenden, fragmentierten Flußröhre in die Photosphäre. Das magnetische Feld ist ursprünglich auf zahlreiche kleine Flußelemente begrenzt. Diese Elemente akkumulieren sich an den Grenzen zwischen den Granulen und Mesogranulen und formen kleine Poren. Dunkle Poren sind starke Konzentrationen von magnetischem Fluß und unterscheiden sich von Sonnenflecken dadurch, daß ihnen eine Penumbra fehlt. Die Intensität reicht von 80 % bis runter zu 20 % der normalen photosphärischen Intensität mit maximalem zentralen magnetischen Feld zwischen 1500 – 2000 G. Sonnenflecken formen sich durch zusammenfließen von Poren und kleineren magnetischen Flußröhren in eine einzige wachsende Pore. Dieser rasche Vorgang passiert in weniger als 20 Minuten und die typische Geometrie des magnetischen Feldes, zusammen mit dem Evershed-Fluß, etabliert sich in der selben kurzen Zeitspanne. Die plötzliche Änderung läßt vermuten, daß die Penumbra eine Konsequenz einer Instabilität in der Magnetfeldkonfiguration der wachsenden Pore darstellt. Einfache Gleichgewichtsmodelle deuten an, daß die Inklination des magnetischen Feldes am Rand der Pore steigt wenn das Gesamtfeld zunimmt und läßt vermuten, daß die Konfiguration bei einem bestimmten Inklinationswinkel einen kritischen Wert erreicht. An diesem Punkt entwickelt die Pore eine Penumbra und wird zum Sonnenfleck.

### Solare Strahlung und ihre Variabilität

Elektromagnetische Strahlung von der Sonne ist die Primärenergiequelle für die Erde. Der 11-jährige Zyklus mit einer Spitze-Spitze Amplitude in der Größenordnung  $\sim 0.1\%$  ist etabliert durch aktuelle Strahlungsdichte (total solar irradiance, TSI) Messungen, größere Variationen von 0.2 % sind im Zusammenhang mit der 27-tägigen Rotationsperiode der Sonne, siehe Abb. 4.8. Sowohl UV, optischer als auch IR Spektralbereich sind veränderlich mit größeren Variationen zum kurzwelligen Bereich. Eine Verknüpfung der Variationen der solaren Strahlung mit (i) dem Sonnenmagnetismus ist klar ersichtlich, aktive Regionen

ändern die lokale Strahlung. Die Sonnenstrahlung ist ebenfalls veränderlich aufgrund (ii) Konvektion der Tiefenstruktur und (iii) eruptiver Ereignisse auf der Sonne. Auf den kürzesten Zeitskalen sind Variationen der Gesamtstrahlung im 5 min Bereich mit Amplituden von  $\sim 0.003 - 0.015\%$  während sehr starker Flares. Die Strahlungsabgabe der Sonne wird als Solarkonstante bezeichnet, allerdings zeigen Satellitenmessungen eine kontinuierliche Variation dieses Parameters. Sonnenbeobachtungen mit Radiometern im Weltraum lieferten die ersten eindeutigen Hinweise über die Variabilität der Sonnenstrahlung auf Zeitskalen von 5 Minuten bis Tagen und Monaten. Kontinuierliche Variationen in der Sonnenstrahlung wurden gemessen auf Zeitskalen von Minuten, sich ergebend aus p-Mode Oszillationen und großen Flares, bis zum 11-jährigen Aktivitätszyklus mit dem Ursprung in der veränderlichen Sonnenaktivität. Historisch sei bemerkt, daß bereits im 18. Jhd. mit Hilfe des Venustransits (3. Juni 1769) die Entfernung zur Sonne exakt bestimmt werden konnte, darunter die Beobachtungen (inkl. Polarlichtern) von Maximilian Hell (1720 – 1792).

Die Strahlung  $S$  ist die Größe die ein Sonnenradiometer mißt bei einer jährlichen mittleren Distanz Sonne-Erde von einer astronomischen Einheit  $R = 1 \text{ AU}$  (empirische Untersuchungen zeigen eine sekulare Zunahme von  $d/dt(\text{AU}) = 15 \pm 4 \text{ m}$  pro Jahrhundert). Sie ist die empfangene Leistung der elektromagnetischen Strahlung von der Sonne, pro Einheitsfläche an der Apertur des Radiometers, entweder in einem gegebenen Wellenlängenintervall  $d\lambda$  bei  $\lambda$  als spektrale Strahlung  $F(\lambda)$ , oder integriert als Gesamtstrahlung  $S = \int F(\lambda)d\lambda$ . Dieses Integral – die Gesamtstrahlung der Sonne in Richtung der Erde – ist die Solarkonstante. Die Leistung, welche die Sonne von der gesamten Oberfläche abstrahlt, wird als solare Leuchtkraft,  $L_{\odot} = 4\pi R^2 S$ , bezeichnet und kann nicht direkt beobachtet werden. Die Sonnenstrahlung ist zusammengesetzt aus Strahlung  $I(\lambda)$  von Elementen der Sonnenhemisphäre sichtbar für das Radiometer gemäß  $F(\lambda) = \int_{\Omega_{\odot}} I(\lambda)d\Omega$  mit  $\Omega_{\odot}$  als Raumwinkel der Sonnenscheibe bei Erddistanz für eine gegebene Wellenlänge,

$$F(\lambda) = I_0(\lambda) \left( \frac{R_{\odot}}{R} \right)^2 2\pi \int_0^1 f(\mu, \lambda) \mu d\mu, \quad (\text{A.228})$$

mit  $I_0$  der Strahlung im Zentrum der Scheibe,  $R_{\odot}$  ist der Radius der Sonne bei einer gegebenen Wellenlänge,  $R$  der Entfernung von der Sonne zum Radiometer und  $f(\mu, \lambda)$  ist die Zentrum-Rand Strahlungs-Variationsfunktion mit  $\mu = \cos \theta$  für  $\theta$  den Winkel gegenüberliegend dem emittierenden Strahlungselement der Oberfläche vom Zentrum der Sonnenscheibe. Die Zentrum-Rand (center-to-limb) Funktion  $f(\mu, \lambda)$  beschreibt Variationen der Strahlung über die Scheibe, hauptsächlich hervorgerufen durch Änderungen der Pfadlänge durch die Sonnenatmosphäre, aber ebenso durch Änderungen in der Winkelvariation der Strahlung. Die Rotationsachse der Sonne hat momentan eine Inklination von  $7^\circ$  relativ zur Ekliptik. Die spektrale Strahlungsvariation  $f(\lambda)$  erzeugt eine Nettoänderung in der Größe von  $0.1\%$  in der Gesamtstrahlung  $S$  während vergangener 11-jähriger Zyklen, superponiert sind größere Variationen von einigen Zehntel eines Prozentes auf kürzeren Zeitskalen. Veränderungen der UV Strahlung mit dem Ursprung in der oberen Photosphäre der Sonne variieren in der Amplitude mit einer Größenordnung stärker als die Gesamtstrahlung, sie stammt von tieferen photosphärischen Schichten. Evident im UV Spektrum, wie für die Gesamtstrahlung, sind (i) Variationen im Zusammenhang mit der 27-tägigen Rotationsperiode der Sonne, (ii) monatliche und jährliche Fluktuationen und (iii) der markante 11-jährige Sonnenzyklus.

Die Standardwerte, verwendet zur Kalibration aktueller Modelle, sind: Radius  $R_{\odot} = 6.9599 \times 10^8 \text{ m}$ , Leuchtkraft  $L_{\odot} = 3.846 \times 10^{26} \text{ W}$ , entsprechend einer Solarkonstante von  $1367 \text{ W/m}^2$  bei 1 AU, Alter  $t_{\odot} = 4.65 \text{ Gy}$  und photosphärische Metallizität  $Z/X = 0.0245$  (siehe Tab. C.10).

Änderungen im Radius der Sonne würden Anzeichen von strukturellen Veränderungen sein, das Verhältnis  $W = (dL/L)/(dR/R)$  liefert wichtige Informationen über die Lage von Störungen innerhalb der Sonne welche zu solchen Variationen führen.

Das Spektrum der Sonnenstrahlung an der oberen Erdatmosphäre ist ein bestimmender Faktor für das Klima. Der Zustand der terrestrischen oberen Atmosphäre hängt wesentlich von der Sonnenstrahlung im EUV ab, welcher stark variiert, mit Faktoren von 2 Größenordnungen während des Sonnenzyklusses.

Die Sonne emittiert die Strahlung primär aus der Nähe der Sonnenoberfläche. Der überwiegende Anteil, etwas  $99\%$  der solaren Strahlung – im Wellenlängenbereich von  $275 - 4900 \text{ nm}$  – entspringt der Photosphäre mit einer Höhe weniger als  $\approx 525 \text{ km}$  und tieferen Schichten  $\approx -40 \text{ km}$ . Die Helligkeitstemperatur der ruhigen Sonnenoberfläche ist  $6520 \text{ K}$ , abnehmend auf  $\sim 4400 \text{ K}$  hin zur oberen Photosphäre. Danach fällt die Temperatur umgekehrt zur Höhe in die darüberliegende Chromosphäre mit Höhen von

$\approx 525 - 2100$  km. Höhe ist definiert als radiale Entfernung über der optischen Tiefe im Kontinuum bei  $500$  nm,  $\tau_{500} = 1$ . Über der Chromosphäre, im Übergangsbereich zur Korona, steigt die Temperatur auf einige Millionen Grad wenn die äußere Sonnenatmosphäre sich in die Heliosphäre ausdehnt. Die Intensität der höherenergetischen Strahlung bei kürzeren Wellenlängen ist gering und trägt nur mit einigen  $\text{mWm}^{-2}$  zur Gesamtstrahlung der Sonne mit  $\approx 1365 \text{ W/m}^2$  bei.

Das Spektrum der photosphärischen Strahlung ist bestimmt durch zahlreiche Merkmale. Absorption und Emission durch Gase in der Atmosphäre der Sonne – H, He, C, N, O, Mg, Al, Si, Ca und Fe in verschiedenen Ionisationsgraden – erzeugen spektrale Feinheiten mit Breiten typischerweise ein paar Dutzend pm. Zusätzlich zur Zusammensetzung ist die Temperatur der Sonnenatmosphäre der primär bestimmende Faktor des Sonnenspektrums.

Aus den Variationen der Strahlung können verschiedene Indizes zur Bestimmung der Sonnenaktivität abgeleitet werden. Einige gebräuchliche sind (i) der MgII Chromosphärische Index im Kern-Flügel Verhältnis des MgII Doublets bei  $280$  nm. Dieser Index bildet die Flußvariationen in der äquivalenten Breite der HeI Linie bei  $1083$  nm und im Zentrum der (ii) CaII K Emission bei  $393$  nm nach. Der (iii)  $10.7$  cm Radiofluß Korona Index, seine Fluktuationen reflektieren eine Kombination aus chromosphärischen (langzeitlichen) und koronalen (kurzzeitigen) Einflüssen, die (iv) Anzahl der Sonnenflecken (solar sunspot number, SSN), sie werden visuell bestimmt, eher ein numerischer als physikalischer Index, aber der längste verfügbare direkte Indikator für die Sonnenaktivität. Weiters gibt es Variationen im (v)  $\text{Ly}\alpha$  bei  $121.5$  nm (siehe Abb. 4.8) und im (vi) p-mode  $\Delta\nu$   $\mu\text{Hz}$  und (vii) das magnetische Feld der Sonne von offenen Feldlinien  $B_R$  in nT bei  $1$  AU.

Wie vorhin erwähnt, die TSI zeigt den markanten 11-jährigen Zyklus mit einer Spitze-Spitze Amplitude von  $0.085\%$ , größere Fluktuationen sind vorhanden und stehen in Zusammenhang mit der 27-tägigen Rotationsperiode der Sonne. Fouriertransformation (siehe ebenfalls Seite 234 ff.) der TSI Zeitreihe erzeugt ein Leistungsspektrum mit charakteristischen TSI Varianzen im Frequenzbereich. Der Einfluß des Sonnenzyklus ist offensichtlich im niederfrequenten Bereich. Weitere charakteristische Zeitskalen sind, abgesehen von den (i) 11 Jahren und (ii) 1 Jahren (iii) 5 minütige Peaks, die (iv) 27-tägige Rotationsperiode, (v<sub>1</sub>) Supergranulation, (v<sub>2</sub>) Mesogranulation und (v<sub>3</sub>) Granulation.

Die Sonnenstrahlung zeigt ausgeprägte wellenlängenabhängige Variabilität mit Amplituden und Zeitskalen welche in starker Beziehung zur Aktivität der Sonne stehen. Sonnenaktivität, ursprünglich beobachtet in den Sonnenflecken Mitte des 19. Jahrhunderts, hat ihren Ursprung im Zyklus des magnetischen Flusses getrieben durch den Dynamo im Sonneninneren bis zur Konvektionszone bei  $\approx 0.7 R_{\odot}$ . Während Zeiten hoher Sonnenaktivität durchzieht beträchtlich mehr magnetischer Fluß die Sonnenatmosphäre verglichen mit ruhigen Bedingungen im Solarminimum. Dieser magnetische Fluß erzeugt eine Fülle von Eigenschaften, z. B. (i) Sonnenflecken, (ii) Fackeln, (iii) Plages, (iv) koronale Löcher und regt zahlreiche solare Phänomene an, darunter (i) Fluktuationen in der Strahlung, (ii) Sonnenwind Variabilitäten, (iii) Flares und (iv) koronale Massenauswürfe.

Veränderungen in spezifischen magnetischen Eigenschaften, anders als im Netto- oder mittleren magnetischen Fluß der Scheibe, korrelieren besser mit Variabilitäten in der Strahlung. Magnetische Felder in der Sonnenatmosphäre erzeugen zumindest zwei massive Arten an signifikanten Variationen in der Sonnenstrahlung. (i) Sonnenflecken, sie sind kühler und dunkler als die umgebende Sonnenatmosphäre, offensichtlich erkennbar im roten Kontinuumbereich, (ii) Faculae, sie sind heißer, heller und primär beobachtbar am Rand von optischen Bildern. Die Ca K Aufnahmen zeigen die darüberliegenden chromosphärischen Pendanten, die (iii) Plages. Sonnenflecken und Faculae verringern bzw. erhöhen die lokale Sonnenstrahlung, damit wird die Nettostrahlung projiziert in Erdrichtung verändert, d. h. die Strahlungsdichte verändert sich. Nachdem Sonnenflecken und Faculae typischerweise zusammen auf der Sonne auftreten, ist ihre relative Stärke, welche stark wellenlängenabhängig ist, der bestimmende Faktor der Variabilität der Sonnenstrahlung (siehe ebenfalls ab Seite 149).

### A.2.3 Sonnenwind, interplanetarer Raum, Heliosphäre

Der kontinuierliche Plasmastrom von der Sonne ist bekannt unter der Bezeichnung Sonnenwind (solar wind), er wurde meßtechnisch erstmals 1961 nachgewiesen. Dreht man die zeitliche Richtung um, d. h. wird Akkretion betrachtet, dann etablierte bereits Hermann Bondi (1919 – 2005) im Jahr 1952 das Modell zur Beschreibung von Materietransport [Bondi, 1952]. Der Sonnenwind transportiert das Plas-

ma von der Sonne weg, u. a. auch zur Erde bzw. in Erdnähe. Es gab bereits frühe Vermutungen, daß von der Sonne ausgeschleudertes Plasma die Ursache für magnetische Stürme und die Form von Kometenschweifen ist, aber erst im Jahre 1958 konnte Eugene Newman Parker (1927–) die Umstände zur Entstehung des Sonnenwindes erklären. Parker etablierte die theoretische Basis für den Sonnenwind. Er zeigte, daß kein hydrostatisches Gleichgewicht zwischen der Sonnenkorona und dem interstellaren / interplanetaren Raum möglich ist. Dieses Nichtgleichgewicht ist die Ursache für den überschallschnellen Fluß geringer Dichte, den Sonnenwind. Der Sonnenwind besteht größtenteils aus Protonen und ist durchdrungen vom interplanetaren Magnetfeld (IMF), siehe Tab. A.8. Dieses magnetische Feld ist eingefroren ("frozen in") im radialen Fluß der Teilchen weg von der Sonnenoberfläche. Die Rotation der Sonne verursacht dabei eine spiralförmige Struktur des Magnetfeldes in radialer Richtung, eine Art "Rasensprengereffekt". In Plasmen werden schockartiger Zustandsänderungen auf relativ kleinen Distanzen gefunden, wesentlich kleiner als die freie Weglänge der Teilchen, siehe Seite 147 für eine Klassifikation der Diskontinuitäten. Das bekannteste Beispiel dafür ist die Bugstoßwelle der Erde ("Earth's bow shock"), erzeugt durch die Wechselwirkung des Sonnenwindes mit dem Erdmagnetfeld, siehe Abbildung A.15. Der Sonnenwind wird von Überschall- auf Unterschall-Geschwindigkeit in der Magnetosheath abgebremst. Der Schock hat eine Dicke von  $\sim 1000$  km, im Gegensatz dazu liegt die freie Weglänge bei einem Wert von 1 AU. Jeder Schock bei dem nicht-kollisionsbehaftete Prozesse eine Rolle spielen wird stoßfreier Schock ("collisionless shock") genannt. Das Wellenprofil eines stoßfreien Schocks ist für gewöhnlich ein Resultat der Balance zwischen konvektiven und dissipativen Effekten. Der Zustand des stoßbehafteten Plasmas ist bestimmt durch die Dichte, Geschwindigkeit des Flusses und der Temperatur. Die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie bedeuten, daß die Sprungbedingungen unabhängig von der Schockstruktur sind. In einem stoßfreien Schock gelten andere Kriterien. Sogar wenn des ungeschockte Plasma im Gleichgewichtszustand ist, also eine Maxwell'sche Geschwindigkeits-Verteilung hat, sind zuwenige Kollisionen um eine Maxwell'sche Verteilung im geschockten Plasma wieder herzustellen. Nach wie vor gilt Energie-, Impuls- und Massenerhaltung, der Endzustand des Plasmas kann im Allgemeinen nicht durch Dichte, Geschwindigkeit und Temperatur alleine dargestellt werden. Mathematisch gesehen formen die Momentengleichungen keine geschlossene Menge. Insbesondere werden erzeugte Anisotropien im Schock, in der Abwesenheit von Stößen, sogar in den Strukturen nach dem Schock fort dauern können. Ein nützlicher Aspekt davon ist die Möglichkeit der Beobachtung von Informationen bezüglich der Schockstruktur weit entfernt vom eigentlichen Schock. Um die Größe der Magnetosphäre zu bestimmen werden die Druckverhältnisse untersucht. Impulserhaltung in einer Plasmaröhre mit veränderlichem Querschnitt  $S$  liefert

$$(\rho u^2 + nkT + B^2/2\mu_0)S = \text{konstant}, \quad (\text{A.229})$$

dabei sind  $\rho$ ,  $u$ ,  $n$ ,  $T$  und  $B$  die Massendichte, Geschwindigkeit, Anzahl der Teilchen, Temperatur des Sonnenwindes und die magnetische Feldstärke. Damit ist es möglich mit dem dynamischen Druck des Sonnenwindes,  $\rho u^2$ , er dominiert den thermischen und magnetischen Druck vor der Bugstoßwelle, die Drücke im Magnetosheath zu berechnen, vorausgesetzt der Querschnitt des Strömungskanal  $S$  ist gegeben. Aus Gleichung A.229 ergeben sich folgende Relationen. Für den ersten und zweiten Term

$$\rho u^2/nkT = u^2/(kT/m_i) = \gamma u^2/c_s^2 = \gamma M_s^2, \quad (\text{A.230})$$

mit  $\gamma$  als politropischer Index,  $c_s$  der Schallgeschwindigkeit und  $M_s$  der sonischen Machzahl. Das Verhältnis des ersten und dritten Terms ergibt

$$\rho u^2/(B^2/2\mu_0) = 2u^2/(B^2/\mu_0\rho) = 2u^2/v_A^2 = 2M_A^2, \quad (\text{A.231})$$

mit  $M_A$  der Alfvén oder "intermediate" Machzahl und  $v_A$  der Alfvén Geschwindigkeit. Der Quotient des zweiten und dritten Terms liefert

$$nkT/(B^2/2\mu_0) = \beta = 2(M_A/M_s)^2/\gamma. \quad (\text{A.232})$$

In der Magnetosphäre dominiert der Druck des magnetischen Feldes. Er ergibt sich zu  $(aB_0/L_{mp}^3)^3$ , mit  $a$  einem formabhängigen Faktor (2.4 für die Form der Erdmagnetosphäre) und  $L_{mp}$  ist die Distanz zur Magnetopause gerechnet vom Erdmittelpunkt. Gleichsetzen des magnetischen Druckes mit dem dynamischen Druck des Sonnenwindes ergibt die "standoff distance"

$$L_{mp} = 107.4(n_{sw}u_{sw}^2)^{-1/6}, \quad (\text{A.233})$$

mit  $n_{sw}$  der Anzahl der Protonen im Sonnenwind in  $\text{cm}^{-3}$ ,  $u_{sw}$  der Protonen Massengeschwindigkeit ("bulk velocity") in  $\text{km/s}$  und  $L_{mp}$  der Abstand in  $R_E$ . Der ruhige Sonnenwind erscheint als einfacher und quasi-stationärer Fluß, zumindest in höheren Breiten gemäß Resultaten der Mission Ulysses, mit poloidalen und toroidalen Magnetfeldkomponenten, abfallen mit  $\propto r^{-2}$ , bzw.  $r^{-1}$ . Im Unterschied dazu ist der äquatoriale Fluß auch durchsetzt von un stetigen koronalen Massenauswürfen. Astrophysikalisch betrachtet sind Supernovae hervorragende Objekte für das Studium von Teilchenbeschleunigungen in variierenden Magnetfeldern an Schockfronten und dienen als Brücke zwischen heliosphärischen in-situ Beobachtungen und hochenergetischen Vorgängen im Zusammenhang mit Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) und Ausbrüchen von Gammastrahlung (GRB, Bildung eines Schwarzen Lochs durch Kollaps eines massereichen Sterns). Ein markantes Beispiel ist GRB080319B bei  $z = 0.937$  ( $\approx 7.4 \times 10^9$  Jahre), zugleich wurden bei ihm die bis dato hellsten optischen- (mit freiem Auge sichtbar für  $\approx 40$  s, 3 Spitzen, Maximum 5.3 mag.) und Röntgen-Flüsse für einen GRB gemessen. Erklärbar ist die Beobachtung mit einem Modell aus 2 Jets. Die prompte  $\gamma$ -Emission stammt von internen Schocks im schmalen Jet, das Nachglühen ist Resultat von vor- und rückwärtigen Schocks sowohl vom schmalen als auch vom breiten Jet. Nicht-relativistische Schocks verhalten sich ziemlich unterschiedlich als relativistische Schocks. Beobachtete Abweichungen in den Spektren werden allerdings unterschiedlich interpretiert: als cut-off in der Verteilungsfunktion der Elektronen oder auch Abkühlung durch Strahlung und Absorption. Skalierungen in den Gl. A.234 und A.235 für Sonnenwind-Parameter mit  $r$  in astronomischen Einheiten (AU) sind gegeben durch

$$\{B_r, B_\varphi, |B|\} \sim \frac{5}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{1}{r^2}, \frac{1}{r}, \left( \frac{1}{r^4} + \frac{1}{r^2} \right)^{1/2} \right\} \text{ nT} \quad (\text{A.234})$$

$$\rho \sim 5 \frac{1}{r^2} \text{ cm}^{-3}, \quad v_A = \frac{|B|}{\sqrt{4\pi\rho}} \sim \frac{50}{\sqrt{2}} \left( 1 + \frac{1}{r^2} \right)^{1/2} \text{ km/s.} \quad (\text{A.235})$$

Charakteristische Sonnenwind Parameter mit der Haupt-Zusammensetzung aus  $\text{H}^+$  und  $\text{He}^{2+}$  bei Entfernungen von  $\{r, R_\odot\} = \{1, 215\}$  sind (i) Teilchendichte  $n_i = \{2 \cdot 10^{14}, 10 \cdot 10^6\} \text{ m}^{-3}$ , (ii) Ionentemperatur  $T_i = \{10^6, 10^5\} \text{ K}$ , (iii) Plasma Geschwindigkeit  $u = \{1, 400\} \text{ km/sec}$  und (iv) mag. Feld  $B = \{10^5, 5\} \text{ nT}$ .

### Pointing'scher Vektor Sonnenwind – Erde

Die Maxwell'schen Gleichungen in einem elektrisch neutralen Fluid mit einer Leitfähigkeit  $\sigma$  sind gegeben durch  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ,  $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ ,  $\nabla \times \vec{E} + \partial \vec{B} / \partial t = 0$  und  $(\nabla \times \vec{B}) / \mu_0 - \epsilon_0 (\partial \vec{E} / \partial t) = \sigma (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$ , mit  $\mu_0$  der Permeabilität und  $\epsilon_0$  der Permittivität des freien Raumes, sowie  $\vec{v}$  der Geschwindigkeit des Fluids. Betrachtet man das Limit mit unendlicher Leitfähigkeit, d. h.  $\sigma \rightarrow \infty$  erhält man  $\vec{E} = -(\vec{v} \times \vec{B})$ .

Der Fluß der elektromagnetischen Energie ist gegeben durch den Pointing'schen Vektor  $\vec{S} \equiv (1/\mu_0)(\vec{E} \times \vec{B})$ . Mit dem Ausdruck für  $\vec{E}$  erhält man  $\vec{S} = -(1/\mu_0)(\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}$ . Weiters gilt die Definition  $\vec{v}_n$  als Komponente von  $\vec{v}$  senkrecht zum Feld  $\vec{B}$ , bzw.  $\vec{v}_n \equiv -(1/|\vec{B}|^2)(\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}$ . Somit kann der Pointing'sche Vektor geschrieben werden als  $\vec{S} = \vec{v}_n |\vec{B}|^2 / \mu_0$ , d. h. die instantane Richtung des elektromagnetischen Energieflusses ist normal zum Feld  $\vec{B}$ .

Das IMF ist im radialen Plasmastrom "eingefroren" (Sonnenwind als ionisiertes, neutrales Fluid mit extrem hoher effektiver elektrischer Leitfähigkeit) und hat eine Größe von  $\sim 5$  nT am Erdorbit bei 1 AU. Nachdem die Sonne rotiert und die Geschwindigkeit des Plasmas  $\vec{v}$  im wesentlichen radial nach außen verläuft, ergibt sich ein Feld  $\vec{B}$  in der Ekliptik in der Form einer Archimedischen-(Parker)-Spirale. Am Erdorbit unter Normalbedingungen (Sonnenwind-Geschwindigkeit  $\sim 400$  km/s, siehe Tab. A.8) ergibt sich ein Winkel  $\theta$  für  $\vec{v}_n$  von  $\sim 45^\circ$  ( $\tan(\theta) = B_\varphi/B_r \approx 1$ , siehe Gl. A.234) mit Bezug zur Sonne-Erde Richtung (zum Vergleich: Merkur  $\sim 21^\circ/35$  nT oder Jupiter  $\sim 80^\circ/1$  nT). Der Betrag von  $\vec{v}_n$  ist  $|\vec{v}_n| = |\vec{v}| \cos(\theta) = 400 \cos(45^\circ) \approx 280$  km/s. Die Alfvén Geschwindigkeit (Gl. A.231)  $v_A \equiv |\vec{B}|(\mu_0\rho)^{-1/2} \approx 35$  km/s, mit  $|\vec{B}| = 5$  nT, einer Teilchendichte  $\sim 10^7 \text{ m}^{-3}$  und  $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$  kg Protonenmasse. Der Sonnenwind entspricht einem MHD Schock, der Pointing-Vektor hat einen Betrag von  $|\vec{S}| = |\vec{v}_n|(|\vec{B}|^2/\mu_0) \approx (280 \times 10^3)(5 \times 10^{-9})^2/\mu_0 \approx 5.6 \mu\text{W/m}^2$ . In Relation zur Solarkonstante  $1365 \text{ W/m}^2$  (Kap. A.2.2) ergibt sich  $5.6 \times 10^{-6}/1365 \approx 4 \times 10^{-9}$ , also minimal.

	Langsamer Wind (LSM)	Schneller Wind (HSS)
Geschwindigkeit $v_p$	250 - 400 km/s	400 - 800 km/s
Protonendichte $n_p$	$10.7 \text{ cm}^{-3}$	$3 \text{ cm}^{-3}$
Protonen Flußdichte $n_p v_p$	$3.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Protonentemperatur $T_p$	$3.4 \times 10^4 \text{ K}$	$2.3 \times 10^5 \text{ K}$
Elektronentemperatur $T_e$	$1.3 \times 10^5 \text{ K}$	$1 \times 10^5 \text{ K}$
Impuls Flußdichte	$2.12 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$	$2.26 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$
Gesamt-Energiedichte	$1.55 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$	$1.43 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$
Heliumanteil $n_\alpha/n_p$	2.5 %, variabel	3.6 %, stationär

**Tabelle A.8:** Mittlere Sonnenwind Parameter bei 1 AU für Zeiten minimaler Sonnenaktivität.

### Interplanetare Szintillation

Der Sonnenwind bewirkt Inhomogenitäten im interplanetaren Plasma. Diese wirken auf Radiowellen aus dem Weltall wie Turbulenzelemente in der irdischen Atmosphäre auf sichtbares Licht. Szintillationen sind rasche Refraktionsänderung durch Turbulenz, es wird unterschieden zwischen Richtungs- und Helligkeits-Szintillationen. Zur Vermeidung oder Minderung von Fading- oder Szintillations-Effekten im Zusammenhang mit adaptiven Modulationen und Kodierungen siehe [Eichelberger et al., 2008]. Pulsare werden ebenfalls verwendet zur Messung der interplanetaren Szintillation von Radioquellen. Anzumerken ist, daß ähnlich wie bei weißen Zwergen auch bei Neutronensternen der Radius  $R$  des Objektes mit wachsender Masse abnimmt.

### Arten des Sonnenwindes

In der gegenwärtigen Charakterisierung gibt es vier verschiedene Arten des Sonnenwindes: (i) der schnelle Sonnenwind in Strömungen mit hoher Geschwindigkeit aus koronalen Löchern (CH), (ii) der langsame Sonnenwind der inaktiven Sonne mit dem Ursprung in der Nähe der globalen heliosphärischen Stromschicht über "Helmet streamern" und darunterliegenden aktiven Regionen, (iii) der langsame Sonnenwind der einen großen Bereich der Heliosphäre während hoher Sonnenaktivität füllt, mit Ursprung über aktiven Regionen in einem hochturbulenten Zustand und (iv) das Plasma von koronalen Massenauswürfen (CMEs). Die beiden grundlegenden Zustände des Sonnenwindes sind Hochgeschwindigkeitsströme (high-speed streams, HSS) und Winde mit niedriger Geschwindigkeit aus Zeiten minimaler Aktivität (low-speed minimum, LSM).

Weitere markante Unterschiede zwischen LSM und HSM sind folgende: (i) die gemessene Quelltemperatur der Korona, abgeleitet aus  $O^{7+}/O^{6+}$  Verhältnissen, beträgt für den HSS  $1.2 \times 10^6 \text{ K}$  verglichen mit Werten von  $1.7 \times 10^6 \text{ K}$  für LSM, (ii) das erste Ionisationspotential (first ionization potential, FIP Effekt) ist wesentlich geringer im LSM, dargestellt im Verhältnis von Mg/O, (iii) die Protonentemperatur im langsamen Sonnenwind fällt mit der Distanz von der Sonne mit  $R^{-1.21}$ , was man für adiabatische Expansion erwarten würde und (iv) der schnelle Sonnenwind kühlt sich gemäß  $R^{-0.69}$ , ein Indiz für beträchtlichen zusätzlichen Wärmeeintrag im interplanetaren Raum.

Der schnelle Sonnenwind im HSS von koronalen Löchern ist eine Erscheinung der inaktiven Sonne, seine Endgeschwindigkeit, Dichte, der Heliumanteil und weitere Merkmale sind bemerkenswert stabil und variieren nur minimal. Der schnelle Sonnenwind beginnt in der Korona zu fließen bei Höhen zwischen 5000 – 20000 km über der Photosphäre mit einer Ursprungsgeschwindigkeit von 10 km/s.

Streamer und Grenzgebiete zwischen Streamern werden als plausibelste Quellen für den langsamen Sonnenwind angesehen, Details sind allerdings unklar. Zu Zeiten minimaler Sonnenaktivität umschließt für gewöhnlich ein "Streamerbelt" die Sonne. Er kapselt die verbleibenden Sonnenflecken und Aktivitätszentren. Er enthält ebenfalls die gekrümmte magnetische Neutralschicht, sie trennt den globalen magnetischen Dipol in zwei Hälften und kann als heliosphärischer Äquator betrachtet werden. Dort entspringt ebenfalls die heliosphärische Stromschicht, sie rotiert mit der Sonne und dehnt sich in der ganzen Heliosphäre aus – das Ballerina-Modell der Sonne. Der "Streamerbelt" ist die Quellregion des LSM, er füllt einen Breitenbereich von  $\pm 15^\circ$  rund um die heliosphärische Stromschicht. Die LSM Region wird begrenzt vom HSS

aus den großen koronalen Löchern, separiert durch sehr scharfe Grenzschichten. In dieser Phase niedriger solarer Aktivität sind helle, geschlossene, schleifenartige Systeme fast permanent präsent – zentriert bei Breiten von  $30^\circ - 45^\circ$  in beiden Hemisphären. Es ist eine signifikante inverse Korrelation zwischen der Expansion magnetischer Flußröhren und der Geschwindigkeit des Sonnenwindes bei 1 AU. Das LSM Profil ist konsistent mit isothermaler Expansion bei einer Temperatur von  $1.1 \times 10^6$  K und einem Alfvénpunkt bei  $5 R_s$ , gleichzeitig in guter Übereinstimmung mit dem Modell von Parker aus dem Jahr 1958.

Die Rotation der Sonne zeigt einige bemerkenswerte Effekte, aus Beobachtungen von Sonnenflecken ist die differentielle Rotation der Photosphäre seit langem bekannt. Allerdings zeigt sich, daß die darüberliegende Korona und mit ihr alle darin eingebetteten Strömungsmuster eine feste Rotation haben. Die koronale Rotation beträgt 27.2 Tage (synodische Periode) und ist damit sehr nahe der äquatorialen photosphärischen Rate und der Periode des Sonnenkerns. Anders ausgedrückt: Das heliosphärische Strömungsmuster inklusive der HSS von hohen Breiten erscheint verbunden mit der äquatorialen Photosphäre oder mit dem Kern! Es besteht ein beträchtlicher Unterschied zwischen der starren Rotation von z. B. koronalen Löchern mit ihren offenen Feldlinien und der differentiellen Rotation der Photosphäre.

Der langsame Sonnenwind sättigt einen Großteil der Heliosphäre während hoher Sonnenaktivität (LSA) und wird deshalb als eigene Kategorie betrachtet. Er entspringt oberhalb aktiver Regionen verteilt über große Teile der Sonne, möglicherweise weit weg von jeder heliosphärischen Stromschicht. Sogar in hohen Breiten ist langsamer Sonnenwind vorherrschend, in starkem Gegensatz zu Zeiten minimaler Aktivität. Der größte Unterschied zwischen den beiden Typen langsamer Sonnenwinde besteht allerdings im jeweiligen Heliumanteil, von 2.5 % bei Solarminimum bis 4 % bei Maximum.

Trotz alledem, es ist bei weitem nicht eindeutig wie die langsamen Sonnenwinde entstehen können, da sie offensichtlich aus koronalen Bereichen entspringen in denen geschlossene Magnetfeldtopologien in den darunterliegenden Bereichen vorliegen. Der Übergang zur offenen Topologie, notwendig um Plasmafluß weg von der Sonne zu ermöglichen, benötigt eine Art von magnetischer Rekonnektion, sei es ein stationärer oder transients Prozeß. Und wie bekannt, zu bestimmten Zeiten erschüttern gigantische Explosionen (Flares, CMEs, prominence Eruptionen) die Atmosphäre der Sonne.

**Koronale Massenauswürfe – CMEs** Die Darstellungen und Statistiken in diesem Abschnitt basieren auf [Gopalswamy et al., 2008], aktualisierte SOHO Statistiken sind online verfügbar, erinnert sei ebenfalls an die enge Verknüpfung von SOHO mit Cluster, siehe Kap. A.4.1. CME Eigenschaften wie (i) Geschwindigkeit, (ii) Breite und (iii) solarer Längengrad der Quellregion bestimmen ob CMEs in Zusammenhang mit Type II Radioausbrüchen und Solaren Energetischen Teilchen (SEP) Ereignissen stehen. Im Wesentlichen sind alle Type II Bursts im Dekameter-Hektometer (DH) Wellenlängenbereich mit SEP Ereignissen in Verbindung wenn die Quellregion auf der Sonne entsprechend in Betracht gezogen wird. Das ist ein wesentliches Ergebnis für Weltraum-Wetter Anwendungen (Seite 176), wenn nämlich CMEs ihren Ursprung in der westlichen Sonnenhemisphäre haben und mit DH Type II Bursts in Verbindung gebracht werden können, dann wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ein SEP Ereignis verursacht. CMEs in Zusammenhang mit Type II Radioausbrüchen sind im Mittel energetischer und es gibt eine hierarchische Beziehung zwischen der kinetischen Energie von CMEs und dem Wellenlängenbereich von Type II Radiobursts. CME getriebene Schocks beschleunigen sowohl Ionen als auch Elektronen, die Breite der CME  $W$  ist statistisch in Bezug zur Masse  $M$  über die Relation  $\log M = 12.6 + 1.3 \log W$ , somit resultiert  $W = 60^\circ$  mit einer Masse von  $8.2 \times 10^{14}$  g. Type II Bursts im Zusammenhang mit CMEs sind Indikatoren für Teilchen-Beschleunigung. Verwendet man die Geschwindigkeits- und Breiten-Kriterien (Geschwindigkeit  $\geq 900$  km/s und Breite  $\geq 60^\circ$ ), dann wurden im Zeitraum 1996 – 2005, siehe nachstehende Statistik, eine Anzahl von  $\sim 500$  fast and wide (FW) CMEs identifiziert.

$$\text{CMEs} \begin{cases} \text{FW, 5 \%} \\ \text{andere, 95 \%} \end{cases} \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \text{RQ radioleise} \\ \text{RL radiolaut 50 \% SEP} \end{array} \right. \\ \dots \end{cases} \begin{array}{l} \sim 500 \text{ FW CMEs} \\ \text{alle CMEs} \gtrsim 10000 \text{ (1996 – 2005)} \end{array}$$

Diese FW CMEs sind lediglich 5 % aller CMEs ( $\gtrsim 10000$ ) bestimmt von SOHO-LASCO und sie unterteilen sich in 40 % radioleise (radio-quiet, RQ, d. h. keine Type II Bursts im Meter und DH Wellenlängenbereich) und 60 % radiolaut (radio-loud, RL) CMEs. Es sind keine großen SEP Ereignisse in Zusammenhang mit RQ CMEs, bei der Hälfte aller RL CMEs treten solche auf. SEPs in Verbindung mit CMEs

haben ihren Ursprung meist in der westlichen Hemisphäre, der Grund liegt in der notwendigen magnetischen Verbindung zwischen dem Beobachter in Erdnähe und der SEP Quellregion. CMEs in Verbindung mit DH Type II Bursts haben den Ursprung in beiden Hemisphären. Das erklärt warum nur die Hälfte aller CMEs in Zusammenhang mit Type II Bursts auch die Verbindung zu SEP Events zeigen. Die koronale Alfvén Geschwindigkeit kann je nach Ereignis im Bereich von  $< 200$  km/s bis  $1600$  km/s variieren. CMEs erzeugen Type II Radiobursts und SEPs durch den gemeinsamen Prozeß von Teilchenbeschleunigung an schnellen (fast mode) MHD Schocks. CMEs können sich durch die Korona und das interplanetare Medium ausbreiten wenn die Alfvén Geschwindigkeit relativ hoch, die Abwesenheit eines Schocks impliziert eine Alfvén Geschwindigkeit von zumindest  $1600$  km/s. CMEs sind Quellen des Sonnenwindes, sie verursachen gigantische Plasmawolken von der Sonne. Mehr als die Hälfte aller CMEs haben eine dreiteilige Struktur: eine helle Schleife, nachfolgend eine dunkle Lücke and danach einen strahlenden Kern, oftmals mit beträchtlicher Feinstruktur. (i) Stufenartige (gradual) CMEs mit einer ballonartigen Form beschleunigen langsam und über große Distanzen bis zu Geschwindigkeiten von  $300 - 600$  km/s, (ii) impulsartige CMEs, sehr oft mit Flares im Zusammenhang, beschleunigen bis zu extremen Geschwindigkeiten, manchmal mehr als  $2000$  km/s. Die schnellen CMEs verursachen oftmals großräumige Dichtewellen die sich eventuell zu kollisionsfreien Schockwellen aufteilen. Die Schockfront ist die äußere Grenze der Plasmahülle resultierend aus Kompression, Ablenkung und Aufheizung des umgebenden Sonnenwindes durch das darauffolgende Auswurfmaterial. Die Frontwelle kann beträchtliche Störungen und Verzerrungen des IMF durch das nachströmende Auswurfmaterial verursachen. Letztendlich entsteht ein ICME (Interplanetary counterpart of CMEs) Ereignis, oftmals beobachtet durch in-situ Messungen von interplanetaren Proben. Das Auswurfmaterial selbst, manchmal bezeichnet als "piston gas" oder "driver gas", ist meist getrennt vom Hüllenplasma durch eine tangentielle Diskontinuität (TD). Der sehr unterschiedliche Ursprung ist erkennbar aus der unterschiedlichen Zusammensetzung, dem Ionisationszustand, Temperaturabfall, Abnahme der kosmischen Strahlung ("Forbush decreases"), dem Auftreten von bidirektionalen Verteilungen von energetischen Protonen und kosmischer Strahlung sowie suprathemalen Elektronen. In vielen Auswurfmaterialien wird ein großes Übergewicht an Heliumanteil beobachtet, bis zu  $30\%$ , d. h. dies ist ein Indikator dafür, daß dieses Material aus tieferen Schichten der Sonnenatmosphäre stammt, aus Bereichen in denen durch dynamische Akkumulation und gravitative Schichtung substantielle Anreicherung von schwereren Ionen erfolgt. Zusätzlich gibt es eine Klasse von sehr langsamen CMEs mit ballonartiger Ablöse im Gegensatz zu schneller projektilartiger Beschleunigung.

Die meisten der ICME Merkmale sind in den Messungen sichtbar, z. B. das Vorbeiziehen von magnetischen Wolken (magnetic clouds) mit ihrer charakteristischen Änderung in der Feldrichtung im Sinne eines magnetischen Flußseiles (flux rope) verbunden mit gleichzeitigem Auftreten von gegensinnig strömenden, bidirektionalen suprathemalen Elektronen. Die komprimierte Plasmahülle hinter dem Schock und das Auswurfmaterial können beträchtliche Abweichungen der Richtung des magnetischen Feldes von der Parker-Spirale verursachen, darunter starke Komponenten in Richtung weg von der Ekliptik. Diese Erscheinungen sind die Hauptursachen die zu solar-terrestrischen Effekten führen, siehe Kap. A.2.5.

Eine der offensichtlichsten Erscheinungsformen des solaren Aktivitätszyklusses ist sicherlich das dramatische schrumpfen, verschwinden und wiedererscheinen der polaren koronalen Löcher von einem Minimum zum Nächsten. Die Gesamtfläche der koronalen Löcher ist demzufolge am niedrigsten zu Zeiten maximaler Sonnenaktivität. Der Gesamtmenge des magnetischen Flußes auf der Sonne steigt um einen Faktor 3, das IMF hingegen nur um  $40\%$ . Mit steigender Aktivität wachsen die Verwindungen im "Ballernakleid", brechen auf und drehen sich um bei Aktivitätsmaximum. Man würde erwarten, daß beträchtliche Veränderungen der mittleren Sonnenwindparameter mit dem Zyklus einhergehen, was allerdings nicht der Fall ist, zumindest nicht für die Ebene der Ekliptik. Es sind nur kleinere Variationen vernehmbar, z. B. verringerte sich die mittlere Geschwindigkeit von  $500$  km/s im Jahr 1975 auf  $400$  km/s im Jahr 1980 aufgrund des Verschwindens der großen Hochgeschwindigkeits-Strömungen vom Minimum zum Maximum. Andere Größen, wie Teilchendichten, Masse, Impuls und Energiefluß sind nicht stärker als zu  $20\%$  moduliert. Sie erreichen ihr Minimum zu Zeiten maximaler Sonnenaktivität, unabhängig von den zahlreicheren CMEs und Schockereignissen! Außerhalb der Ekliptik und speziell bei sehr hohen solaren Breiten ist die Situation völlig unterschiedlich. Bei Solarminimum ist nur der schnelle Sonnenwind charakterisiert durch seine Geschwindigkeit und kleine Dichte vorhanden. Die Häufigkeit von CMEs ist  $\sim 3$  pro Tag am Aktivitätsmaximum und verringert sich auf  $1/10$  dieses Wertes bei Solarminimum.

## Heliosphäre

Der Heliosheath – die äußerste Schicht der Heliosphäre – beginnt dort, wo der Sonnenwind, er expandiert mit Überschallgeschwindigkeit, auf die interstellare Materie trifft, abrupt abgebremst wird und eine Schockwelle entsteht. Dieser Schock expandiert vs. kontrahiert mit der Veränderung des Sonnenwinddrucks entsprechend dem 11-jährigen Zyklus. Voyager1 kreuzte ihn bei  $\sim 95$  AU heliozentrischer Entfernung im Dezember 2004. Voyager1 lieferte in-situ Daten dieser Region, genannt Terminierungsschock (termination shock, TS), zusammen mit Effekten auf die kosmische Strahlung, das solare magnetische Feld, sowie Teilchen- und Plasmapopulationen im Heliosheath. Im Mittel ist der Sonnenwind konstant bis zu  $\sim 30$  AU, danach beginnt er langsam abzunehmen aufgrund vom "pickup" interstellarer Neutralteilchen mit einer Reduktion in der Geschwindigkeit von  $\sim 20\%$  bis zum TS. Die Pickup-Ionen erhitzen das thermische Plasma, die Temperatur des Sonnenwindes steigt außerhalb von  $20 - 30$  AU. Effekte des Sonnenzyklusses verändern den Sonnenwind-Druck um einen Faktor  $\sim 2$ , die Struktur des Windes ist modifiziert durch ICMEs zu Zeiten von Solarmaxima. Trotz der zahlreichen Variationen im Sonnenwind ergeben sich in erster Ordnung (i) eine konstante Geschwindigkeit  $v \sim 400$  km/s, (ii) ein Dichteabfall mit  $R^{-2}$ ,  $N \sim 6$  cm $^{-3}$  und dynamischer Druck  $P \sim 2$  nP, (iii) ein Temperaturabfall bis  $20 - 25$  AU,  $T \sim 10^5$  K und danach ein Anstieg. Das vergangene Solarminimum hatte einen geringeren dynamische Sonnenwind-Druck verglichen mit den zwei Zyklen davor.

**Schockstruktur** Der Sonnenwind ist ein überschallschneller Fluß von Teilchen und ein Schock – der Terminierungsschock – ist notwendig um den Sonnenwind abzubremsen und eine Verschmelzung mit dem lokalen interstellaren Medium – es begrenzt des Sonnensystem – einzugehen. Außerhalb des Terminierungsschocks ist die eigentliche Grenzschicht zwischen dem Sonnenwind und dem interstellaren Medium – die Heliopause. Noch weiter entfernt, wenn sich das Sonnensystem selbst mit überschallschneller Geschwindigkeit relativ zum interstellaren Raum bewegt, befindet sich eine weitere große Bugstoßwelle. Die magnetische Feldstärke steigt infolge der Kompression am Schock.

**Anomale kosmische Strahlung, ACR** In den frühen 70ern wurde eine neue Komponente der kosmischen Strahlung bei Energien von 10 MeV/Nukleon entdeckt. Dieser Anteil, bezeichnet als anomale kosmische Strahlung (anomalous cosmic rays, ACRs), hat eine ungewöhnliche Zusammensetzung: Ursprünglich wurden nur He, N, O beobachtet und keine anderen Elemente, möglicherweise sind aber auch H, Ne und Ar vorhanden. ACRs haben den Ursprung als interstellares Neutralgas, daß durch das Sonnensystem strömt, ionisiert wird und anschließend im Sonnenwind beschleunigt. Der TS wurde lange Zeit als Ort für diese Beschleunigung angesehen. Er sollte ein zugängliches (in-situ) Beispiel für Beschleunigungen von energetischen Teilchen an Schockfronten sein, ganz analog der Beschleunigung an Supernova Schockfronten als postulierte Quelle für galaktische kosmische Strahlung (GCRs). Allerdings wurde am Ort des TS von Voyager1 kein Nachweis der Beschleunigung der traditionellen ACRs gefunden. Das Spektrum der ACRs ändert sich nicht beim Durchflug durch den Schock, es ist keine Intensitätszunahme erkennbar. Niederenergetische Ionen  $< 3$  MeV/Nukleon werden klar erkennbar abrupt beschleunigt, die höherenergetischen ACRs, welche seit Jahrzehnten beobachtet werden, bleiben vom TS unberührt.

**Terminierungsschock** Der Terminierungsschock ist somit eine stetige Quelle von niederenergetischen Protonen mit einem Energiespektrum  $\sim E^{-1.41 \pm 0.15}$  von  $0.5 - \sim 3.5$  MeV, in Übereinstimmung mit einem schwachen TS mit einem Sonnenwind Sprungverhältnis  $r = 2.6_{-0.2}^{+0.4}$ . Jedoch zeigt, im Gegensatz zu vielen Vorhersagen, die Intensität von He der ACR kein Maximum am Schock. Das deutet darauf hin, daß die Quelle der ACRs nicht im Schock nahe bei Voyager1 liegt. Der Terminierungsschock zeigt den abrupten Übergang vom überschallschnellen Sonnenwind beim Kontakt zum interstellaren Wind. In der Heliosheath Region nach dem Schock ist der Wind langsamer, heißer und dichter wenn er mit der umgebenden interstellaren Materie in Wechselwirkung tritt. Der Terminierungsschock ist die vorhergesagte Quelle der anomalen kosmischen Strahlung (ACRs), sie hat ihren Ursprung in interstellaren neutralen Atomen die nahe zur Sonne driften, ionisiert werden und vom Sonnenwind in den Außenbereich mitgenommen werden wo sie an der Schockfront beschleunigt werden. Wenn sich der Druck des Sonnenwindes verringert bewegt sich die Schockfront Richtung Sonne, V1 wurde bei 94 AU am Tag 351 von 2004 (2004/351)

überstrichen. Das gemessene höhere magnetische Feld seit dieser Zeit ist der Schlüsselindikator dafür, daß V1 in die Heliosheath eingetreten ist. Aufgrund der höheren magnetischen Turbulenz im Heliosheath werden Teilchen vom Terminierungsschock (termination shock particles, TSPs) öfters gestreut, resultierend in einer verminderten Anisotropie. Im Terminierungsschock hat man die Quelle für ACRs vermutet. Wenngleich die ACR Quelle möglicherweise der Schock ist, die Quellregion ist von derjenigen von V1 entfernt. Allerdings könnte auch eine fundamentale Änderung im Modell für ACR Beschleunigung notwendig sein. Die Beziehung zwischen ACRs und TSPs ist unbekannt. Beide Populationen sind an C-Ionen vermindert, das deutet darauf hin, daß sie beschleunigte Pickup-Ionen sind und läßt vermuten, daß TSPs in einer zweiten Beschleunigungsstufe zu ACRs werden. Zwei andere markante Merkmale der mit dem Sonnenwind strömenden TSP sind (i) die Zunahme von relativistischen 6 – 14 MeV Elektronen und (ii) die starke Modulation der Ionen und Elektronen durch transiente Störungen die sich in das interplanetare Medium nach außen bewegen. Diese großräumigen Störungen, bekannt als merged interaction regions (MIRs), stammen aus Zeiten des Aktivitätszyklusses der Sonne und entwickeln sich im interplanetaren Raum durch das Zusammenfließen von mehreren interplanetaren koronalen Massenauswürfen und Sonnenwind Perioden mit hoher Geschwindigkeit (Zunahme in der Geschwindigkeit des Sonnenwindes, der Intensität von MeV Ionen, stärkeres IMF, moderate Abnahme in der GCR Intensität). Sowohl bei V1 als auch bei V2 legt die stetige Zunahme der GCR Intensität beginnend im späten Jahre 2004 nahe, daß die abnehmende solare Modulation wenn die Sonnenaktivität sich vermindert. V1 hat Vorläufer an energetischen Ionen und Elektronen vom heliosphärischen TS mit zunehmender Intensität der Teilchen bei tieferem Eindringen in den energetischen Teilchen Vorschock des TS gemessen. Der radiale Sonnenwind Fluß war positiv (nach außen gerichtet) mit  $\sim +100$  km/s von 2004/352 – 2005/018, danach wurde er vorwiegend negativ (Richtung Sonne) und variierte zwischen  $\sim -50 - 0$  km/s bis 2005/110. Danach wurde er positiver mit Werten (2005/179) von  $\sim +50$  km/s. Das energiereiche Protonenspektrum, gemittelt über die Postschock-Periode ist dominiert durch stark erhitzte interstellare Pickup-Ionen.

Der TS ist erwartungsgemäß ein umgekehrter, quasi-senkrechter, stoßfreier Schock an dem die Geschwindigkeit des Sonnenwindes von Über- auf Unterschall vermindert wird, das Sonnenwindplasma wird komprimiert und erhitzt, die Stärke des magnetischen Feldes nimmt zu. Es wurde erwartet, daß Teilchen am oder / und in der Nähe des TS beschleunigt werden. Im Vorschock-Bereich ist  $V_R$  relativ niedrig, typischerweise innerhalb von 100 – 300 km/s. Die Messung der Reduktion der Geschwindigkeit kann interpretiert werden als stetige Abnahme der Geschwindigkeit des Plasmastromes mit abnehmender Distanz zum TS. V1 querte den TS am 2004/251, offenkundig als der TS sich radial nach innen Richtung Sonne bewegte als Reaktion auf den abnehmenden Sonnenwinddruck. ACR hat ihren Ursprung in interstellaren neutralen Atomen, z. B. H, He oder O. Sie werden ionisiert und durch den Sonnenwind zum TS transportiert, dort – nahe der post-TS Region – beschleunigt auf  $\sim 1 - 100$  MeV/Nukleon.

**Elektron Plasma Oszillationen** Elektron Plasma Oszillationen (Langmuir Wellen) sind elektrostatische Oszillationen mit einer charakteristischen Frequenz, der Elektron Plasma Frequenz  $f_p = 8980\sqrt{n_e}$  in Hz, mit  $n_e$  als Elektronendichte in  $\text{cm}^{-3}$ . Elektron Plasma Oszillationen werden erzeugt wenn die Verteilung der Elektronengeschwindigkeit einen Bereich mit positiver Steigung hat,  $\partial f / \partial v_{\parallel} > 0$ . Wenn dieser Bereich der positiven Steigung bei Geschwindigkeiten über der thermischen Elektronengeschwindigkeit liegt ergibt sich ein Beam. Elektron Plasma Oszillationen können einfach durch ihre burstartige, schmalbandige Charakteristik identifiziert werden, für gewöhnlich eine Emission in einem Kanal um oder nahe bei der Elektron Plasma Frequenz. In guter Näherung ist die Elektron Plasma Frequenz im Sonnenwind gegeben durch  $f_p = 25000/R$ , mit  $R$  als heliozentrische radiale Distanz in AU. Vor dem Durchflug der S/C durch den TS gibt es ein Gebiet in dem das magnetische Feld tangential zur Oberfläche des Schocks ist. Diese Interpretation ist in Übereinstimmung mit Messungen im Vorschockgebiet der Bugstoßwelle der Erde. Dort zeigt sich, daß die höchsten Beamenergien in der Nähe zu tangentialen Feldlinien erzeugt werden, zugleich die Region der Elektron Plasma Oszillationen mit der höchsten Intensität.

Die Grenze des Elektron Vorschock Gebietes stromaufwärts wird bestimmt durch magnetische Feldlinien tangential zur Nase des Schocks. Eine Abschätzung der Kompressionsrate der magnetischen Feldstärke  $B$  ( $\pm$  Standardabweichung vom Mittelwert) über den Schock ist  $B_2/B_1 = 3.05 \pm 0.04$ , Verhältnisse im Bereich von 2 – 4 sind akzeptabel. Der Mittelwert von  $B$  im Heliosheath von Tag 1 – 110 im Jahre 2005 war  $0.136 \pm 0.035$  nT, das  $\sim 4.2$  fache vorhergesagt durch Parker's Modell für  $B$ . Das magnetische Feld

im Heliosheath von Tag 2004/361 bis 2005/110 zeigte in der Richtung von der Sonne weg entlang der Parkerspirale. Die Wahrscheinlichkeits-Verteilung von stündlichen Mittelwerten von  $B$  im Heliosheath ist Gauß'scher Natur. Die Intensität der kosmischen Strahlung im Heliosheath stieg wenn  $B$  relativ groß war.

**Voyager Magnetfeldexperiment** Das Magnetfeld-Instrument auf V1 hat zwei identische triaxiale Sensoren montiert auf einem 13 m langen Ausleger. Der Ausgang eines jeden Magnetfeldsensors hat eine Digitalisierungsstufe von 0.004 nT, das primäre Sensorrauschen ist  $\approx 0.003$  nT rms. Die  $1\sigma$  Unsicherheit im Zusammenhang mit täglichen Mittelwerten von  $B$  ist typischerweise  $\pm 0.015$  nT.

Das mittlere  $B$  von 2004/357 bis 2004/479 relativ zum Anfang von 2004 ist  $\langle B_2 \rangle = 0.136 \pm 0.035$  nT, somit 2.4 mal so groß wie der Mittelwert  $\langle B_1 \rangle = 0.056 \pm 0.025$  nT für 2005/001 bis 2005/110. Der Mittelwert  $B$  am 2004/350 war  $\langle B_1 \rangle \approx 0.031 \pm 0.007$  nT, nahe dem vorhergesagten Wert aus Parker's Modell ( $\approx 0.03$ ) nT. Die Fluktuationen in  $B$  hinter dem TS von 2004/352 bis 2004/366 sind groß auf Skalen von mehreren Stunden bis Tagen. Die Verteilung von Stundenmittelwerten von  $B$  im Heliosheath von 2005/001 bis 2005/110 ist sehr gut beschrieben durch eine Gauß'sche Verteilung (verbunden mit einer Thermalisierung des Plasmas durch den TS; das Plasma erreicht das statistische Gleichgewicht), im starken Gegensatz dazu eine lognormal Verteilung als Charakteristikum des überschallschnellen Sonnenwindes.

Insgesamt sind 11 Instrumente auf Voyager, darunter auch das Infrarot Interferometer Spectrometer (IRIS) mit dem Principal Investigator Rudolf A. Hanel, zufälligerweise also die gleiche Anzahl an Instrumenten wie bei Cluster; zusätzlich gibt es den "Golden Record" mit Bildern und Audioaufnahmen.

**Voyager V1 / V2 Vergleich** V1 erreichte den TS bei 94 AU (16. Dez 2004), heliographische Breite  $34.3^\circ$  (Nord), heliographische Länge  $173^\circ$ , (Vorschock-Region ab 85 AU) und V2 hatte mindestens 5 Durchquerungen des TS bei 83.65 AU (30. Aug 2007, Tage 242 – 244), heliographische Breite  $-27.5^\circ$  (S), heliographische Länge  $216^\circ$  (Vorschock-Region seit 75 AU). Damit ergibt sich  $\sim 45^\circ$  Entfernung in heliographischer Länge und eine Separation von  $\sim 110$  AU.

Die Heliosphäre ist asymmetrisch, d. h. in Richtung von V2 relativ zu V1 nach innen gedrückt. Diese laterale Asymmetrie, d. h. somit Abweichung in einer Richtung, ist möglicherweise verursacht durch den Druck des lokal inklinierten interstellaren magnetischen Feldes. Der Interstellar Boundary Explorer (IBEX) Satellit wird erstmals eine globale Untersuchung des Heliosheath mit Hilfe energetischer Neutralteilchen (energetic neutral atoms, ENA's) ermöglichen.

Der thermische Druck ist gegeben durch  $P_T = nkT$ , der skalare Druck des magnetischen Feldes beträgt  $P_B = B^2/(8\pi)$ . Die mittlere magnetische Feldstärke im Heliosheath beträgt  $B_1 = 0.123 \pm 0.035$  nT gemessen mit V1. V2 fand nicht die Quellgebiete der ACR im Schockgebiet, damit liegt die Vermutung nahe, daß sie entweder (i) anderswo im Schock sind oder (ii) im Heliosheath liegen. V2/TS-3 hat eine Struktur mit {Basis, Rampe, Überschwingen} und zeitlichem Verhalten  $\sim \{23, 1.5, 17\}$  min. Mit einer geschätzten Schockgeschwindigkeit von  $68 \pm 17$  km/s ergibt sich eine Dicke der Rampe von  $\sim 6000$  km. Das Verhältnis von  $B$  nach dem Schock ( $B_2$ ) zum vorgelagerten (upstream) Sonnenwind ( $B_1$ ) ergibt sich zu  $B_2/B_1 = 1.7 \pm 0.1$ , das Dichteverhältnis beträgt  $N_2/N_1 = 1.4 \pm 0.2 \approx B_2/B_1$ . TS-3 ist ein superkritischer, quasi-senkrechter Schock mit der Struktur {(Sonnenwind), Basis, Rampe, Überschwingen, Unterschwingung, kleinere Oszillationen, Heliosheath}.

## A.2.4 Magnetosphäre und Ionosphäre

**Magnetosphäre** Das Magnetfeld der Erde ist tonangebend bis in etwa dem zehnfachen Erdradius. In dieser plasmadominierten Region, der Magnetosphäre, geschehen komplexe physikalische Vorgänge mit schnell veränderlichen Stromsystemen und Einflüssen auf geladene Teilchen, siehe Abb. A.15. Der Begriff Magnetosphäre wurde von Thomas Gold (1920 – 2004) im Jahre 1959 geprägt:

*"... to investigate the region above the ionosphere in which the magnetic field of the earth has a dominant control ... it may appropriately be called magnetosphere."*

siehe [Gold, 1959], [Stern, 2002] und für einige Essays [Terzian and Bilson, (Eds.), 1982]. Ein Auszug aus den umfangreichen Untersuchungen widmet sich (i) Turbulenz [Vörös et al., 2003a], [Vörös et al., 2004],

[Vörös et al., 2003b], (ii) Wellenphänomenen [Volwerk et al., 2004], weiters (iii) statistischen Untersuchungen [Zhang et al., 2006], [Zhang et al., 2004], (iv) Bifurkationen in der Stromschicht [Runov et al., 2003], (v) gemeinsamen Cluster und Doublestar Ergebnissen [Nakamura et al., 2005a], [Zhang et al., 2005a] und [Volwerk et al., 2005a], siehe ebenfalls Abb. C.15, (vi) den Bewegungen von Dipolarisationsfronten [Nakamura et al., 2002b], (vii) Bezug zur tagseitigen Magnetosphäre [Nakamura et al., 2007], (viii) Struktur der Neutralschicht [Zhang et al., 2002] und (ix) Teilsturm-Intensivierungen [Nakamura et al., 2002a], [Nakamura et al., 2001].

**Ionosphäre** Der Verfasser konnte im Zuge der NASA / ESA Mission Cassini-Huygens an mehreren Projekten im Zusammenhang mit extremely low frequency (ELF) Wellenausbreitung, sowohl auf der Erde als auch am Saturnmond Titan, mitwirken. Im Detail handelt es sich dabei um sogenannte Schumann-Resonanzen, hervorgerufen durch Blitze oder auch andere elektrische Entladungen in einem nicht (bzw. wenig) leitfähigen Medium zwischen dem Objekt (Erde, Titan) und einer Ionosphäre desselben, siehe Kapitel 4.2. Die Resultate zeigten die gute Übereinstimmung zwischen Messungen von Nagycenk, Ungarn und Theorie; Berechnungen mit Transmission Line Method (TLM). Ergebnisse von Huygens sind ebenfalls aufschlußreich und fließen in neue Projekte ein, Kap. 5.1. Für Berechnungen ist immer wieder der Unterschied von "makroskopischer" und "mikroskopischer" Sichtweise der zugrundeliegenden physikalischen Effekte wichtig. Tabelle A.10 zeigt grundlegende Zusammenhänge für die Wellenausbreitung in der Ionosphäre. Die Dichte der freien Elektronen  $N$  ergibt sich in einem vereinfachten Modell zu

$$N^2 = \frac{q}{\alpha} = \frac{\sigma_i I_0 N_0}{\alpha} e^{-z/H} e^{-H \sigma_A N_0 \sec(\chi)} e^{z/H} \quad (\text{A.236})$$

mit  $q = \sigma_i I N$  der Ionisationsrate (Ionen / Zeit),  $\sigma_i$  dem Ionisationsquerschnitt,  $\sigma_A$  Absorptionsquerschnitt,  $I$  dem Fluß der ionisierenden Strahlung,  $\alpha$  der Rekombinationsrate,  $z$  der Höhe ( $dz$  Höhenelement der Ionosphäre),  $H = kT/mg$  Skalenhöhe,  $\chi$  Zenitwinkel. Als empirisches Standard-Modell gilt die International Reference Ionosphere (IRI) von COSPAR und International Union of Radio Science (URSI) mit (i) den entsprechenden Elektronendichten in der {D, E, F1, F2}-Schicht und (ii) Plasmatemperaturen, Ionen-Zusammensetzung, Driften und Total Electron Content (TEC) [Bilitza and Reinisch, 2008]-[Friedrich and Rapp, 2009]. Eine Erweiterung zu tieferen Schichten in der Ionosphäre (D- und E-Schicht) ist durch Faraday-IRI (FIRI) gegeben, siehe [Friedrich and Torkar, 2001] und [Friedrich et al., 2017] für langzeitliche Trends in der oberen Atmosphäre, eine extrem relevantes empirisches Modell für VLF Ausbreitung. Bei diesen Höhen spielt der Bestandteil an Spurengasen, besonders NO und O<sub>2</sub> mit Abhängigkeit vom Zenitwinkel  $\chi$ , eine entscheidende Rolle bei der Ionisation, siehe [Friedrich et al., 1998] mit entsprechenden Grafiken. Zudem wurden atmosphärische Oszillationen in der Temperatur mit charakteristischen Perioden von  $\sim\{2.4 - 2.2, 3.4, 5.5\}$  Jahren über Mitteleuropa gemessen [Offermann et al., 2015]. Die Dynamosphäre befindet sich zwischen oberer D- und unterer E-Schicht ( $\sim 70 - 120$  km Höhe), für weitere Einteilungen siehe Tab. A.9.

Erdoberfläche und Atmosphärenschichten	Ursache der Ionisation, Anmerkungen
Erdoberfläche	negative geladen, es ist eine äquivalente positive Ladung verteilt in der Atmosphäre über der Oberfläche, siehe Kap. <b>B.1.4</b>
Troposphäre (atm. Grenzschicht), Wettersphäre, 0 – 11 ( $\lesssim$ 2) km	galaktische kosmische Strahlung und radioaktives Material ausgetreten vom Erdboden
Stratosphäre, 11 – 50 km	galaktische kosmische Strahlung, Ozonschicht
Mesosphäre, 50 – 90 km Mesopause 85 km (Neutrosphäre < 70 km)	solare Ly $\alpha$ - und Röntgenstrahlung, Teilcheneinfall in Gebieten der Aurora, Maximum von verglühenden Meteoriten (Impakt-Geschwindigkeiten von 16 – 72 km/s)
Thermosphäre 90 – 500 km (Ionosphäre 70 – 800 km)	EUV, Röntgenstrahlung von der Sonne, energetischer Teilcheneinfall von der Magnetosphäre in die Auroragebiete in der Ionosphäre, die elektrische Leitfähigkeit wird anisotrop
Exosphäre > 500 km (Magnetosphäre > 800 km)	Atmosphäre wird dünner, die Ionisierung fällt ab, Entweichmöglichkeit für Neutralteilchen

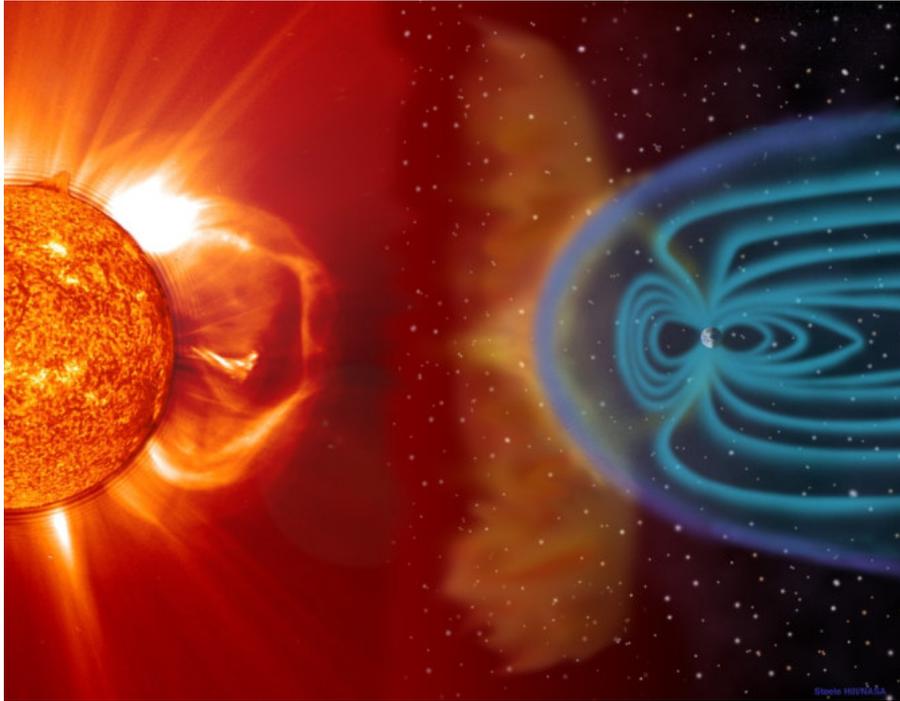
**Tabelle A.9:** *Erdoberfläche, Schichten und Nomenklatur der Atmosphäre nach Temperaturverteilung (Ionisierungszustand) und primäre Ionisationsquellen. Diese Grenzen sind leicht variabel da Abhängigkeiten zur Sonnenaktivität, geographischen Breite und Tag-Nacht Übergänge bestehen, siehe [Goldberg et al., 1997]. In der Tropopause beträgt der Druck  $\sim 0.1$  bar, näherungsweise gültig in einem weiten Bereich auch bei anderen Planeten-Atmosphären, die konvektive Durchmischung (langwelliges IR vom Boden in opake Schichten) geht über in strahlungsdominierten Energieeintrag durch kürzere Wellenlängen. In Bodennähe – inkl. der turbulenten planetaren Grenzschicht (PBL) in den unteren  $\lesssim 2$  km, sie koppelt Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre und Kryosphäre und beinhaltet 90 % der Biosphäre – ergibt sich in der heutigen geologischen Zeit eine Zusammensetzung von  $\{77.1 / 20.8 / 1.1 / 0.9 / 0.1\} \% = \{N_2 / O_2 / H_2O\text{-Dampf} / Ar / H_2, CO_2, \text{Edelgase, andere}\}$ . Kapitel **A.2.4** behandelt Iono- und Magnetosphäre mit dem Hintergrund von Weltraum-Missionen. Neutralgas ist unter 100 km als Folge von Turbulenz gut durchmischt (Homosphäre, auch Turbosphäre), nach der oberen Begrenzung – der Turbopause – folgt darüber die Heterosphäre.*

Mikroskopische Betrachtungsweise	Makroskopische Betrachtungsweise
<p>Anfangsbedingungen</p> <p>(i) angelegtes gleich lokales <math>E</math>, (ii) Kräfte aufgrund des magn. Feldes <math>B</math> vernachlässigt, (iii) <math>\mu_r = 1</math>, (iv) Amplitude der Oszillationen klein genug, d. h. Bestimmung von <math>E</math> an der mittleren Position des Elektrons</p> <p>Bewegungsgleichung für ein Elektron</p> $m(\ddot{\vec{x}} + \gamma\dot{\vec{x}} + \omega_0^2\vec{x}) = \vec{F}(\vec{x}, t) = q_e\vec{E}(\vec{x}, t) = -e\vec{E}(\vec{x}, t)$ <p>mit dem harmonischen Ansatz <math>e^{-i\omega t}</math> folgt</p> $\vec{p} = -e\vec{x} = \frac{e^2}{m}(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)^{-1}\vec{E}$ <p>und</p> $n^2(\omega) = (n_R(\omega) - in_I(\omega))^2 = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} = \epsilon_r = 1 + \chi_e = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \sum_j f_j (\omega_j^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j)^{-1}$ <p>mit <math>\sum_j f_j = Z</math></p> <p>Bestimmung der Leitfähigkeit <math>\sigma</math>: <math>1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \sum_j f_j (\omega_j^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j)^{-1} \Leftrightarrow 1 + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}, \sigma = \frac{Ne^2 f_0}{m(\gamma_0 - i\omega)}</math></p> <p>Definitionen: <math>\omega_p = \frac{Ne^2 f_0}{m\epsilon_0}, \sigma = \frac{\omega_p^2 \epsilon_0}{\gamma_0 - i\omega}</math></p>	<p>Anfangsbedingungen</p> <p>(i) <math>J \neq 0</math>, d. h. das Medium wird als Leiter betrachtet.</p> <p>Maxwell'sche Gleichungen</p> $\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}, \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \nabla \cdot \vec{B} = 0$ $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \text{ und } \vec{J} = \sigma \vec{E}$
<p>mit <math>\mu = konst.</math> folgt <math>\nabla \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} = (\sigma - i\omega\epsilon_0)\vec{E} = 0</math>.</p> <p>Mit den Bedingungen <math>\vec{E} = E\vec{e}_x</math> und <math>\vec{H} = H\vec{e}_y</math> ergibt sich</p> $\nabla \times \vec{E} = -d^2 E/dz^2 \text{ und } d^2 E/dz^2 + (i\omega\mu\sigma + \omega^2\mu\epsilon_0)E = 0.$ <p>Mit <math>k = \omega/c</math> und <math>c = (\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}</math> folgt <math>\omega^2\mu_0\epsilon_0(1 + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}) = k^2 n^2</math>.</p> <p>Brechungsindex: <math>n^2 = (n_R - in_I)^2 = 1 + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_0)}, \omega \gg \gamma_0 \Rightarrow n^2 = 1 + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}</math> und <math>\omega \ll \gamma_0 \Rightarrow n^2 = 1 + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}</math></p>	<p>Maxwell'sche Gleichungen</p> $\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}, \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \nabla \cdot \vec{B} = 0$ $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \text{ und } \vec{J} = \sigma \vec{E}$ <p>Maxwell'sche Gleichungen</p> $\nabla \times \vec{E} = i\omega\mu\vec{H} \text{ und}$ $\nabla \times \vec{H} = (\sigma - i\omega\epsilon_0)\vec{E} = -i\omega\epsilon_0(1 + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0})\vec{E}$

**Tabelle A.10:** Mikro- und makroskopische Sichtweise für die Wellenausbreitung im stoßbehafteten Plasma der Ionosphäre. Legende:  $n$  komplexer Brechungsindex,  $\chi_e$  elektr. Suszeptibilität,  $N$  Moleküle pro Einheitsvolumen,  $Z$  Elektronen pro Molekül,  $\gamma_j$  Dämpfungskonstante (aus Quantenmechanik),  $\omega_j$  Bindungsfrequenz (aus QM),  $f_j$  Oszillatorstärke (aus QM),  $-e$  Ladung Elektron,  $p$  Dipolmoment,  $\omega$  Winkelfrequenz,  $m$  Masse Elektron,  $i$  Imaginäre Einheit,  $\epsilon$  Permittivität,  $\mu$  Permeabilität,  $\sigma$  Leitfähigkeit,  $E$  elektrisches Feld,  $H$  magnetisches Feld,  $J$  Stromdichte,  $D$  Verschiebungs-Stromdichte,  $\rho$  Ladungsdichte,  $B$  magn. Induktion,  $k$  Wellenzahl,  $\omega_p$  Plasmafrequenz,  $c$  Lichtgeschwindigkeit.

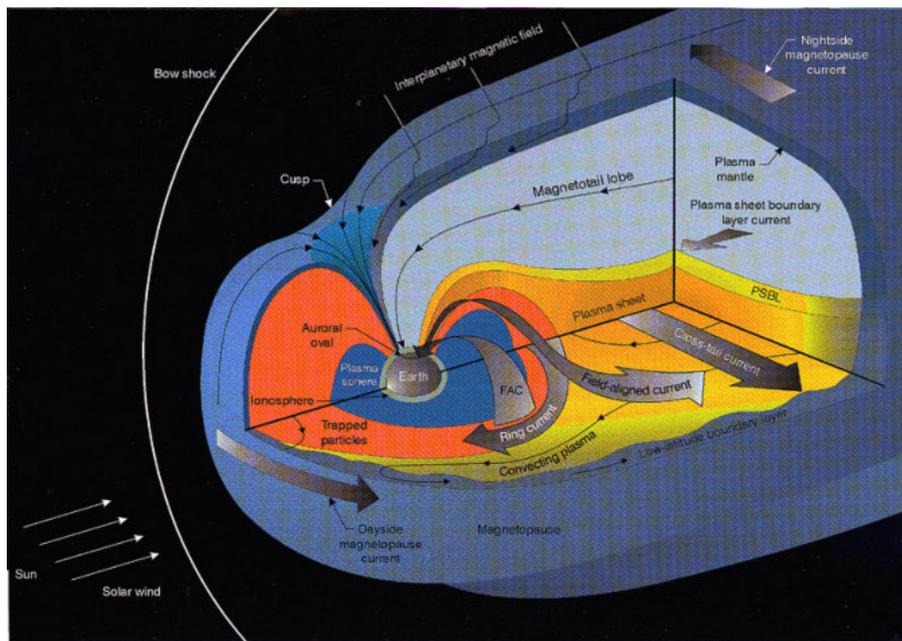
### A.2.5 Solar-Terrestrische Beziehung, Space Weather

Die solar-terrestrische Physik ist angewiesen auf die Kooperation und Synergien zwischen weltraum- und bodengestützten Beobachtungen. Die Realisierung der Cluster-Mission fungiert als Beschleuniger für die Entwicklung von neuen bodengestützten Einrichtungen und deren Koordination untereinander in beispielloser Art und Weise. Die Ergebnisse von Cluster, kombiniert mit koordinierten Beobachtungen am Boden, führen zu einem verbesserten Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse in der solar-terrestrischen Beziehung (STB). Diese weltraum- und bodenbasierten Messungen sind ein wichtiger Bestandteil zum Verständnis der Eigenheiten des komplexen Systems, siehe Abb. A.14.



**Abbildung A.14:** *Solar-Terrestrische Beziehung, künstlerische Darstellung, nicht maßstabsgetreu; Eine dynamische Sonne mit transienten Vorgängen (siehe Seite 147 ff.), ihrer elektromagnetischen Strahlung und dem Sonnenwind trifft auf Planeten, Monde, Kometen und andere Objekte und tritt in Wechselwirkung mit dem Himmelskörper. Den natürlichen dynamischen Prozessen sind zusätzliche gravitative Störungen, Resonanzen, u. U. drastische Änderungen (Kollisionen) und stetige Variationen aufgrund nichtgravitativer Kräfte (Strahlungsdruck := Pointing-Robertson Effekt, Jarkowski Effekt, Gezeitenreibung) überlagert.*

Die Solar-Terrestrische Beziehung, das Space Weather, muß sowohl in der Theorie, zur Konstruktion von aussagekräftigen Modellen, als auch durch Satelliten- und erdgebundene Beobachtungen, d. h. welt-raumbasiert durch die Analyse von SOHO (hat inzwischen als Nebenprodukt mehr als 3000 "sungrazer" Kometen gefunden), DSCOVR, ACE (alle drei am L1 Punkt / Orbit; angedacht ist eine Mission im L5 Punkt, damit könnten Bereiche auf der Sonnenoberfläche beobachtet werden die durch Rotation der Sonne erst nach 4 – 5 Tagen auf der Erde erkennbar sind), Cluster, DoubleStar, Themis (alle 3 im Erdorbit) und Daten weiterer Missionen (MMS) studiert werden. Es stehen eine Fülle an Modellen in den Bereichen Atmosphäre, Ionosphäre, Plasmasphäre, Strahlungsgürtel, Gravitation, Geomagnetismus, Magnetosphäre für die Erde und Sonne, Planeten und interplanetarer Raum zur Verfügung. Diese wechselseitige Abhängigkeit zwischen Theorie und Beobachtung (Datenbank-Systeme), von der Sonne über die Magnetosphäre bis zur terrestrischen Atmosphäre, ist von entscheidender Bedeutung für das Verstehen der grundlegenden Prozesse, sie ist somit ein Bereich für interdisziplinäre Zusammenarbeit auf unterschiedlichen Gebieten. Die Magnetosphärenmission Cluster, siehe Kap. A.4, untersucht die Effekte in Erdnähe in unterschiedlichen



**Abbildung A.15:** Magnetosphäre der Erde mit ihrer Struktur/Morphologie und Topologie, künstlerische Darstellung; Der Sonnenwind – und mit ihm das interplanetare Magnetfeld (IMF) – tritt in Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld. Er wird abgebremst und abgelenkt, es bilden sich Stromsysteme und dynamische Vorgänge im Plasma entstehen. Dünne Linien stellen die Richtung des magnetischen Feldes dar, dicke Pfeile symbolisieren die verschiedenen Ströme der Magnetosphäre: Ringstrom, Magnetopausenstrom, Schweifstrom, Feldlinien paralleler ("field-aligned") Strom. Das Druckgleichgewicht an der Magnetopause ergibt sich zu  $[B_{\parallel}^2/8\pi + Nk(T_p + T_e) + Nm_p v^2 \sin^2 \alpha]_{in} = [B_{\parallel}^2/8\pi + Nk(T_p + T_e) + Nm_p v^2 \sin^2 \alpha]_{out}$ , mit (i) magnetischen, (ii) thermischen und (iii) dynamischen (ram) Drücken und unterschiedlicher Gewichtung je nach Region, siehe auch Gl. A.229.

primäres Ereignis $\Leftrightarrow$ resultierendes Phänomen
Beginn eines koronalen Massenauswurfes (CME) $\Leftrightarrow$ prompte Beschleunigung von energetischen Teilchen
Vorhergehende interplanetare Schockwelle vor CME $\Leftrightarrow$ kontinuierliche Beschleunigung von energetischen Teilchen
Magnetische Strukturen im Zusammenhang mit CMEs $\Leftrightarrow$ auslösen von geomagnetischen Stürmen (südwärts gerichtetes IMF) und Teilstürmen
Koronale Löcher $\Leftrightarrow$ Strömungen mit hoher Geschwindigkeit; Grenzflächen sind Quellen für Teilchenbeschleunigung; u. U. auslösen von geomagnetischen Stürmen
Solare Flares $\Leftrightarrow$ Ultraviolett- und Röntgen Emissionen beeinflussen Ionosphäre (siehe Kap. 4.1.4) und Thermosphäre

**Tabelle A.11:** Auswirkungen von solaren Phänomenen auf die Erde, Ursache und Wirkung. Zusätzlich gibt es (i) externe Einflüsse auf galaktischen, extragalaktischen und kosmischen Skalen sowie (ii) interne Quellen, siehe Abb. A.16.

Plasmaregionen dieses Systems. Die Entwicklung und der Betrieb eines operationellen Services für Space Weather setzt sowohl Infrastruktur am Boden als auch Instrumente im Weltraum voraus. Die Anforderungen an solche Instrumente kann beträchtlich von Instrumenten für Grundlagenmissionen differieren. Weltraumforschung (Space Research) ist die Erforschung des Weltraums, das Committee on Space Research (COSPAR) definiert "... all kinds of fundamental research carried out with the use of balloons, rockets or rocket propelled vehicles". Angewandte Weltraumforschung, oft verbunden mit Innovationen, bezeichnet man im Englischen als Space Applications. Das nationale amerikanische Space Weather Programm hat eine weithin akzeptierte Definition für Space Weather etabliert:

Space Weather – Weltraumwetter – Solar Terrestrische Beziehung:

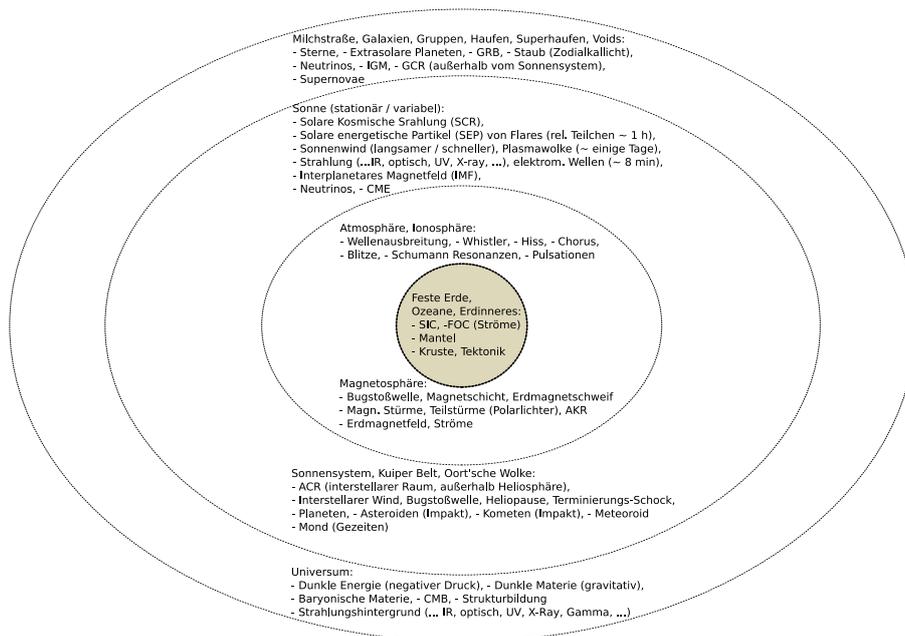
*... conditions on the Sun and in the solar wind, magnetosphere, ionosphere, and thermosphere that can influence the performance and reliability of space-borne and ground-based technological systems and can endanger human life or health.*

Allerdings ist bei dieser Definition der Weltraummüll (derzeit  $\sim 750000$  Objekte größer 1 cm, davon wiederum 18000 (2.4 %) in permanenter Überwachung zur Vermeidung von Kollisionen, siehe ebenfalls SST Seite 180) nicht berücksichtigt. Bis dato sind mehr als 5250 Starts erfolgt,  $\sim 1200$  Satelliten sind momentan aktiv. Das Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) legt folgende Bezeichnung fest.

Space Debris – Weltraummüll:

*Space debris are all man made objects including fragments and elements thereof, in Earth orbit or re-entering the atmosphere, that are non functional.*

Markante Oberflächen-Änderungen sind generell verursacht durch (i) energetische Sonnenstrahlung, (ii) kosmische Strahlung und (iii) Einschläge von Mikrometeoriten ("Space Weathering"). Bekannt bei Eisenmeteoriten sind die Widmanstätten'schen Figuren (Alois von Widmanstätten, 1754 – 1849) und Neumann'sche Linien (Johann G. Neumann, 1813 – 1882). Diese Solar-Terrestrischen Beziehungen spiegeln die volle Komplexität der Wechselwirkungen wider, bis hin zu Einflüssen auf der Erdoberfläche. Beispielsweise kann es durch Flares zu einer erhöhten Röntgenstrahlung und damit zu einer zusätzlichen Ionisation der D-Schicht in der Ionosphäre kommen, was zur Beeinträchtigung von Kurzwellenausbreitung führt (Sudden Ionospheric Disturbance SID, Mögel Dellinger Effekt – "short wave fadeout", "Tote Viertelstunde") und Modifikationen bei Längstwellen (VLF) hervorruft, siehe Kap. 4.1.4.



**Abbildung A.16:** Kosmisch-Solar-Terrestrische Auswirkungen dargestellt in einem erweiterten Schichtenmodell ("konzentrische Kreise") mit Urknall, Inflation, CMB (inkl. dessen Anisotropie), Strukturbildung im Universum, GRB's, kosmischer Strahlung, Einflüsse innerhalb der Heliosphäre, Magnetosphäre, Atmosphäre mit Ionosphäre, fester Erde mit Erdoberfläche / Biosphäre, Ozeane / Hydrosphäre / Kryosphäre und endogene Aktivitäten des Erdinneren (Lithosphäre, Asthenosphäre). Wie in der Kunst bei einem Konzert eines Orchesters – man denke exemplarisch an außergewöhnliche Aufführungen der Wiener Philharmoniker dirigiert von Willi Boskovsky (1909 – 1991) – sind in der Natur transiente Vorgänge den Hintergrundquellen, z. B. {Erde / CMB / Sonne-Photosphäre} = {~ 293 / 2.73 / 5780} K, überlagert.

Grundlagenforschung (Science mission) ⇔
Angewandte Forschung (Service mission), z. B. Space Weather, Solar-Terrestrische Beziehung
Latenzzeiten in Telemetrie (Downlink, TM) und Telecommand (Uplink, TC), optimierte Kommunikation ⇔
Keine oder nur geringe Verzögerungen, Echtzeitanforderungen
Verzögerung in der Prozessierung der Daten (hoher Kalibrationsaufwand) ⇔
Echtzeit Datenprodukte (Standard-Kalibration), zeitkritische Ereignisse
Keine Verfügbarkeit der S/C aufgrund operationeller Zwänge ⇔
Hohe Verfügbarkeit der S/C notwendig
Kein kontinuierlicher Datenstrom, "Event" oder "Programm" orientiert ⇔
Kontinuierlicher Datenstrom für Echtzeitarchiv und User (ereignisorientierte Vorhersagen)
Eine kurze Mission kann u. U. die wissenschaftlichen Ziele erfüllen ⇔
Langandauernde, kontinuierliche Missionen mit adäquater Leistung erstrebenswert
Hochperformante Instrumente ⇔
Reduzierte Leistung u. U. akzeptabel wenn grundlegender Service garantiert wird

**Tabelle A.12:** Vergleich der Charakteristiken einer Mission für angewandte Forschung und Grundlagenwissenschaft. Nimmt man die Erdbeobachtung (Earth observation, EO) mit Satelliten ergeben sich Explorer-Programme im wissenschaftlichen Zweig (z. B. GOCE, SMOS, SWARM, ...) und Monitoring / Servicesysteme mit Global Monitoring for Environment and Security (GMES – danach umbenannt in Copernicus) Sentinel Satelliten. Hinzukommen als 3<sup>te</sup> Gruppe Wettersatelliten unterschiedlicher Generationen.

Die vollständige Modellierung der Solar-Terrestrischen Beziehungen ist extrem anspruchsvoll (ausgenommen Teilaspekte), das System enthält Felder und Teilchen über einen großen Energiebereich (man denke an die Kosmische Strahlung, siehe Seite 116, 184) und ist charakterisiert von Phänomenen auf der räumlichen Skala von planetar bis mikroskopisch, siehe Abb. A.16, d. h. es müssen sowohl kollektive (Fluid-Ansatz) als auch kleinräumige (kinetische) physikalische Erscheinungen zur Beschreibung in Betracht gezogen werden. Kurzzeitige, hochenergetische, transiente Vorgänge sind u. a. (i) solare Flares, (ii) terrestrische  $\gamma$ -Strahlen Ausbrüche (terrestrial  $\gamma$ -ray flash, TGF), (iii)  $\gamma$ -Strahlen Bursts ( $\gamma$ -ray burst, GRB), (iv) Supernovae (SN), (v) wiederholte weiche  $\gamma$ -Strahlungs Ereignisse (soft  $\gamma$  repeator, SGR), (vi) Zerstörungen durch Gezeitenwirkungen (tidal disruption event, TDE), (vii) Akkretion bei Schwarzen Löchern (black hole, BH) oder bei Neutronensternen (neutron star, NS), (viii) Ereignisse bei aktiven galaktischen Kernen (active galactic nuclei, AGN). Die Beeinflussung von S/C reicht von singulären Fehlern (single event errors, SEEs), siehe Kap. B.2, bis zur Degeneration der Solarzellen, zusätzlich zur stetigen Verschlechterung infolge der UV-Strahlung und Alterung aufgrund Strahlung genereller Art. Einige Effekte können sich stetig rückbilden ("annealing"). Vergleichsstudien konnten zeigen, daß elektrostatische Phänomene für eine große Anzahl von Anomalien auf Satelliten verantwortlich sind. Einer der am weitesten fortgeschrittenen "space weather" Service ist von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in den USA und auf europäischer Seite das ESA Space Situational Awareness Space Weather (SWE) Service. Idealerweise verwendet ein Service ein Netzwerk an boden- und weltraumgestützten Instrumenten zur Bestimmung der Solar-Terrestrischen Beziehungen. Das Space Situational Awareness (SSA) Programme gliedert sich in drei Segmente: (i) SWE, (ii) Beobachtung und Bahnbestimmung von Objekten im Erdorbit (Space Surveillance and Tracking – SST) und (iii) Bestimmung von Objekten die auf der Erde einschlagen könnten (Near-Earth Object Segment – SSA-NEO). Erwähnt sie hier der Asteroiden-Einschlag von Tscheljabinsk am 15. Feb. 2013, ein Objekt mit 20 m Durchmesser und einer Geschwindigkeit von 19 km/s. U.a. war eine bodenbasierte Messung mit Infraschall-Stationen des International Monitoring System (IMS) der Preparation Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) möglich. Weltraummüll ist dafür verantwortlich, daß die Internationale Raumstation (ISS) bereits mehrfach Ausweichmanöver durchführen mußte. Zusammen mit ausgereiften Modellen kann eine Vorhersage, zumindest für kurze Zeiträume, der Einflüsse auf die Erde vorgenommen werden. Dabei sind Weltraum-Missionen für (i) Grundlagenforschung und (ii) angewandte Forschung nicht als

Gegensatz aufzufassen, sondern als Ergänzung zu betrachten, siehe Tab. A.12. Der Gegensatz darf sich nicht zum Dualismus verschärfen, "Space" bedeutet "property of all mankind" mit einem inoffiziellen unteren Limit von 100 km Höhe. Eine "Schwarz-Weiß-Malerei" bei den einzelnen Punkten ist nicht angebracht. Abbildung A.16 und Tabelle A.11 zeigen einige Zusammenhänge zwischen Phänomenen im Welt-raum und daraus resultierenden möglichen Beeinflussungen auf der Erde.

Die folgenden dynamischen Spektren in Abbildung A.18 und A.19 zeigen die Aktivität in der  $B_x$ -Komponente des magnetischen Feldes, aufgezeichnet von einem Chimag-Instrument im magnetischen Observatorium Nagycenk, Ungarn, vor und während eines magnetischen Sturms. Die Variationen des magnetischen Feldes, gemessen von Magnetometern an der Erdoberfläche in niedrigen Breiten und nicht direkt am Äquator (aufgrund des äquatorialen Elektrojets, einem Stromsystem in der Ionosphäre das Störungen verursachen könnte) werden im Dst Index der geomagnetischen Aktivität zusammengefasst. Die Abbildungen A.18 und A.19 zeigen den Dst Index während eines geomagnetischen Sturmes am 31. März 2002. Die Abnahme des Feldes betrug  $-350$  nT und es dauerte einige Tage um den ursprünglichen ungestörten Wert vor dem Sturm wieder zu erreichen. Diese Erholungsphase ist bestimmt durch die Zeit für den Ladungsaustausch der Ionen im Ringstrom mit ihrer Umgebung, gegeben durch die Gleichung

$$\tau_{ct} = \frac{1}{n_n v \sigma_{ct}}. \quad (\text{A.237})$$

Die Lebensdauer von Teilchen, bevor sie durch Ladungsaustausch oder Stöße verloren gehen, kann durch Gl. A.237 beschrieben werden, dabei ist  $n_n$  die Dichte der Neutralteilchen,  $v$  die Geschwindigkeit der Teilchen und  $\sigma_{ct}$  der Streuquerschnitt, welcher mit zunehmender Energie  $E$  stark abnimmt, siehe ebenfalls Kapitel A.2.1. Die wenigen nT Zunahme des Dst vor dem Beginn des Sturms wird storm sudden commencement (SSC) bezeichnet und ist hervorgerufen durch elektrische Ströme in der Magnetopause (interplanetare Schockwelle; diese Erklärung wurde erstmals von T. Gold im Jahre 1955 vorgeschlagen). Störungen des geomagnetischen Feldes sind Auswirkungen der Solar-Terrestrischen Beziehung, die Charakterisierung der geomagnetischen Variation ("reguläre Irregularität und irreguläre Regularität" – unterschiedlichste Ursachen wirkend auf vielen Zeitskalen) kann durch eine Vielzahl an geomagnetischen Indizes vorgenommen werden, z. B. Dst, Kp und Ap Index. Der Dst Index wird durch Messungen in niederen Breiten bestimmt und ist sensitiv gegenüber Störungen verursacht durch die Ringströme in der Ionosphäre. Die gemessenen horizontalen Magnetfeld-Komponenten  $H_i = B_{SV} + B_{Sq} + B_{SC} + D_i$  von vier Observatorien werden (i) jeweils einzeln korrigiert nach Sekularvariation ( $B_{SV}$ ), Sonnenzyklus ( $B_{SC}$ ) und Solar-Quit ( $B_{Sq}$ ) Variationen, (ii) mit der jeweiligen magnetischen Breite  $1/\cos \lambda_i$  gewichtet und (iii) der Mittelwert gebildet. Die beiden anderen Indizes sind Mittelwerte von magnetischen Feldern gemessen in höheren geomagnetischen Breiten durch Magnetometerketten. Sie sind sensitiv auf Ströme in polaren Gebieten, z. B. der Elektrojet im Zusammenhang mit Polarlichtern. Bei Messungen sind neben geomagnetischen Einflußfaktoren auch anthropogene, z. B. der "Wochenendeffekt" (absinken der Hintergrundpegel; ebenfalls an Feiertagen) hervorgerufen durch unterschiedliche arbeitsfreie Zeiten von Bevölkerungen in dicht bebauten Gebieten großer Regionen und weiters seismische Ursachen zu berücksichtigen, siehe [Prattes et al., 2008] und [Boudjada et al., 2009], [Schwingenschuh et al., 2009a]. Die Aurora ist definiert als leuchtendes Phänomen am Himmel das vom menschlichen Auge erkennbar ist. Elektrische Felder entlang magnetischer Feldlinien sind die Ursachen der Beschleunigungen von Teilchen die Polarlichter erzeugen. Die quasi-stationäre Situation der Beschleunigung von Elektronen, sie kollidieren mit der Atmosphäre und regen die Leuchterscheinungen der Aurora an, passiert in einer Höhe von  $1 - 2 R_E$  entlang der Feldlinien. Das nach außen gerichtete elektrische Feld und der damit verbundene Strom erzeugen die "auroral kilometric radiation" (AKR) in sogenannten "auroral cavities". Dort ist die Plasmadichte stark reduziert, das feldlinien-parallele elektrische Feld ist maßgebend in dieser Region. Mikroskopische Strukturen entlang von Polarlicht-Feldlinien mit einhergehenden Potential-Abfällen werden als "double layer" bezeichnet. Das parallele elektrische Feld zeigt nicht immer nach außen entlang der magnetischen Feldlinien. Ist die Richtung nach innen werden Ionen in die Atmosphäre eingebracht und Elektronen gelangen in die Magnetosphäre, die Potential-Differenz kann in diesem Fall einige keV betragen. Das elektrische Feld ist im Mittel nach außen gerichtet bei Höhen über 8000 km, nach innen unterhalb von 4000 km. Das parallele elektrische Feld steht ebenfalls in Zusammenhang mit der "black-aurora", d. h. völlige Abwesenheit von Lichtemissionen. Auroras enthalten häufig Strahlen, d. h. filamentartige Strukturen verursacht durch Plasma-Einschnürungen ("plasma pinch effect") oder Kelvin-Helmholtz Instabilitäten. Der Einschnür-

Effekt ist aufgrund der Tendenz von Stromschichten in Filamente zu zerbrechen wenn die Stromstärke kritische Werte übersteigt. Ein entscheidender Punkt bei feldparallelen Potential-Differenzen bleibt die Erzeugung von AKRs, bei weitem die intensivste Strahlung in der Magnetosphäre der Erde und ebenfalls beobachtet bei anderen Planeten.

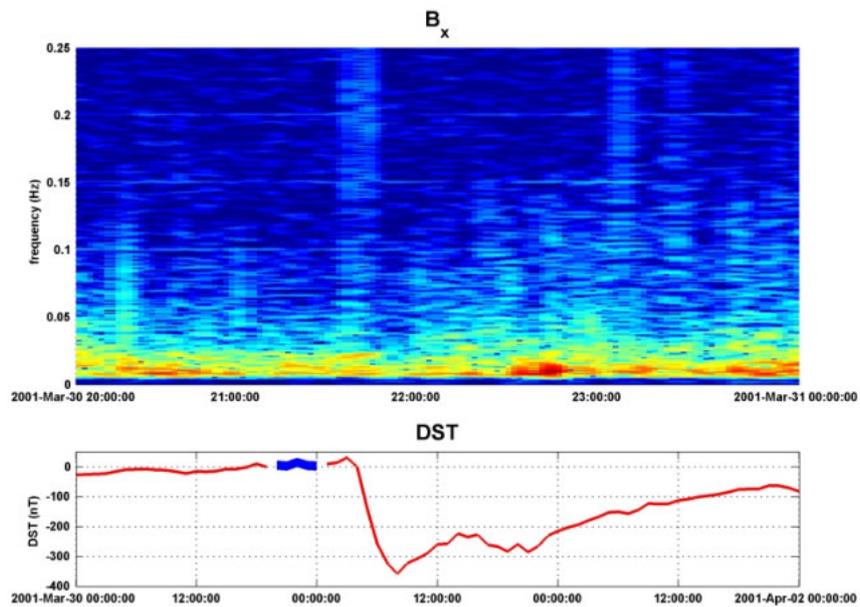
Abbildung A.17 zeigt eine sehr realistische, künstlerische Darstellung eines Polarlichtes in Zusammenhang mit magnetischen Teilstürmen. Wichtige Beobachtungen und Arbeiten sind verbunden mit Maximilian Hell (1720 – 1792), Karl Tirenberger (1732 – 1780) – er machte ebenfalls eine Kometensichtung (8.8.1769) und Erdbebenbeschreibungen (31.12.1767, 27.2.1768) –, Paul Mako (1723 – 1793, Pál Makó de Kerekgede) und Carl Weyprecht (1838 – 1881). Die Feinstruktur des Polarlichtes ist nach wie vor Gegenstand der physikalischen Forschung – für eine aktuelle Mission siehe Seite 191 – und im reichen historischen Kontext zu sehen, siehe [Chapman, 1970]. Neben dem geschichtlichen Aspekt sind besonders die Relationen von Polarlichtern mit dem Geomagnetismus und den Sonnenflecken von Bedeutung, erinnert sei hier an das magnetische Observatorium Kressmünster. Mythologisch sind Nordlichter für die Samen die Geister der Ahnen, die Symbolsprache der Mythen läßt sich generell nur schwer erfassen. Der Sage nach hören die Samen das imposante Naturschauspiel der Aurora in stillen Nächten als singenden Ton, meßtechnisch ist ein akustisches Auftreten des Nordlichtes allerdings nicht zweifelsfrei nachgewiesen. Eine Arbeit von [Hautsalo, 2005] zeigt allerdings Korrelationen zwischen Polarlichtern und Infraschall, in geomagnetisch sehr aktiven Zonen ebenfalls Zusammenhänge im Audiobereich. Dabei treten Verzögerungen des geomagnetischen Signals im Bereich von 0 – 70 s auf verglichen zu den akustischen Daten. Die Südlichter (Aurora Australis) sind spektakulär auf der Stewartinsel/Rakiura ("glühender Himmel" in der Sprache der Māori) – großteils ein Nationalpark im Süden Neuseelands – zu beobachten.



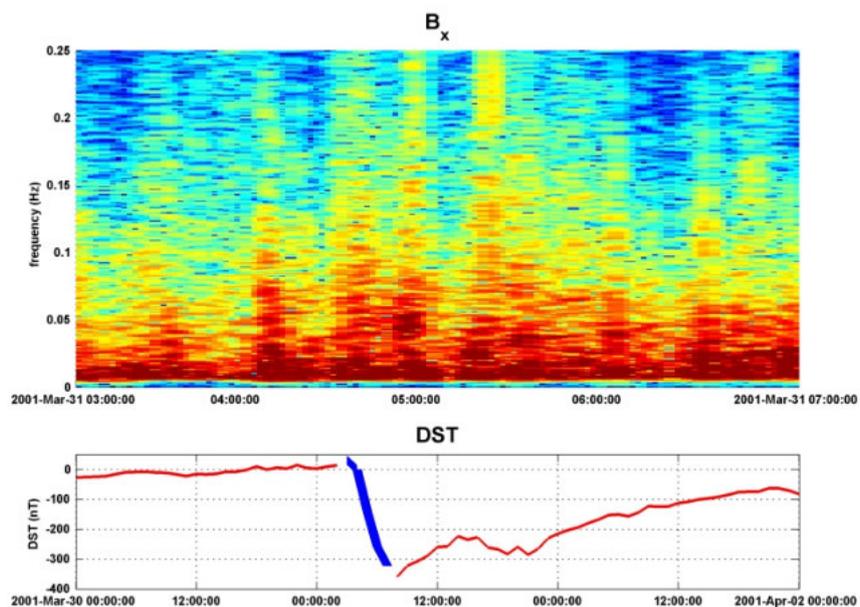
**Abbildung A.17:** *Aurora Borealis*, Frederic Edwin Church (1826 – 1900), National Museum of American Art, Smithsonian Institution.

**Ringstrom** Im hydromagnetischen Formalismus definiert man die Drücke senkrecht  $P_{\perp}$  und parallel  $P_{\parallel}$  zum Magnetfeld

$$P_{\perp} \equiv 1/2 \int f(v)mv^2 \sin^2(\alpha)d^3v, \quad P_{\parallel} \equiv \int f(v, \alpha)mv^2 \cos^2(\alpha)d^3v, \quad (\text{A.238})$$



**Abbildung A.18:** Dst Index und dynamisches Spektrum der  $x$ -Komponente des magnetischen Feldes ( $B_x$ ) unmittelbar vor einem magnetischen Sturm. Der blau markierte Bereich ist der Dst Index während des Zeitraumes von 4 Stunden des Magnetfeldspektrums im oberen Teil des Bildes.



**Abbildung A.19:** Dst Index und dynamisches Spektrum von  $B_x$  während des magnetischen Sturms am 31. März 2001. Deutlich erkennbar und markant ist der starke Anstieg der Aktivität im Spektrum.

mit  $f(v)$  der Verteilungsfunktion und  $\alpha$  dem Pitch-angle (Winkel zwischen dem magnetischen Feld  $\vec{B}$  und dem Geschwindigkeits-Vektor  $\vec{v}$  des Teilchens; Im Spiegelpunkt der helikalen Trajektorie des Teilchens ergibt sich  $\alpha = 90^\circ$ ). Die Ströme aufgrund der (i) Gradienten- und (ii) Krümmungsdrift ergeben sich zu

$$\vec{i}_D = \frac{\vec{B}}{B^2} \times \left( \frac{P_\perp}{B} \nabla B + \frac{P_\parallel}{B^2} (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} \right), \quad (\text{A.239})$$

die Ströme nur aufgrund (iii) der Gyration in der Teilchenverteilung zu

$$\vec{i}_C = \frac{\vec{B}}{B^2} \times \left( \nabla P_\perp - \frac{P_\perp}{B} \nabla B - \frac{P_\perp}{B^2} (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} \right), \quad (\text{A.240})$$

mit, von links nach rechts, Ströme durch den (iii<sub>1</sub>) Druckgradienten, (iii<sub>2</sub>) Gradienten des Magnetfeldes und (iii<sub>3</sub>) Krümmung der magnetischen Feldlinie. Der Gesamtstrom ergibt sich mit

$$\vec{i} = \vec{i}_D + \vec{i}_C = \frac{\vec{B}}{B^2} \times \left( \nabla P_\perp + \frac{P_\parallel - P_\perp}{B^2} (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} \right), \quad (\text{A.241})$$

dabei kompensieren sich der Drift- und Gyrationstrom aufgrund des Magnetfeld-Gradienten und bei isotropen Verteilungen ( $P_\perp = P_\parallel$ ) fällt der Einfluß von Inhomogenitäten (rechter Term) heraus.

**Kosmische Strahlung** Die Entdeckung der kosmischen Strahlung ist eng verbunden mit Viktor Franz Hess (1883 – 1964, auch Heß, Taufbuch-Eintragung: Victor Franz Seraphin Martin Maria) und seinen Messungen während Ballonaufstiegen im Jahr 1912. Mehr als 1 Jhd. später sind Heißluftballone, sogenannte Montgolfière's, von aktuellem Interesse für neue Missionen zu Planeten oder Monden, siehe Kap. 5.1. In den Anfangsjahren gehen Entwicklungen bei Emulsionstechniken zur Teilchendetektion in der Hochenergiephysik zurück auf Marietta Blau (1894 – 1970) und Hertha Wambacher (1903 – 1950), eine aktuelle Funkenkammer zur Detektion von kosmischer Strahlung mit der entsprechenden Leuchtspur (Demonstrationszweck) ist dargestellt in Abb. A.20. Berta Karlik (1904 – 1990) führte in diesem Zeitraum zahlreiche Untersuchungen an Isotopen durch. Die kosmische Strahlung am Rand der terrestrischen Atmosphäre inkludiert alle stabilen, geladenen Teilchen und Kerne mit Lebenszeiten  $\tau \gtrsim 10^6$  Jahre, sie ist praktische isotrop (die leichte Asymmetrie ist konsistent mit der Galaxienverteilung innerhalb von  $\sim 300$  Millionen Lichtjahren) bei den meisten Energien aufgrund diffuser Ausbreitung im galaktischen Magnetfeld. Für die primäre Komponente erfolgt die Beschleunigung an astrophysikalischen Quellen, der sekundäre Teil entsteht durch Wechselwirkung von primären Teilchen mit dem interstellaren Gas, d. h. kosmische Strahlung hat den Ursprung außerhalb des Sonnensystems. Ursächlich damit verbunden ist die Antikorrelation von Teilchen mit Energien  $E \lesssim 10$  GeV mit dem 11-jährigen solaren Zyklus und einer Abschirmwirkung durch das geomagnetische Feld, d. h. eine räumliche und zeitliche Komponente im Spektrum unterhalb dieser Energieschwelle. Die Intensität der Nukleonen (primär und sekundär)  $I_n$  in [Nukleonen/(m<sup>2</sup> sr GeV)] im Bereich von einigen GeV bis über 100 TeV ist angenähert durch

$$I_N(E) \sim 1.8 \times 10^{-4} (E/1\text{GeV})^{-\alpha} \quad (\text{A.242})$$

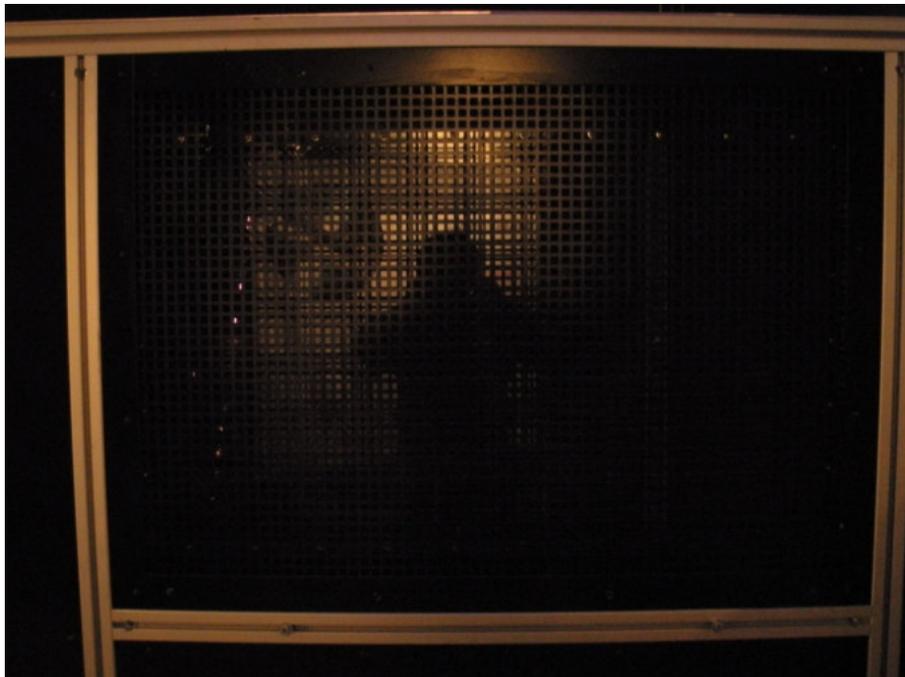
mit  $E$  der Energie pro Nukleon inkl. Ruhemasse, dem differentiellen spektralen Index  $\alpha = \gamma + 1 = 2.7$  und  $\gamma$  ist der integrale spektrale Index.

Freie Protonen H mit ( $\sim 80\%$ ) stellen den Hauptanteil, es folgen Helium He und mit beträchtlichem Abstand zu immer kleineren Anteilen {C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Fe}. Das Verhältnis sekundäre/primäre Nukleonen sinkt mit steigender Energie, d. h. die Lebenszeit von Teilchen  $\tau$  der kosmischen Strahlung in der Galaxie (in etwa mit 15 Myr bestimmt) nimmt mit zunehmender Energie ab.

**Kosmische Strahlung in der Atmosphäre** Messungen des vertikalen Teilchen-Flusses der kosmischen Strahlung zeigen, daß (außer für Elektronen  $e^-$  und Protonen p, sie haben den Ursprung im Zerfall von neutralen Mesonen) alle in der Atmosphäre erzeugten Teilchen (und Antiteilchen) auf die äußere (primäre plus sekundäre  $\rightarrow$  in Folge primäre) Strahlung durch Wechselwirkung mit Atmosphärenteilchen zurückgeht. Myonen  $\mu$  ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ) und Neutrinos  $\nu$  ( $\nu$ ,  $\bar{\nu}$ ) sind Produkte aus Zerfallsketten von geladenen Mesonen. Generell wird der Teilchen-Fluß durch die Atmosphäre durch gekoppelte "Kaskaden"-Gleichungen (Monte Carlo Methoden) beschrieben.

**Kosmische Strahlung auf der Erdoberfläche** Die überwiegende Anzahl an geladenen Teilchen auf Meereshöhe stellen Myonen dar, typischerweise werden sie in  $\sim 15$  km Höhe erzeugt und verlieren durch Ionisation  $\sim 2$  GeV an Energie bevor sie den Boden (mittlere Energie  $\sim 4$  GeV) erreichen, eine Winkelverteilung ergibt sich  $\propto \cos^2(\Theta)$ , sie wird steiler für niedrigere Energien, flacher bei höheren Energien und erreicht dort  $\sec(\Theta)$ . Die integrale Intensität von vertikalen Myonen mit einem Impuls über 1 GeV/c auf Meereshöhe ist  $\sim 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$  (entspricht  $I \sim 1 \text{ cm}^{-2}\text{min}^{-1}$  für horizontale Detektoren). Für niederenergetische Elektronen auf Meereshöhe ist die dominierende Quelle der Myon-Zerfall, generell stammen in diesem Bereich Elektronen  $e$ , Positronen  $e^+$  und Photonen  $\gamma$  aus Kaskaden zurückreichend auf den Zerfall von neutralen und geladenen Mesonen. Nukleonen über 1 GeV/c sind Reste der primären kosmischen Strahlung, die integrale Intensität für vertikale Protonen ergibt sich zu  $\sim 0.9 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ;  $\sim 1/3$  der Nukleonen auf Meereshöhe in vertikaler Richtung sind Neutronen.

**Kosmische Strahlung in der Lithosphäre** Nur Myonen (sie erzeugen einen tertiären Fluß aus Photonen, Elektronen und Hadronen) und Neutrinos  $\nu$  erreichen signifikante Tiefen. Myonen verlieren Energie durch Ionisation und Strahlungsprozesse (Bremsstrahlung, Paarerzeugung  $e^+$ ,  $e^-$ , photonukleare Interaktionen), es ergibt sich  $-dE_\mu/dx = a + bE_\mu$ ,  $a$  ist der Ionisierungsverlust,  $b$  die anteilige Energieabnahme durch die Strahlungsprozesse;  $\epsilon = a/b \sim 500$  GeV in einem standardisierten Material (Stein, Felsen;  $a$  und  $b$  Werte gibt es ebenfalls für Wasser/Eis) definiert eine kritische Energie unter der kontinuierliche Ionisierungsverluste wichtiger als Strahlungsprozesse sind. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Energie des Myons bei der Erzeugung ( $E_{\mu,0}$ ) in der Atmosphäre und der mittleren Energie  $E_\mu$  nach Durchgang durch eine Schicht der Dicke  $x$  ergibt sich zu  $E_{\mu,0} = (E_\mu + \epsilon)e^{bx} - \epsilon$ . Daraus folgt das Myon Spektrum in der Tiefe  $x$  mit  $dN_\mu(x)/dE_\mu = (dN_\mu/dE_{\mu,0})e^{bx}$ . Bei Neutrinos  $\nu$  ergibt sich aufgrund ihres geringen Wirkungs-Querschnittes die Möglichkeit von großen Tiefen, d. h. der  $\nu$ -Fluß wird nicht direkt gemessen. Im GeV-Bereich hängt der Fluß und seine Winkelverteilung von der geomagnetischen Lage ab, im geringen Maße von der Sonnenaktivität.



**Abbildung A.20:** Funkenkammer (Hephy, ÖAW) zur Sichtbarmachung von kosmischer Strahlung bei der CERN Ausstellung in Hartberg, Steiermark, 2011. Man erkennt eine Leuchtspur im linken Kammerbereich. Am Aufstellungsort entsteht statistisch alle  $\sim 4$  s ein Blitz.

**Luftschauer** Sie sind verursacht durch Einzelpartikel aus der kosmischen Strahlung mit entsprechender hoher Energie um die Kaskade am Boden zu detektieren. Der hadronische Kern, der fungiert als kollimierte Quelle für elektromagnetische Teilschauer, ist meist erzeugt von  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  Zerfällen. Es resultieren vor allem Elektronen  $e$  und Positronen  $e^+$ ; die Anzahl an Myonen, erzeugt durch den Zerfall von geladenen Mesonen, ist um eine Größenordnung geringer. Eine Näherung für die Anzahl an Myonen  $N_\mu$  (Gesamtanzahl der geladenen Teilchen im Schauer) mit Energien über 1 GeV ergibt sich zu  $N_\mu(> 1\text{GeV}) \sim 0.95 \times 10^5 (N_e/10^6)^{3/4}$ , die Anzahl von Myonen pro  $\text{m}^2$  ( $\rho_\mu$ ) als Funktion des seitlichen Abstandes  $r$  in Meter vom Schauerzentrum ergibt sich zu  $\rho_\mu = (1.25N_\mu/(2\pi\Gamma(1.25)))(1/320)^{1.25}r^{-0.75}(1+r/320)^{-2.5}$ , mit  $\Gamma$  als Gammafunktion. Für Schauergröße  $N_e$  und Primärenergie  $E_0$  gilt folgender Zusammenhang

$$E_0 \sim 3.9 \times 10^6 \text{GeV} (N_e/10^6)^{0.9}, \quad (\text{A.243})$$

bei vertikalen Schauern im Energiebereich  $10^{14} < E < 10^{17}$  eV auf  $\sim 1000$  m Seehöhe. Im differentiellen Energiespektrum gibt es zwei markante Besonderheiten, eine Aufsteilung ab  $\sim 10^{15} - 10^{16}$  eV – bekannt als Knie ("knee") – und eine Abflachung bei  $10^{18.5}$  eV, dem Gelenk ("ankle"). Galaktische Beschleunigungsquellen dürften bei  $10^{18}$  eV ihr Maximum erreicht haben, darüber könnte der extragalaktische Fluß dominierend sein oder eine zweite Möglichkeit ergibt sich im Energieverlust extragalaktischer Photonen an der CMB ( $p\gamma \rightarrow e^+e^-$ ; Paarerzeugungsverluste). Eine weitere Besonderheit ist das GZK-Merkmal bei  $\sim 10^{19}$  eV, darüber beginnt inelastische Streuung von UHECR an der CMB. Die Hälfte der Energieverluste von UHECR Protonen durch Photoproduktion, die den GZK-Effekt verursacht, findet sich letztlich in (kosmogenen) Neutrinos. Bei der Erzeugung von Neutrinos von  $\pi^\pm$ -Zerfällen entsteht eine "Flavor"-Verteilung von  $\{\nu_e:\nu_\mu:\nu_\tau\}=\{1:2:0\}$ .

**Strahlungsgürtel** Der innerste Planet Merkur ☿ hat keine (bzw. nur eine sehr geringe) Atmosphäre und somit auch keinen Strahlungsgürtel, besitzt aber eine Magnetosphäre, der einzige Planet mit dieser Konstellation. Venus ♀ besitzt eine dichte Atmosphäre, allerdings kein intrinsisches Magnetfeld. Die äußeren Planeten Jupiter ♃, Saturn ♄, Uranus ♅, Neptun ♆ haben Strahlungsgürtel und Magnetosphären.

Auf der Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlen entdeckte James A. Van Allen (1914 – 2006) unverhofft die Strahlungsgürtel innerhalb der Erdmagnetosphäre (Explorer 1, 1958, der erste amerikanische Satellit; Entdeckung des Ringstromes durch Pioneer 3 und 4 im Jahr 1959). Bereits Sputnik 1 (1957) hatte ein Geiger-Müller Zählrohr, bei den Daten dachte man allerdings an einen Instrumentenfehler. Die primäre Quelle dieser hochenergetischen Protonen und Elektronen, gefangen im Erdmagnetfeld, resultiert von Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre. Auf einer Höhe von  $\sim 15 - 20$  km in der Stratosphäre (Kap. A.2.5 vorhin) entstehen neben den (i) sekundären Komponenten der kosmischen Strahlung auch (ii) energetische Neutronen die zum Teil nach außen gestreut werden. Dabei zerfallen sie in energetische Protonen und Elektronen die als geladene Teilchen vom Erdmagnetfeld gefangen werden können, der sogenannte Cosmic Ray Albedo Neutron Decay (CRAND) Prozeß. Elektromagnetische Wellen im Sonnenwind (möglicherweise Chorus Wellen) liefern die Energie zur Beschleunigung der Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Messungen / Profile der Phasenraum-Dichte  $f$  sprechen für lokale Beschleunigung der Elektronen und nicht für radiale Diffusion. Es existiert ebenfalls eine starke Korrelation zwischen der Zunahme an Elektronen im Strahlungsgürtel und der Leistung in globalen ULF Wellen, sie sind verstärkt während geomagnetischer Stürme.

Durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre steht die Menge von radioaktivem  $^{14}\text{C}$  in Beziehung zur Intensität der kosmischen Strahlung. Die primäre Komponente mit Energien  $\lesssim 1$  GeV besitzt eine solare Modulation, resultierend aus der Ablenkung der GCR in der Heliosphäre die durch den Sonnenwind mitbestimmt wird, siehe Kap. A.2.2.

Um die Erdoberfläche zu erreichen muß die primäre kosmische Strahlung in die Magnetosphäre eindringen. Signifikante Ablenkung der kosmischen Strahlung erfolgt nicht wenn der Larmorradius  $\sim v/|\omega_c| = v\gamma m_0 c/(|q|B)$  größer als die Skala (Entfernung)  $r$  der Magnetosphäre ist. Die Relation wird ausgedrückt in Termen der Rigidity  $R = (m_0\gamma cv)/(|q|) \lesssim Br$ .

Teilchenpopulationen in der inneren Magnetosphäre  $R < 10Re$  sind (i) kaltes, thermisches Plasma mit Energien  $\lesssim 100$  eV, dominiert durch (i<sub>1</sub>) die  $\vec{E} \times \vec{B}$  Bewegung (mitrotierend) im Bereich  $L < 5$  und bei (i<sub>2</sub>)  $L > 5$  im Zustand von  $\vec{E} \times \vec{B}$  Bewegung plus elektrisches Feld der magnetosphärischen Konvektion mit Transport des kalten Plasmas zur tagseitigen Magnetopause resultierend in Verlustprozessen, weiters

(ii) Ringstrom Plasma mit Energien von 100 eV bis einigen 100 keV, eingebracht während magnetischer Stürme und Bewegung der Protonen, Sauerstoff- und Heliumionen durch Gradienten- und Krümmungsdrift (anstatt  $\vec{E} \times \vec{B}$ ) sowie (iii) Teilchen in den Strahlungsgürteln (hochenergetische Erweiterung der Plasmabevölkerung des Ringstroms) mit Energien  $> 1$  MeV für Protonen und Dutzenden keV für Elektronen mit höchsten Energien durch den CRAND Mechanismus.

Sowohl Teilchen des Ringstroms als auch höherenergetische Partikel der Strahlungsgürtel sind durch die Konfiguration des Erdmagnetfeldes gefangen (magnetische Flasche) und bewegen sich um die Erde durch die grad-B und Krümmungsdrift. Beide Populationen haben Verteilungen mit Verlustkegeltypus (loss cone type distributions in pitch angle) aufgrund der Tatsache, daß geladene Teilchen ihren Spiegelpunkt tief in der Atmosphäre haben können und durch Kollisionen mit (i) Neutralgas oder (ii) ionosphärischen Ionen oder Elektronen verloren gehen.

Mehrere Verlustprozesse sind relevant für gefangene Teilchen des Ringstroms oder der Strahlungsgürtel, darunter (i) Kollisionen mit Neutralgas, (ii) Coulomb-Kollisionen, (iii) Pitch-angle Streuung in den Verlustkegel durch Welle-Teilchen Wechselwirkungen und (iv) Verluste durch Konvektion und Drift. In den Van Allen Strahlungsgürtel sind Populationen mit  $\sim 1-10$  MeV Elektronen und Protonen im terrestrischen Magnetfeld gefangen. Elektronen haben eine Struktur mit zwei Zonen, hingegen sind MeV-Ionen aufgrund ihres größeren Gyroradius auf die innere Zone beschränkt. Der Protonengürtel der inneren Zone wird erzeugt durch die Kombination des (i) CRAND Prozesses (kosmische Strahlung wird in der neutralen Atmosphäre gestreut, die erzeugten Neutronen zerfallen mit einer Halbwertszeit von  $\sim 10$  min) und durch (ii) solare energetische Protonen in Zusammenhang mit Flares und koronalen Massenauswürfen (Solar Energetic Particles, SEPs). Sie werden durch Störungen des Feldes, hervorgerufen von interplanetaren Schocks, im Magnetfeld eingeschlossen. Damit ergibt sich eine obere Grenze von gefangenen Elektronen- und Protonen-Flüssen aufgrund von Verlusten durch Pitch-angle Streuung in die Atmosphäre durch zirkular polarisierte elektromagnetische Wellen, Dopplerverschoben zur Elektron- und Proton-Gyrofrequenz durch Bewegung von Teilchen entlang magnetischer Feldlinien. Dieser Mechanismus ist verantwortlich für die "Slot-Region" zwischen der inneren und äußeren Zone bei Erdradien-Entfernung von  $1-2 R_g$  in der äquatorialen Ebene. Drei Populationen und Bereiche werden aufgrund der Energie und der damit verbundenen Dynamik unterschieden: (i) Plasmasphäre, (ii) Ringstrom und (iii) Strahlungsgürtel. Der äußere Strahlungsgürtel mit MeV-Elektronen überschneidet sich mit Regionen niederenergetischer (10 – 100 keV) Ionen und Elektronen des Ringstromes, wobei heißere Plasmaschicht-Ionen mehr zum gesamten Ringstrom beitragen verglichen zu den Elektronen. Der Ringstrom trägt bei zum Plasmadruck, beeinflusst das magnetische Feld, während die geringe Dichte der Strahlungsgürtel-Population keinen Einfluß hat. Die longitudinale Bewegung von Elektronen und Ionen in den Strahlungsgürteln ist bestimmt durch die energieabhängige Gradienten und Krümmungs-Drift, in unterschiedlicher Richtung für Elektronen und Ionen. Der niederenergetische Ringstrom wird von Konvektion dominiert. Elektronen in der äußeren Zone haben ein Flußmaximum bei  $L \sim 4$ , gemittelte Flüsse (2 – 6 MeV) sind stark variabel mit einem Maximum während der Abschwungphase vom Sonnenmaximum und episodischen starken Anreicherungen um das  $\sim 11$ -jährige Maximum der Sonnenflecken. Während intensiver magnetischer Stürme vollziehen sich dramatische Änderungen in der Grenzschicht der Plasmopause. Zur gleichen Zeit wird der innere Bereich der äußeren Zone mit 2 – 6 MeV Elektronen radial nach innen bewegt und füllt die "Slot-Region" zwischen  $L = 2-3$ . Dieser neue Gürtel bei niedrigem  $L$  bleibt über Monate hinaus bestehen nachdem sich dieser Bereich neu gebildet hat. Der Roederer  $L$ -Parameter  $L^* = 2\pi M/\Phi R_e$  ist definiert in Termen der ersten ( $M$ ) und dritten ( $\Phi$ ) adiabatischen Invarianten (Tab. A.5), welche magnetischen Fluß innerhalb der Zyklotron- und Drift-Bewegung erhalten.  $L^*$  reduziert sich auf den McIlwain  $L$ -Parameter bei einer äquatorialen radialen Distanz  $R_e$  für ein Dipolfeld.

Während eines Hochgeschwindigkeits-Interplanetaren-Schocks, hervorgerufen durch einen CME, kann die Magnetopause innerhalb des Orbits von geostationären Satelliten gedrückt werden. Durch schlagartige Injektion in kleine  $L$  Bereiche entstehen neue Elektronen- und Protonen-Strahlungsgürtel mit gemessenen Energien  $> 13$  MeV in der normalerweise verdünnten "Slot-Region". Diese neuen  $> 13$  MeV Elektronen- und Protonen-Gürtel bleiben über Jahre hinaus bestehen. Verluste durch Pitch-angle Diffusion führen zu Neueta-blierung der "Slot-Region" innerhalb  $\sim 1$  Monat.

Die "Slot-Region" zwischen innerer und äußerer Zone ist beeinflusst durch Pitch-angle Streuung durch (i) gyroresonante Interaktion von Elektronen mit plasmasphärischem Hiss (rechtshändig polarisierter Whistler-Mode innerhalb der Plasmasphäre, 0.2 – 1 kHz, steigt mit der Dichte von kaltem Plasma) (ii) VLF Cho-

rus (1 – 10 kHz, ebenfalls eine rechtshändig polarisierter Whistler-Mode Emission, außerhalb der Plasmasphäre, ausgelöst durch Elektronen in der Plasmaschicht, driftend an der Morgenseite der Magnetosphäre, verstärkt durch Injektionen von magnetischen Teilstürmen die unabhängig auftreten und magnetische Stürme begleiten) trägt bei zur Pitch-angle Streuung und Verluste bei kleineren Pitch-angles und niedrigeren Energien (einige Dutzend von keV in der äquatorialen Ebene) und durch Diffusion in Energie und Impuls bei MeV-Energien und Pitch-angles nahe  $90^\circ$ , (iii) rechtshändig zirkular polarisierte elektromagnetische Ionen-Zyklotron (EMIC) Wellen (während Stürmen durch den Verlustkegel von verstärkten Ringstrom Ionen-Populationen, innerhalb der Plasmasphäre nahe der Plasmopause) mit primären Verlustmechanismus während Stürmen (Elektronen erleiden eine anomale gyroresonante Wechselwirkung mit diesen Wellen).

### A.2.6 Epilog – Troposphäre, Ionosphäre, Entfernungsmessung

**Troposphäre** Um die Signallaufzeiten in eine Entfernungsmessung zu konvertieren ist es notwendig die Effekte des Mediums, durch das der Puls gesendet wird, abzuschätzen [Powell, 1986], [Davis et al., 1985]. Die Verzögerung aufgrund der Troposphäre ist gegeben durch  $\delta = \delta_{dry} + \delta_{wet} = 77.6 \times 10^{-6} \int_0^h (P/T) dh + 0.33 \int_0^h (e/T^2) dh$ , dabei ist  $P$  der atmosphärische Druck,  $T$  die Atmosphärentemperatur,  $h$  die Höhe und  $e$  der Partialdruck von Wasserdampf.  $\delta_{dry}$  kann umgewandelt werden in  $\delta_{dry} = 77.6 \times 10^{-6} (RP_0/g(\phi))$ , dabei ist  $g(\phi)$  die Schwerebeschleunigung am Breitengrad  $\phi$ ,  $R$  die Gaskonstante und  $P_0$  ist der Atmosphärendruck am Boden. Experimente haben gezeigt, daß diese Relation innerhalb von 0.2 % gültig ist und  $\{g(\phi), P_0\}$  können mit Genauigkeiten von  $\lesssim \{0.01 \%, 0.05 \%\}$  gemessen werden. Mit typischen Werten in diese Relation ergibt sich  $\delta_{dry} \sim 230$  cm und man kann erwarten in einem Modell auf 0.5 cm abschätzen zu können.  $\delta_{wet}$  kann konvertiert werden in  $\delta_{wet} = 1.723 \times 10^{-3} (Q/h_0) \int_0^h (1/T) dh$ , dabei ist  $Q$  die integrale Dichte des Wasserdampfes und  $h_0$  die Skalenhöhe. Verwendet man ein einfaches lineares Modell für  $T$  erhält man  $\delta_{wet} = 1.723 \times 10^{-3} Q \ln((1 + \beta h_0/T_0)/(\beta h_0))$ , dabei ist  $T_0$  die Temperatur am Boden. Experimente zeigen, daß diese Konvertierung auf  $\pm 3 \%$  gültig ist, Messungen von  $Q$  sind im Bereich  $\pm 10 \%$ . Ein charakteristischer Wert für  $\delta_{wet}$  ist 20 cm mit einer Unsicherheit von  $\pm 2.3$  cm (hauptsächlich aufgrund von  $Q$ ). Wenn solche Fehler statistisch verteilt sind erhält man bei  $N$  Messungen eine reduzierte Unsicherheit von  $1/\sqrt{N}$ , d. h. bei der Präzision nimmt die Unsicherheit mit zunehmender Anzahl der Messungen ab. Bei der Genauigkeit ist die Meßunsicherheit bestimmt durch grundlegende Faktoren wie instrumentelle Abweichungen oder mangelhafte Modellierung, diese systematische Komponente ist zusätzlich zur Stochastischen (subtile Unterscheidung zwischen Präzision und Genauigkeit).

**Ionosphäre** Die Verzögerung in der Ionosphäre ist gegeben durch  $\delta_I = 40.3 N_T / c f^2$ , dabei ist  $N_T$  der integrale Elektronenanteil,  $f$  die Trägerfrequenz und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit, siehe ebenfalls Gl. 4.1. Typische Spitzenwerte während des Tages für  $\delta_I$  sind 30 cm bei Solarmaximum und 7 cm bei Solarminimum. Während der Nacht kann eine Reduktion um mehr als 50 % erwartet werden.

**GPS, Galileo** Die Mehrdeutigkeit in der (i) Phase wird mittels Phase-Lock-Loop (PLL) durch Vergleich zwischen empfangener und lokal generierte Trägerfrequenz bestimmt, eine (ii) Delay-Lock-Loop (DLL) bestimmt den Ranging-Code ebenfalls durch Vergleich zwischen empfangenen und lokal generierten Code. Die Länge des Ranging-Codes erlaubt eine einfache Bestimmung der Mehrdeutigkeit, im Falle der Phasenmessung ist es schwieriger, da die Anzahl der ganzen Wellenlängen zwischen Sender und Empfänger (= Phasenambiguität) zunächst unbekannt sind. Abschattungen oder Unterbrechungen führen zu Cycle-Slips, solange diese aber nicht auftreten gilt die Beobachtungsgleichung für die Phasenmessung

$$\Phi(t) = \rho(t)/\lambda + c/\lambda(\delta^S(t) - \delta_R(t)) + N - (f_{L1}^2/\lambda f^2)I(t) + (1/\lambda)T(t) + \epsilon_\phi(t), \quad (\text{A.244})$$

mit  $\Phi$  der gemessenen Phase in Zyklen,  $\lambda$  der Wellenlänge in m,  $c$  der Lichtgeschwindigkeit in m/s,  $\rho$  der geometrischen Entfernung zwischen Sender und Empfänger in m,  $\delta^S$  der Satellitenuhrenfehler in s,  $\delta_R$  der Empfängeruhrenfehler in s,  $N$  der Phasenambiguität (zeitunabhängige ganze Zahl, aber Satellitenabhängig) in Zyklen,  $I$  der Ionosphäreneinfluß für Frequenz L1,  $T$  Troposphäreneinfluß,  $\epsilon_\phi$  Meßrauschen

und Multipath der Phasenmessung,  $f$  Frequenz des gemessenen Trägers,  $f_{L1}$  Frequenz des L1 Trägers. Die Beobachtungsgleichung der Codemessung ist gegeben durch

$$R(t) = \rho(t) + c(\delta^S(t) - \delta_R(t)) + (f_{L1}^2/f^2)I(t) + T(t) + \epsilon_R(t), \quad (\text{A.245})$$

mit  $R$  dem Pseudorange (Codemessung) in m und  $\epsilon_R$  dem Meßrauschen und Multipath der Codemessung. Einflüsse auf beide Messungen sind gegeben durch (i) den Satelliten (Uhren- und Bahnfehler), (ii) den Signalpfad (ionosphärische und troposphärische Brechung) und (iii) Fehler im Empfänger (Uhrenfehler und Empfang über mehrere Pfade - Multipath, Änderung des Phasenzentrums der Antenne). Verwendet man eine Referenzstation kann durch Bildung der Doppeldifferenzen (DD) der Satelliten- und Empfängerfehler eliminiert werden, gleichzeitig werden bei kurzen Basislinien die atmosphärischen Effekte stark reduziert:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{jk}(t) &= (\Phi_B^k - \Phi_B^j) - (\Phi_A^k - \Phi_A^j) \\ &= \rho_{AB}^{jk}(t)/\lambda + N_{AB}^{jk} - (f_{L1}^2/\lambda f^2)I_{AB}^{jk}(t) + (1/\lambda)T_{AB}^{jk}(t) + \epsilon_{\phi,AB}^{jk}(t), \end{aligned} \quad (\text{A.246})$$

$$R_{AB}^{jk}(t) = \rho_{AB}^{jk}(t) + (f_{L1}^2/f^2)I_{AB}^{jk}(t) + T_{AB}^{jk}(t) + \epsilon_{R,AB}^{jk}(t), \quad (\text{A.247})$$

dabei sind (A, B) die Referenz- und Empfangsstation, (j, k) zwei Satelliten. Erhöhte Ortsgenauigkeiten, Signale zur Integrität von GPS, z. B. relevant im Flugverkehr und verbesserte Verfügbarkeit sind für Europa mittels European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) realisiert.

## A.3 Koordinierte Mehrpunktmessungen

### A.3.1 Mehrpunktmessungen allgemein

All die in vorherigen Abschnitten erwähnten Eigenschaften und Charakteristiken der Sonne, verbunden mit der Ausbreitung von Teilchen, Feldern und elektromagnetischer Strahlung durch das interplanetare Medium sind von höchster Relevanz für die Wechselwirkung des Sonnenwindes mit dem Erdmagnetfeld. Um die volle Dynamik der Prozesse verstehen und analysieren zu können, ist eine räumliche und zeitliche Trennung der physikalischen Vorgänge notwendig, es gilt somit die Vor- und Nachteile von Mehrpunktmessungen gegenüber herkömmlichen Missionen darzustellen.

Eine gesteigerte Nutzlastkapazität von Raketen, die höhere Integrationsdichte der Instrumente am Satelliten verbunden mit einer Gewichts- und Leistungs-Reduktion eröffnen neue Möglichkeiten in der Erforschung der Magnetosphäre durch Cluster, Themis, MMS oder ähnlichen Multi-S/C Missionen. Nicht unerwähnt in diesem Zusammenhang sei die "Phönix"-Option nach dem Scheitern der ursprünglichen Cluster Mission, das österreichisch / schweizerische Alpsat Projekt und neue ESA Perspektiven wie sie in der "Cosmic Vision" [ESA, 2005] vorliegen.

Historisch betrachtet war es bereits 1874 der Polarforscher Carl Weyprecht (1838 – 1881) zusammen mit seinem Mäzen Hans (Johann Nepomuk) Graf Wilczek (1837 – 1922) die den Vorschlag simultan arbeitender zirkumpolarer Meßstationen an beiden Polen propagierten, siehe [Berger et al., 2008]. Beide waren ebenfalls stark an der Verwirklichung des "Ersten Internationalen Polarjahres" 1882/1883 beteiligt (siehe Abb. A.10). Am 26. November 1969 (UT, Lokalzeit war 27<sup>ter</sup>) – zugleich der Gründertag der nunmehrigen TU-Graz (1811) – flogen erstmals österreichische Komponenten mit Höhenforschungsraketen in die Ionosphäre (Andøya, "Enteninsel", Inselgruppe Vesterålen mit Hauptort Andenes, Norwegen; Start der ersten norwegischen Rakete Ferdinand 1 auf der Andøya Rocket Range am 18. August 1962), unmittelbar nach ESRO 1A ("Aurora", 1968; ESRO 2B "IRIS 2" war der erste von ESOC kontrollierte Satellit), einem der ersten europäischen Satelliten und ESRO 1B ("Boreas", 1969). Im gleichen Jahr wurde auch die Arbeitsgemeinschaft für Weltraumforschung und Technologie (AWFT) gegründet. Genau 15 Jahre später, am 26. November 1984, bekamen Hermann Oberth (1894 – 1989) und Roald Zinnurovich Sagdeev (1932–) das Ehrendoktorat der TU-Graz aus den Händen von Rektor Willibald Riedler (1932–), zugleich Direktor des IWF (1984 – 2001).

Kurze Zeit nach den ersten Raketenstarts erfolgten parallel Mehrpunkt-Ballonkampagnen (4 Stratosphärenballone, jeweils 2 auf 2 Bahnen nord-süd und zeitlich versetzt, Röntgenmessungen mit Szintillationszählern zur Bestimmung der Magnetosphären-Morphologie mittels Sekundäreffekten Elektron-Bremsstrahlung,

Höhe  $h \sim 35$  km) mit Drift nach Westen im Sommer und östlicher Drift im Winter (mit erheblich größerer Streuung in den Bahnen) von Kiruna, Schweden. Im Westen gab es Empfangsstationen im NO Islands (Raufarhöfn), im Osten Ballonlandungen weit gestreut in der Nähe der Städte Narjan-Mar (Bevölkerung der Nenzen), Apatity, Archangelsk, Petrosawodsk (Hauptstadt von Karelien) bis weiter in den Süden nach St. Petersburg. Es etablierte sich eine Zusammenarbeit zwischen ÖAW und der russischen Akademie der Wissenschaften im Zuge von Intercosmos, einer Art "ESA des Ostens". Danach waren es die Satelliten-Missionen Venera 13/14 (1981, 2 idente Vorbeiflug-Sonden zwecks Redundanz und Bestimmung von Variationen, zusätzlich Landesonden) zur Venus (zur gleichen Zeit befand sich die amerikanische PVO Sonde im Orbit um Venus) und eine 5 S/C Flotte zum Kometen Halley (Vega 1/2 mit Start 1984 und Vorbeiflug bei 1P/Halley 1986, ESA Sonde Giotto (Kurt Heftman, 1928 – 2010, war damals ESOC Direktor) und die zwei japanischen Sonden Sakigake und Suisei), zugleich der Komet (1835) aus Johann Nestroy's (1801 – 1862) "Der böse Geist Lumpazivagabundus", sowie 1988 Phobos 1/2 zum Mars mit Beteiligungen vom IWF. Vega konnte erstmalig den Pileup bei Kometen messen und Phobos 2 lieferte überraschende und unerwartete Magnetfelddaten von Mars, aktuelle Messungen zeigen magnetische Lineationen/Streifen (Krustenfelder) in der südlichen Hemisphäre des Planeten.

Betrifft es die Anfänge der Erdbeobachtung und Fernerkundung unseres Planeten Erde stößt man auf Willi (William, Bill) Nordberg (1930 – 1976) und – neben Aktivitäten bei TIROS (Television and InfraRed Observation Satellite), ITOS (Improved TIROS Operational Satellite) und Nimbus – auf seine wissenschaftliche Gesamtverantwortung bei der Landsat Mission, siehe [Besser et al., 2010b] und für aktuelle klimatische Aspekte ab Seite 156 und Tab. A.12. Eng verbunden mit Weltraumaktivitäten in diesem Bereich sind ebenfalls (dieser Auszug ist naturgemäß unvollständig) Rudolf A. Hanel (1922 – 2015) (Voyager, siehe Seite 170), Rudolf A. Stampfl (1926 – 1994), Friedrich O. Vonbun (1925 – 1997), Siegfried J. Bauer (1930–), Friedrich H. Reder (1919 – 2004), Gernot Maria Rudolph Winkler (1922 – 2016) und Karl Kordes (1922 – 2011). Umfangreiche geschichtliche Aspekte, den Weg in den Weltraum und die damit verbundenen Personen, sind dargestellt in [Besser, 2009]. Fotografische Landschaftsaufnahmen aus der Luft zur Erstellung von Karten wurden bereits von Theodor Scheimpflug (1865 – 1911) stark verbessert, Franz Pachleitner (1890 – 1980) war einer der ersten Fliegerfotografen (militärische Aufklärung) im Ersten Weltkrieg. Bekannt ist ebenfalls die Beschreibung einer Flugschau in Italien von Franz Kafka (1883 – 1924) – "Die Aeroplane in Brescia" – eine sehr frühe Schilderung von fliegerischen Aktivitäten aus 1909 inklusive gesellschaftlichem Umfeld. Zu den Pionieren in der Vermessungskunde zählt Joseph Liesganig (1719 – 1799), seine Meridiangradmessung von 1762 – 1767 (Brünn - Varaždin) war durch Arbeiten von Ruder Josip Bošković (1711 – 1787) beeinflusst, siehe [Besser and Eichelberger, 2012] und Kap. A.1.4. In diesen Zeitraum fällt ebenfalls die Erste/Josephinische Landesaufnahme von 1764 – 1785. In gewisser Weise "Mehrpunkt"-Expeditionen waren (i) die erste Weltumsegelung durch Ferdinand Magellan (~1480 – 1521) mit den Schiffen Trinidad, San Antonio, Concepción, Victoria, Santiago, dabei beschrieb er u. a. 1519 die "Magellanschen Wolken", und (ii) die (Wieder)entdeckung Amerikas, die erste Reise von Christoph Kolumbus (1451 – 1506) mit der Santa Maria, Pinta und Niña.

### A.3.2 Mehrpunktmessungen mit Satelliten

#### Vorgängermissionen von Cluster, Prelude

Wenn die Voraussetzungen gegeben waren, dann hatte eine Zusammenführung von Messungen / Daten mehrerer Satelliten (auch Ballonflügen) in der Vergangenheit immer einen hohen Stellenwert. Bereits Ende der 1970'er Jahre war es das "Interplanetary  $\gamma$ -ray burst network" mit bis zu 7 S/C (Helios 2, PVO, Venera 11/12, ISEE 3 (danach International Cometary Explorer – ICE – bezeichnet; Kometenvorbeiflug bei 21P/Giacobini-Zinner im Jahr 1985 aber auch 1P/Halley in großer 0.21 AU Entfernung; Erdnähe 2014 und 2029), Prognoz 7 und HEAO 2) das gemeinsam transiente Vorgänge untersuchte und deren Quellgebiete identifizieren konnte. Beginnend mit 14. Oktober 2014 (Eruption) konnte eine CME sogar von insgesamt 10 S/C im Laufe der Monate (von Venus Express bis zu Voyager2) in-situ beobachtet werden, drei weitere S/C für Sonnenbeobachtung konnten Bilder vom Ereignis machen. Eine Art direkte wissenschaftliche Vorläufermissionen von Cluster waren die NASA / ESA International Sun Earth Explorer 1/2 (ISEE) Programme. Bei diesen Programmen waren nur 2 Satelliten beteiligt, die routinemäßige Zusammenführung von Daten machte begrenzt Sinn, man konnte allerdings keine Vektorinformationen erhalten. Abgesehen

davon – ohne dieses Manko zu kaschieren – war ISEE ein enormer wissenschaftlicher Erfolg und Teile davon gehen auf das Vorhandensein von eben diesen zwei S/C (weder Nutzlasten noch die Satelliten ident bestückt) zurück. Als erfolgreiches Beispiel in der Erforschung der Magnetopause mit ISEE 1/2 (1977), später auch ISEE 3 / ICE (1978), waren die direkte Messung von Rekonnektions-Signaturen und die Identifikation von "flux transfer events" (FTEs). Beide Resultate / Beobachtungen – und in weiterer Folge zum Teil kontroversielle Interpretationen mit verstärkter Forschung in diesem Fachgebiet – können mit einem einzelnen Satelliten nicht gemacht werden. Diese simultanen Beobachtungen auf beiden Seiten der Magnetopause und die Auflösung von komplexeren internen Feldstrukturen waren wegweisend. Damit war der Ehrgeiz, die Forschung in eine neue Epoche zu führen, ausschlaggebend für ambitioniertere Projekte.

### Aktuelle Mehrpunktmissionen

**Cluster, DoubleStar** Die fortschrittlichere Instrumentierung der 4 Cluster-S/C ermöglicht neue, bislang unbekannte, Entdeckungen durch die konsequente Nutzung von simultanen Meßwerten wie sie bei Einzel- oder Dual-Missionen vom Prinzip her nicht möglich wären. Cluster, siehe Kap. A.4, ist fundamental für Mehrpunktmissionen ausgelegt, eine routinemäßige Kombination von Daten ident bestückter Satelliten ist damit gegeben, die beiden Doublestar Satelliten TC1 und TC2 liefern für bestimmte Zeiträume zusätzliche Datensätze. Probleme bei TC1 erschweren die Datenprozessierung beträchtlich, siehe Kapitel 2.4.

**SWARM** Eine 3 Satelliten Mission der ESA zur Bestimmung des Erdmagnetfeldes und dessen Variationen in höchster Auflösung ist SWARM, gestartet am 22. Nov. 2013 von Plessezk, Russland. Weitere Zielsetzungen betreffen u. a. {magneto-, iono- und atmo-}sphärische Prozesse, geodynamische Vorgänge, Kern-Mantel Wechselwirkungen und lithosphärische Felder – besonders Letztere sind wichtig bei seismoelektromagnetischen Vorgängen, siehe Kap. 4.1.4, Seite 46.

**Themis** Die amerikanische Time History of Events and their Macroscopic Interactions during Substorms (Themis) Mission untersucht seit 2007 das zeitliche und räumliche Verhalten von magnetischen Teilstürmen. Das primäre Missionsziel von Themis ist die Bestimmung "wo, wann und wie" ein Teilsturm ausgelöst wird. Fünf identisch bestückte Mikrosatelliten (Sonden) mit genau definierten Orbits in der Nähe des äquatorialen Magnetschweifes liefern ausgedehnte und im Magnetschweif ausgerichtete günstige Konstellationen. In jeder dieser idealen Orbit-Konstellationen soll Themis zwischen 50 – 100 Teilstürme untersuchen können. Umfassende in-situ Teilchen- und Feldmessungen im nahen Weltraum, zusammen mit gleichzeitigen Bodenmessungen vom zeitlichen und räumlichen Verhalten von Polarlichtern, sollen das makroskopische Verhalten von Plasmainteraktionen auf Skalen zwischen  $0.3 - 20 R_E$  ermitteln. Der primäre Fokus von Themis ist das Gebiet zwischen  $8 - 10 R_E$ , der Bereich im Magnetschweif mit dem die Polarlichtzone magnetisch verbunden ist. Obwohl Themis nicht direkt in das Rekonnektionsgebiet des Schweifes kommt, dieser Bereich soll in-situ durch die Mission MMS untersucht werden, ist es trotzdem möglich, den entfernten Beginn von Rekonnektion über das zeitliche Verhalten der Meßgrößen im Zusammenhang mit globaler Zirkulation zu detektieren. Die Prozesse, die mit Themis studiert werden können, sind makroskopischer Natur und komplementär zu MMS. Die beiden äußeren Themis Satelliten P1 und P2 bilden in weiterer Folge (ab 2011) die duale S/C Mond-Mission Artemis.

**TUGSAT-1/BRITE** Eine Nano-Satelliten-Mission (zugleich der erste österreichische Satellit) zur Bestimmung von Helligkeits-Schwankungen bei Sternen ist TUGSAT-1/(bright star target explorer)BRITE-Austria, als "secondary payload" (huckepack; "piggyback") zusammen mit 5 anderen Nutzlasten, darunter auch UniBRITE, am 25. Feb 2013, 13:31 MEZ, mit dem Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV) C20 der Indian Space Research Organization (ISRO) vom Satish Dhawan Space Center (SDSC), Shriharikota, Indien, gestartet.

**MMS** Das Ziel von Magnetospheric Multi Scale (MMS) ist das Studium von Plasmavorgängen im Mikro- bzw. Mesoskalen-Bereich, z. B. von Turbulenzen, in aller erster Linie allerdings magnetische Rekonnektion und damit verbundener jetartiger Beschleunigung von Teilchen. Die NASA Solar Terrestrial Probes Mission besteht aus 4 Satelliten in tetraederförmiger Konfiguration, ähnlich Cluster (Nutzlast Tab. A.13),

allerdings mit wesentlich geringeren Abständen zwischen den S/C. Die Missionsdauer, aufgeteilt in zwei Phasen, beträgt nominell 2 Jahre. Der elliptische Orbit  $1.2 \times 12 R_E$  in Phase 1 dient zur Messung im tagseitigen Rekonnektionsgebiet, der Orbit in Phase 2 beträgt  $1.2 \times 25 R_E$  für nachseitige Rekonnektionsgebiete. Unter den in-situ Teilchen- und Feldmeßgeräten befinden sich u. a. 2 ASPOCs, 2 EDIs und 2 Fluxgate-Magnetometer (analog und digital) pro Satellit. Für ASPOC ergeben sich insgesamt 10 Einheiten, es sind dies 8 Flugmodelle, 1 Engineering- und 1 Flugersatz-Modell, siehe [Torkar et al., 2014], [Torkar et al., 2012], [Eichelberger et al., 2012a]. MMS wurde am 13. März 2015 03:44 CET (Central European Time, mitteleuropäische Zeit, MEZ) von Cape Canaveral, Florida, mit einer Atlas-V Rakete gestartet; Separation von MMS{4,3,2,1} um {05:16, 05:21, 05:26, 05:31} CET. Untrennbar mit diesem Startkomplex verbunden ist das Vehicle Assembly Building (VAB) durch den Zusammenbau der Saturn-V Raketen im Apollo Programm und in weiterer Folge nach Adaptierung die Verwendung bei den Space Shuttles. Anton Tedesco (1903 – 1994), er war maßgeblich bei Entwicklungen von Schalenbauten in den USA (darunter auch das Hayden Planetarium und die Hershey Eishockey Arena), bezeichnet dieses Bauwerk als seine befriedigste Ingenieurarbeit [Schlauch, 1993].

### Zukünftige Mehrpunktmissionen

**Netlander** Nicht unerwähnt in diesem Zusammenhang sei Netlander, [Schwingenschuh et al., 2002] – eine geplante Mehrpunktmission mit 4 Satelliten auf der Oberfläche des Planeten Mars ( $\odot$ ). Jede der vier Oberflächensonden, zusammen bilden sie die Netlander Mission, enthält Instrumente zur Messung des elektrischen und magnetischen Feldes sowie der Permittivität der Oberfläche. Zum ersten Mal sollten niederfrequente elektromagnetische Wellen verwendet werden um direkt von der Oberfläche aus die unterschiedlichen leitfähigen Schichten des Marsbodens zu untersuchen. Diese Daten sind notwendig zur Bestimmung der Schichtstruktur direkt unter dem Landeplatz, ein mögliches Vorkommen von Wasser oder Wassereis (Eis bezeichnet := gefrorenes Gas, "solidified gas", es gibt somit neben Wassereis unterschiedlichste Eisarten, dies ist relevant für die äußeren Planeten und Kometen, siehe Abb. 5.8) als biologische Nischen für Lebensformen – und damit die Chance bzw. Existenz auf Leben im weitesten Sinne – in unmittelbarer Nähe wäre für die Astrobiologie ein Mosaikstein von hohem Nutzen. Chemisch ist Wasser ein hervorragendes Lösungsmittel mit amphoterem Charakter (unterschiedliche Reaktion je nach Stoff, z. B. als Säure – Protonendonator – oder auch als Base – Protonenakzeptor), zudem ist es flüssig dichter als fest. Die Netlander Experimente, darunter das Instrument zur Messung des magnetischen und elektrischen Feldes, untersuchen weiters den Dynamo im Marskern, die physikalische und chemische Beschaffenheit der Oberfläche, die Dynamik der Ionosphäre und die Wechselwirkung zwischen dem Sonnenwind und der oberen Marsatmosphäre.

**Cross-Scale, SCOPE, M<sup>4</sup>, THOR, SMILE** Bei Cross-Scale handelt es sich um eine anvisierte Magnetosphärenmission der ESA im Zuge der Cosmic Vision, SCOPE (in weiterer Folge EidoSCOPE) ist ein Projekt der japanischen Weltraumagentur ISAS. Es wird untersucht wie physikalische Vorgänge über unterschiedliche Skalen (cross-scale, CS) wirken. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen 3 Skalen: (i) auf Elektronenebene (Mikroskala), bestimmt durch den Elektronen-Gyroradius, (ii) Ionenebene (Mesoskala), gegeben durch den Larmorradius der Ionen und (iii) MHD Bereich (Makroskala) mit niedrigen k-Werten und Kontinuum. Turbulenz untersucht primär auf Makroskala das Verhalten und die Wechselwirkung von Teilchenpopulationen mit Feldern. Ein ähnlich angedachtes Projekt respektive Missionskonzept ist M<sup>4</sup> mit den 4 Skalen Fluid, Ionen, Elektronen und Debye, der Fokus liegt hier auf Turbulenzstudien. Die Turbulence Heating Observer (THOR) Mission der ESA (Cosmic-Vision 2015 – 2025) hat ebenfalls Turbulenz als wissenschaftlichen Schwerpunkt, sie ist eine geplante Einzel-S/C-Mission mit umfangreicher Nutzlast zur Plasmabestimmung ab 2026 basierend auf MMS Erfahrung. Ausgerichtet auf Sonnenwind, Magnetosphäre und Ionosphäre ist die Mission Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer (SMILE), eine Zusammenarbeit zwischen Europa und China mit Start 2021.



**Abbildung A.21:** rechte Spalte: Erdefunkstelle (A1 Telekom Austria) Aflenz in Graßnitz, am Fuße des Schießling, ein markanter Berg in unmittelbarer Nähe von Turnau, Stmk.; linke Spalte: ziviles (größeres Radom; Austro Control) und militärisches (Teil der Luftraumüberwachung "Goldhaube") Radar am Großen Speikkogel auf der Koralpe, Kärnten.

## A.4 Cluster

### A.4.1 Hintergrund zur Cluster Mission

Die Cluster Mission wurde der ESA 1982 vorgeschlagen – siehe für diesen Abschnitt [ESA, 1988] – und anschließend ausgewählt, gemeinsam mit Solar & Heliospheric Observatory (SOHO), als das Solar-Terrestrische Wissenschaftliche Programm (Solar Terrestrial Science Programme, STSP), zugleich der erste Eckstein des Horizon-2000 Programmes der ESA. Das "go-ahead" für Cluster-II (nachfolgend wieder umbenannt in Cluster), als Neuauflage der Multi-Spacecraft Mission, erfolgte am 3. April 1997, 10 Monate nach dem Verlust der ursprünglichen Satelliten mit dem Erstflug der fünften Ariane-Generation (der Name ist abgeleitet von Ariadne, einer Göttin der griechischen Mythologie; erinnert sei in diesem Zusammenhang an "Arianna a Naxos" von Franz Joseph Haydn). Für den Status der Rakete nach den ersten Starts siehe [Chemoul et al., 2001]. Cluster-II ist grundsätzlich identisch mit der ursprünglichen Mission, abgesehen von kleineren Modifikationen aufgrund nicht oder nicht mehr verfügbarer Komponenten. Die 4 Cluster Satelliten wurden in fast identischen, polaren Umlaufbahnen plaziert. Das nominelle Apogäum beträgt  $19.6 R_E$ , das Perigäum  $4 R_E$ . Durch den gewählten Orbit durchlaufen die Satelliten im Laufe eines Jahres praktisch alle relevanten Plasmaregionen in der Erdumgebung.

Jeder Cluster Satellit hat seine eigene Antriebsstufe um Bahnmanöver durchführen zu können, z. B. auch um vom geostationären Transfer-Orbit (GTO) in die polare Umlaufbahn zu gelangen. Die Antriebsstufen werden ebenfalls verwendet um die in-orbit Konstellation zu variieren, d. h. der Abstand zwischen den vier Satelliten wird verändert, siehe [Dow et al., 2004]. Das ist notwendig, um auf unterschiedlichen räumlichen Skalenlängen die Eigenschaften vom Weltraumplasma zu untersuchen. Dieser relative Abstand verändert sich von einigen hundert Kilometern, z. B. im Jahr 2003, bis zu einigen Erdradii, siehe Abb. A.22. Cluster II hat die ursprünglichen Missions- und Bahnparameter beibehalten. Zwei Raketen, jede trägt ein Satellitenpaar, den sogenannten Nutzlaststapel ("payload stack"), transportierten die Satelliten in einen niederen zirkularen Orbit,  $\sim 250$  km hoch mit einer Inklination von  $51.8^\circ$ . Die "kick"-Stufe vom Nutzlaststapel liefert die Energie um das Apogäum auf  $18.000$  km zu erhöhen. Danach erfolgt die Separation von dieser Stufe und jeder Satellit für sich bringt sich mit der eigenen Antriebsstufe in den finalen  $4 \times 19.6 R_E$  Orbit. Kurzfristig nach dem Fehlstart von Cluster am 4. Juni 1996 war eine Ersatzmission mit Namen "Phönix" im Gespräch. Dabei handelte es sich um das verbliebende Strukturmodell, ursprünglich Cluster 5 genannt. Ein Start des Einzelsatelliten Phönix hätte allerdings in keinster Weise das wissenschaftliche Ziel der Mission erreichen können, er wurde aber in Betracht gezogen um Europa als Partner im International Solar Terrestrial Physics (ISTP) Programm zu halten.

Realistischerweise gab es nach dem Fehlstart zwei Szenarien um die wissenschaftlichen Ziele zu erreichen:

- Cluster-II Option 1: Volle Implementierung von Cluster durch drei oder vier neue Satelliten von Dornier, d. h. eine Neuauflage der Cluster Mission.
- Cluster-II Option 2: Ersatzmission durch nationale kleinere Satelliten, d. h. das Fundament bildet Phönix zusammen mit drei kleineren, national finanzierten, Satelliten.

Die Neuauflage von Cluster, sei es Option 1 oder Option 2, würde allerdings nur dann durchgeführt wenn die nationalen Weltraumbehörden die Finanzierung zum Neubau und Betrieb der Nutzlasten sicherstellen. Im vorhin erwähnten Meeting am 3. April 1997 billigte das Science Programme Committee (SPC) Cluster-II in der Option 1 mit einem finanziellen Rahmen von 214 Million Accounting Units (MECU). Der Start sollte, abweichend vom ursprünglichen Szenario, nunmehr mit zwei russischen Soyuz Raketen erfolgen – das "go-ahead" zur sofortigen Implementierung der Mission war damit gegeben. Als industrieller Partner fungierte wiederum Dornier. Phönix wurde ein integraler Bestandteil von Cluster-II, einige der Subsysteme wurden modifiziert um identisch mit dem neuen Satz von Satelliten zu sein. Die russischen Soyuz Raketen wurden vom Starsem Konsortium vermarktet, damals bestehend aus Aérospatiale, Arianespace und zwei russischen Firmen. Cluster war ebenfalls Teil einiger internationaler Aktivitäten organisiert in der Inter Agency Consultative Group (IACG) bestehend aus ESA, ISAS, NASA und der Russischen Weltraumbehörde. Während des IACG Workshops in Graz im April 1993 wurden mehrere Kampagnen definiert um Weltraumplasmen zu untersuchen.

Das nachstehende Kapitel A.4.2 beleuchtet nochmals die wissenschaftlichen Zielsetzungen der Multi-

Akronym & Principal Investigator (PI) ursprünglich – aktuell & Instrument & Parameter
FGM, Fluxgate Magnetometer. . . A. Balogh – C. Carr, England $\vec{B}$ , $(\delta B)^2/B^2$ , $(\delta B )^2/B^2$ , FGM status, Eventzeit (Epoch time)
EDI, Electron Drift Instrument . . . G. Paschmann – R. B. Torbert, Deutschland – USA $\vec{E}$ , $\vec{v}_{ed}$ , EDI status, Eventzeit
ASPOC, Active Spacecraft Potential Control experiment. . . W. Riedler – K. Torkar, Österreich $I_{Ion}$ , ASPOC status, Eventzeit
STAFF . . . N. Cornilleau-Wehrin – P. Canu, Frankreich Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation experiment $B_{\parallel}$ , $B_{\perp}$ , $\mu$ , 0.3-10, 10-180, 180-4000 Hz, $B_{Power}$ , 0.3-10, 10-180, 180-4000 Hz $E_{Power}$ , 10-180, 180-4000 Hz, STAFF status, WEC status, Eventzeit
EFW, Electric Field and Wave experiment. . . Mats André, Schweden $E_{dusk}$ , $\sigma_E$ , $v_{PS}$ , $I_{Probe}$ , $E_{Power}$ , 0.3-10, 10-180 Hz Elektrisches Feld (down-dusk), Variationen im elektr. Feld, Probe-S/C-Spannung, Probenstrom
DWP, Digital Wave Processing experiment. . . H. Alleyne – M. Balikhin, England Significance level $v_{max}$ , $P(v)$ , DWP status, WEC status, Eventzeit Sign. level freq. $v$ und Energie $P$ der stärksten Komponente
WHISPER . . . P. Decreau – J.-L. Rauch, Frankreich Waves of High frequency and Sounder for Probing Electron density by Relaxation experimnt $n(e)$ quality, $E_{Power}$ , 4-10, 10-20, 20-80 kHz, $E_{Power}$ 4-80 kHz $E_{Variance}$ , 2-80 kHz, WHISPER status, WEC status, Eventzeit
WBD, Wide Band Data instrument. . . D. Gurnett – J. Pickett, USA WBD status, WEC status, Eventzeit
PEACE, Plasma Electron And Current Experiment. . . A. Fazakerley, England $n(e)$ , $\vec{v}(e)$ , $T_{\parallel}(e)$ , $T_{\perp}(e)$ , $Q_{\parallel}(e)$ , PEACE status, Eventzeit Elektronendichte, Geschwindigkeit, Temperatur, Wärmefluß
CIS, Cluster Ion Spectrometry experiment. . . H. Rème – I. Dandouras, Frankreich $n(p)$ , $n(O^+)$ , $n(He^+)$ , $n(He^{++})$ , $n(HIA)$ , $\vec{v}(p)$ , $\vec{v}(HIA)$ , $\vec{v}(O^+)$ , $T_{\parallel}(p)$ , $T_{\perp}(p)$ , $T_{\parallel}(HIA)$ , $T_{\perp}(HIA)$ , CIS status, Eventzeit Teilchendichte, Geschwindigkeitsvektor, Temperatur, Hot Ion Analyser (HIA) mißt wicht. Ionenarten
RAPID, Research with Adaptive Particle Imaging Detectors. . . P. Daly, Deutschland $J_{low}(s)$ , $J_{hi}(s)$ , $s = e, p, He$ , Masse $> 4$ , $A_{\parallel}(e)$ , $A_{\parallel}(p)$ , RAPID status, Eventzeit Teilchenfluß, 2 Energiebereiche, 4 Ionenarten, A feldpar. Anisotropie Teilchenfluß, 2 Spezien
WEC, Wave Experiment Consortium . . . Vorsitzender P.A. Lindquist, Schweden kombinierte Aktivitäten von DWP, EFW, STAFF, WBD und WHISPER Hilfsparameter in SPDB $\vec{R}_1$ , Position von S/C 1, $\Delta\vec{R}_n$ , $n = 2, 3, 4$ , relative Position zu S/C 1 $Q_G$ , $Q_R$ , $\min(\Delta\vec{R}_{ij})$ , $\max(\Delta\vec{R}_{ij})$ , Tetraeder Qualitätsparameter $\Theta_{S/Cn}$ , $\Phi_{S/Cn}$ , $n = 1, 2, 3, 4$ , Spin Achsen in GSE, Dipol Neigungswinkel, S/C status, Eventzeit

**Tabelle A.13:** Akronyme, Nutzlasten der vier ident bestückten Cluster Satelliten, Principal Investigators (Mission Manager und Project Wissenschaftler ist C. P. Escoubet) und Meßgrößen, siehe [Schmidt et al., 1997].

Satelliten-Mission Cluster, beurteilt den Status der Nutzlasten und zeigt einige der Aktivitäten im Zusammenhang mit Cluster.

#### A.4.2 Wissenschaftliche Zielsetzungen von Cluster

Cluster war die erste erfolgreiche Satellitenmission welche die 3D Natur von kleinräumigen Plasmaphänomenen in der Magnetosphäre und im weiteren erdnahen Weltraum erforscht. Die wissenschaftliche Zielsetzung der Cluster Mission wurde erstmals im Detail durch ESA's "Assessment and Phase A studies" im Zeitraum von 1983 – 1985 definiert, danach im Laufe der Zeit kontinuierlich verfeinert und während der Entwicklung des Projektes weiter vertieft, ganz im Sinne des Systems Engineerings Kap. C.1. Cluster ist mehr als einer Dekade erfolgreich im Orbit und nach wie vor ein Eckpfeiler der Plasmaphysik des erdnahen Weltraumes, sowohl was Meßdaten als auch Publikationen in diesem Forschungsgebiet betrifft. Die nachstehende Liste der wissenschaftlichen Zielsetzungen von Cluster, zusammen mit den Bereichen in Erdnähe, stammt vom "Phase A study report" [ESA SCI (85) 8, December 1985]. Diese Zielsetzungen, kollektiv und individuell, haben ihre volle Gültigkeit und keine andere Mission konnte bis 2007 (Themis, Seite 191 und nunmehr MMS) auch nur annähernd solche Fragestellungen beantworten.

- Physik von Grenzschichten zwischen zwei Plasmen und Prozesse für Massen-, Impuls- und Energie-Transfer durch die Grenzschicht, z. B. Rekonnektion an der tagseitigen Magnetopause, im Cusp oder im Erdmagnetschweif (z. B. Dipolarisierungsfronten [Schmid et al., 2016] oder der Rekonnektions-Schwerpunkt von MMS, speziell die "electron diffusion region"),
- Beschleunigungen während großräumiger Rekonfigurationen von Plasmen und damit verbundener elektromagnetischer Phänomene,
- Studium von MHD Turbulenz, Wirbelbildung und Diffusion im Sonnenwind, tagseitigen Cusp, Magnetopause und Grenzschichten der Plasmaschicht,
- Struktur und Eigenschaften von stoßfreien Schockwellen, damit verbundener Teilchenbeschleunigung und Erzeugung von Wellen, z. B. Bugstoßwelle oder interplanetarer Schock,
- Mikrostruktur von Plasmen und Feldern im Sonnenwind als in-situ Beispiel eines stellaren Windes.

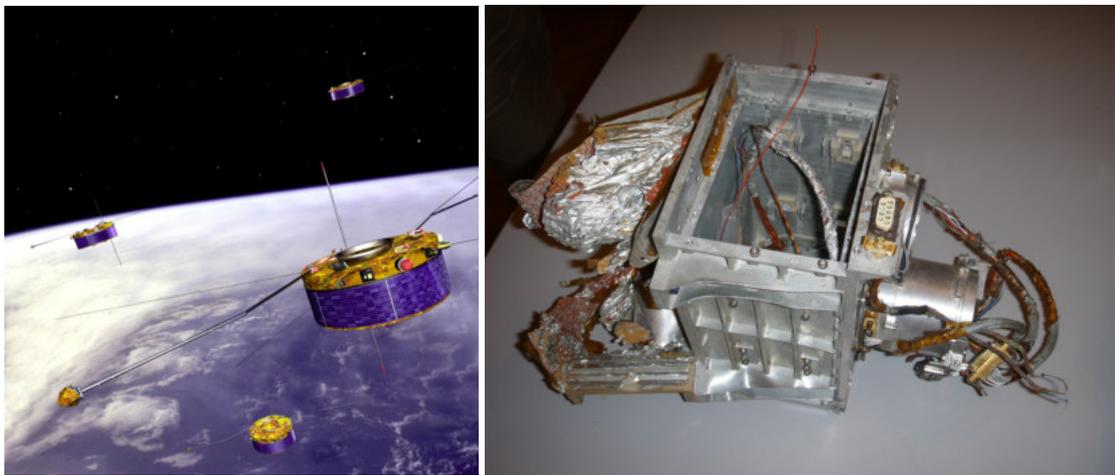
Um die oben genannten Zielsetzungen zu erreichen, sind Mehrpunkt-Messungen von Plasmapopulationen und Feldern notwendig. Das Ganze passiert auf räumlichen Skalen von einigen hundert bis einigen tausend Kilometern um die zeitlichen und räumlichen Variationen unterscheiden und Vektorparameter für Plasmaprozesse auf diesen charakteristischen Skalen ableiten zu können. Die Cluster Mission ist aufgrund ihrer Konzeption und Implementierung optimiert um diese Zielsetzungen zu erreichen. Cluster war und ist Teil vom wissenschaftlichen Solar-Terrestrischen Programm, einem Eckstein von ESA's "Horizons 2000 scientific programme". Dieses Langzeitprogramm, zusammen mit "Horizons 2000 +" und "Cosmic Vision" [ESA, 2005], wird durch die Missionen SOHO, Rosetta, XMM-Newton, Integral, Smart-1, Venus Express, Mars Express und zuletzt Herschel und Planck komplettiert.

#### A.4.3 Cluster Nutzlast

Wenige Satelliten für Magnetosphärenphysik vor Cluster waren in der Nutzlast ähnlich performant bestückt wie jeder einzelne Satellit von Cluster. Keine Weltraummission in der Vergangenheit (siehe Kap. A.3.2) war ausgerichtet um Mehrpunktmessungen durchzuführen, d. h. in diesem Fall ein koordinierter Flug von vier Satelliten in Tetraederkonfiguration, siehe Abbildung A.22. Sämtliche Instrumente der Cluster Nutzlast sind genauestens und bestmöglich kalibriert um differentielle Größen von Parametern darstellen zu können. Unterschiede zwischen Parametern auf den vier Satelliten liefern Gradienten und ermöglichen die Bestimmung von Flußgrößen und die Transporteigenschaften von physikalischen Größen – besonders die unterschiedlichen Formen von Energie und Impuls in Teilchenpopulationen und den damit verbundenen Feldern. Mit diesen exakt kalibrierten Instrumenten von Clustern sind damit qualitativ neue Messungen in Weltraumplasmen möglich, es ergeben sich erstmals interferometrische Möglichkeiten.

Um das Ziel der Cluster Mission zu erreichen sind bestimmte Anforderungen an die Instrumente, d. h. die

Nutzlast, den Satelliten und an das Handling während der Missionsdauer zu stellen. Damit sind inhärente Genauigkeiten und Sensitivitäten für spezifische Messungen im Plasma gegeben: (i) Die hohen Anforderungen in der Interkalibration der Instrumente auf den unterschiedlichen Satelliten, (ii) an die magnetische [Feldhofer, 2003], elektromagnetische und elektrostatische Reinheit des Satelliten (siehe Kap. B.1), (iii) an die Bestimmung und Stabilität der mechanischen Komponenten und deren Ausrichtung zueinander, (iv) an die Genauigkeit der zeitliche Auflösung der einzelnen Messpunkte, (v & vi) an die Genauigkeit der Ausrichtung und Position der einzelnen Satelliten im Orbit. Drei Instrumente der Cluster Nutzlast messen direkt die Eigenschaften der geladenen Teilchen entlang des Orbits, nämlich CIS, PEACE und RAPID. Die Gradienten der Messungen dieser Instrumente auf den vier Satelliten führen zur direkten Bestimmung von weiteren physikalischen Parametern, siehe Kap. C.3.3: Der Massen- und Wärmefluß sowie Impulsänderungen von Ionen und Elektronen im Plasma, Druckgradienten im Plasma, Schubspannungen in der Strömung und Strömen im Plasma. Die aktive Potentialkontrolle des Satelliten durch das Experiment ASPOC ermöglicht die zuverlässige Messung von niederenergetischen Teilchen durch Beseitigung der Aufladung der S/C im Plasma ("Erdung des Satelliten"), siehe [Torkar et al., 2005a], [Torkar et al., 2005b] und [Torkar, 1998], [Schmidt, 1994]. Die Instrumente FGM und EFW erlauben die direkte Messung des magnetischen und elektrischen DC Feldes. Daraus berechnen sich durch Differentiation die Flüsse, Impulse und Energien des elektromagnetischen Feldes. Die elektromagnetische und magnetische Reinheit der vier Cluster Satelliten ist außerordentlich gut verglichen mit Vorgängermissionen und ermöglicht Messungen der Felder mit höchster Präzision. Die Fähigkeit des Elektronen-Drift-Instrumentes EDI erlaubt die Bestimmung des elektrischen Feldes mit hoher Genauigkeit. Zusätzlich lassen sich direkt die Gradienten des magnetischen Feldes messen. Für einen Vergleich zwischen EFW und EDI siehe [Eriksson et al., 2006]. Die Plasmainstrumente EFW, STAFF, WHISPER und WBD, zusammengefasst im Wellenexperiment-Konsortium WEC durch den Digital Wave Processor DWP, untersuchen lokal und entfernt liegende Strukturen im Plasma und liefern Beobachtungen von Welle-Teilchen Interaktionen. Weiters messen diese Instrumente einen großen Bereich an Wellen und Turbulenzen. Im stoßfreien Medium wird dadurch Energie und Impuls zwischen den einzelnen Teilchen und Teilchenarten umverteilt. Zusätzlich kann der Energiefluß, durch Differenzierung des Wellensignals, auf einfache Art und Weise lokal gemessen werden. Durch Interferome-



**Abbildung A.22:** Tetraederförmige Konfiguration der 4 Cluster Satelliten, künstlerische Darstellung und Separation der vier Cluster S/C im Laufe der bisherigen Mission. Die Tetraederkonfiguration variiert ebenfalls entlang des Orbits. Am 19. Sep. 2013 betrug der Abstand zwischen C1 und C3 nur 4 km, die Genauigkeit in der Bahnbestimmung ist besser als 100 m. Im Jänner 2015 war die Entfernung zwischen zwei S/C nur 6 km (5000 km für die beiden anderen Satelliten), Ziel ist die Untersuchung des dynamischen Sonnenwind-Verhaltens direkt über der Bugstoßwelle. © ESA. rechte Seite: ASPOC Instrument auf Cluster nach dem Fehlstart (Explosion) der Ariane 501 im Jahre 1996 und anschließender Bergung aus dem Sumpf in Französisch-Guayana; siehe ebenfalls Tab A.13 und Abschnitt A.3.2.

trie können diese Untersuchungen auf entfernt liegende Gebiete ausgedehnt werden. Summa summarum lässt sich feststellen, daß in der Erforschung von Weltraumplasma mit den Cluster Instrumenten ( $4 \times 11$ ) durch die Kombination von Daten eng benachbart fliegender Satelliten neue Möglichkeiten eröffnet wurden. Die Vektorparameter in unterschiedlichen Konstellationen der vier Satelliten werden mit Zusatzinformationen komplettiert. Damit entstehen neue und umfangreichere Klassen an Datensätzen, siehe Kap. C.3. Die (i) Identifikation und Charakterisierung von Wellen, (ii) Energie- und Impulsübertragung, (iii) Dissipation von Energie (Plasma-, elektrische- und magnetische Messungen) und (iv) Prozesse der Wellenerzeugung (Wellen- und Plasma-Verteilungsmessungen) werden bestimmt. Zusätzlich werden die Instrumente kontinuierlich im Orbit nachkalibriert, um die Genauigkeiten in den Differenzmessungen – wie sie für Vektorparameter benötigt werden – sicherzustellen (tägliche Cal-Files für FGM). An die Zuverlässigkeit der Instrumente werden höchste Anforderungen gestellt, siehe Tab. A.12. Ausgedehnte Testprogramme, sowohl auf Instrumenten- als auch auf Systemebene, vom Engineering Modell bis zu den Flugmodellen und des Satelliten selbst, sichern die Funktionalität in allen Bereichen dieser solar-terrestrischen Mission.

#### A.4.4 Cluster Orbit und Missionsplan

Ein polarer Orbit, mit einem Apogäum von 19.6 RE (Erdradien), überdeckt die wichtigsten Regionen, d. h. Bugstoßwelle, Magnetosheath, Magnetopause, Cusps und der Magnetschweif sind inkludiert. Die in-orbit Konfiguration der vier Satelliten (unter den Randbedingungen der limitierten Ressourcen der S/Cs, z. B. für Orbitkorrekturen) ist ein extrem wichtiger Parameter, er bestimmt die räumlichen und auch zeitlichen Skalen auf denen Phänomene in der Magnetosphäre während der Mission untersucht werden können. Dementsprechend wurde ein beträchtlicher Aufwand betrieben um die optimale Konfiguration in den unterschiedlichen Missionsphasen eruieren zu können. Das Resultat waren mehrere Bereiche an räumlicher Separation, siehe schematische Darstellung in Abbildung A.22, von einigen hundert bis zu einigen tausend Kilometern, mit einer symmetrischen Tetraederkonfiguration an signifikanten Stellen entlang des Orbits. Die natürliche Variation des Tetraeders entlang der Bahn liefert die zusätzliche Möglichkeit diese Längenänderungen zum Studium des anisotropen Verhaltens des Plasmas in anderen Bereichen der Magnetosphäre zu nutzen, z. B. im Magnetosheath.

#### A.4.5 Satelliten und Nutzlast Operationen während der Mission

Der ständige Betrieb und die Kontrolle der vier Cluster Satelliten wird beim Europäischen Raumflugkontrollzentrum (European Space Operations Centre, ESOC; Inauguration am 8. September 1967) der ESA in Darmstadt durchgeführt, i. d. R. sind keine Nutzlastoperationen in Echtzeit vorgesehen. Während der nominellen zweijährigen Missionsdauer (inzwischen in erweiterten Phasen bis zumindest Ende 2018) dienen zwei Bodenstationen, für bestimmte Operationen auch die Antennen des DSN, als Empfangs- und Sendeeinheit um den Telemetrie- und Telekommand-Verkehr abzuwickeln. Bereits im Februar 2002 genehmigte das ESA SPC eine Verlängerung der Mission um 35 Monate, damals bis Ende 2005, weiters wurde mit einer zweiten Bodenstation ein höheres Datenvolumen ermöglicht und damit die volle Abdeckung des Orbits sichergestellt. Ein aufwendiges Programm für die Missionsplanung wurde implementiert um die Ressourcen der einzelnen Satelliten optimal nutzen zu können. Die Instrumententeams bereiten die detaillierten Operationen zusammen mit dem Joint Science Operations Centre (JSOC, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, England) einige Wochen im Voraus vor. Diese Pläne werden in mehreren Iterationsschritten verfeinert bis letztendlich die Telekommandos zum Satelliten gesendet und einige Stunden bis Tage später ausgeführt werden. JSOC hat somit die Aufgabe der Koordination und Optimierung der Sequenzen zur Kommandierung der Instrumente um den "master science plan" (MSP) zu implementieren. Weiters liefert JSOC das Interface zur Koordination von Cluster mit bodengestützten Beobachtungen und auch anderen Magnetosphärenmissionen.

#### A.4.6 Datensystem von Cluster

Bei der Umsetzung der wissenschaftlichen Zielsetzungen von Cluster sind die vielfältigen Anforderungen an das Datensystem der Mission zu berücksichtigen, besonders an die Datenreduktion und die allgemeine Handhabung der Daten. Das Handling und die Verteilung der Daten waren zu Beginn des Horizont

2000 Programmes eine technologische und logistische Herausforderung. Ursprünglich wurden die Rohdaten zentral gespeichert und mittels CDs weiterverteilt. Die Pakete kamen in regulären Abständen, pro Paket der vollständige Satz an Daten für einen Tag – in etwa 2 – 3 CDs bis Ende 2005. Damit wurden den beteiligten Wissenschaftlern idente Datensätze zur Verfügung gestellt. In weiterer Folge handelt es sich nicht nur um die Prozessierung und Analyse der Instrumentendaten aller Einzelsatelliten, diese Bits-und-Bytes dienen als Grundlage zur Aufbereitung von Vektorparametern aus dem gesamten 4 S/C Ensemble. Dieses Verarbeitungskonzept, leicht adaptiert im Laufe der operativen Phase, besteht bereits seit der ursprünglichen Cluster Mission von 1996.

Das Hauptprogramm einer Infrastruktur zur Datenprozessierung & Verteilung ist das Cluster Science Data System (CSDS), implementiert in Zusammenarbeit zwischen nationalen Datenzentren und der ESA. Sechs nationale Zentren – England, Frankreich, Deutschland, Schweden, Ungarn und Österreich – sind über ein Netzwerk, das CSDSNet, verbunden. Prozessierung, Datenaustausch und Speicherung von validierten Daten aller Cluster Instrumente erfolgt in diesem Verbund. Zwei weitere Datenzentren, in den USA und China, empfangen Daten von CSDS zum Zwecke gemeinsamer Forschungsvorhaben. Die Zielsetzung ist damit erreicht: Allen beteiligten Wissenschaftlern und Institutionen einen raschen Zugriff auf validierte Daten aller Instrumente über ein webbasiertes User Interface zu ermöglichen, darunter auch die weltweite Solar-Terrestrischen Gemeinschaft (Kap. A.2.5) mit der Schnittstelle für den Austausch mit Dritten. Die Investitionen in die Software und in deren Stabilität sind ein wichtiger Baustein der Mission, zur Eingliederung der Daten in ein Schichtenmodell siehe Abb. A.16. Das CSDS als optimierte "state-of-the-art" Infrastruktur für die Mission sichert die hohe Qualität der Datenprodukte, seien es Plasmamomente oder Parameter von Feldinstrumenten aller 4 Satelliten in Prime Parameter (PP) mit etwas mehr als 4 Sekunden zeitlicher Auflösung und stellt sie weltweit online zur Verfügung. Das Cluster Active Archive (CAA) stellt seit Februar 2006 (Beginn im Jahr 2004) hochaufgelöste Daten zur Verfügung, das Cluster Science Archive (CSA) übernimmt die Langzeit-Archivierung und stellt die Schnittstelle zu den Daten her. Missionen wie Venus-Express archivieren wissenschaftliche Daten im ESA Planetary Science Archive (PSA), basierend auf NASA's Planetary Data System (PDS). Generell ist die Koordinierung der einzelnen Instrumente untereinander von entscheidender Bedeutung, damit wird in Schlüsselbereichen der Magnetosphäre ein kombinierter Datensatz erzielt und die Berechnung von Vektorparametern ohne Interpolation von Messwerten sichergestellt.

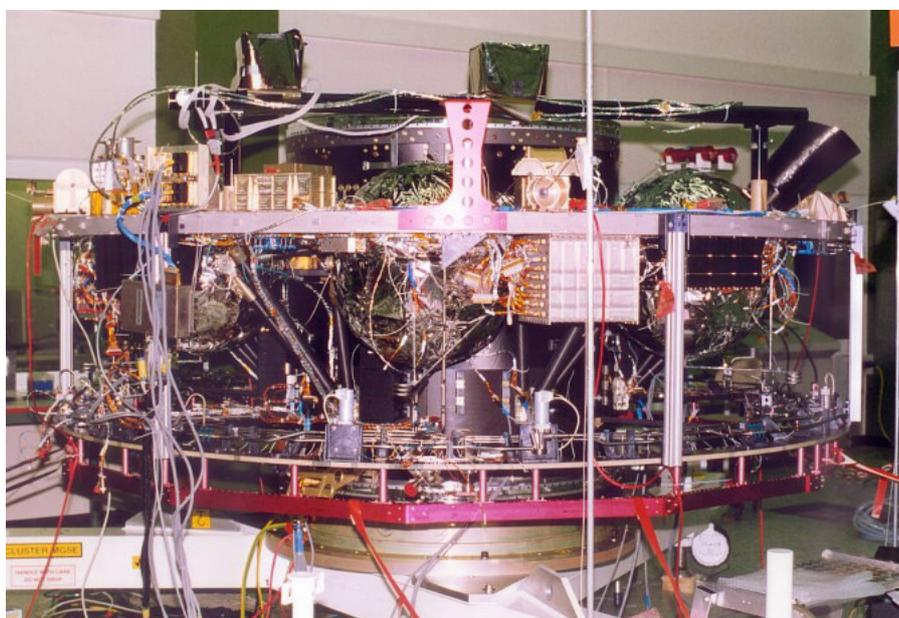
#### A.4.7 Wissenschaftliche Vorbereitungen und bodengestützte Messungen

Parallel mit den Vorbereitungen der Instrumente und der Satelliten auf technischer Seite wurde ein beträchtliches wissenschaftliches Programm für die Cluster Mission durchgeführt. Diese Arbeiten zielten in unterschiedliche Richtungen: Von Computer-Simulationen zur numerischen Modellierung der Magnetosphäre und den Phänomenen von Weltraumplasmen in der Erdumgebung am Orbit von Cluster bis zur Entwicklung von Werkzeugen zur Datenanalyse der Experimente, beginnend vom Einzelinstrument bis zu Multi-Instrument und Multi-S/C Softwarepaketen. Diese Programme zur Diagnostik von Plasmen durch Mehrpunktmessungen erlauben Vergleiche zwischen Theorie und Messung entlang der vier S/C-Trajektorien. Gleichzeitig werden die Modelle verwendet um Fehlerquellen zu evaluieren, sowohl bei einzelnen Instrumenten als auch bei den S/Cs (Position, Ausrichtung, Unsicherheiten bezüglich des genauen Timings bei den Messungen). Resultate von Simulationen wurden verwendet um optimale Strategien für die Separation der einzelnen Satelliten zu erzielen. Bei diesen Vorbereitungsarbeiten wurden sukzessive immer bessere Modelle der Magnetosphäre erzielt, das erleichterte sowohl die Planung und steigerte zudem das Verständnis der Beziehungen zwischen bodengestützten Messungen und Satellitenbeobachtungen. Eine Anzahl an Konferenzen und Workshops konkretisierte wissenschaftliche Zielsetzungen, die Berichte dazu, u. a. publiziert von der ESA, sind nach wie vor wichtige Referenzquellen für elementare Fragestellungen in der Magnetosphärenphysik. Nicht unerwähnt in diesem Zusammenhang sei ein Workshop speziell für Untersuchungen des Erdmagnetschweifes (Graz, 2003) und die 9. Internationale Konferenz über magnetische Teilstürme (ICS9) auf Schloß Seggau im Mai 2008. Publikationen und Artikel vom International Space Science Institute (ISSI) zeigen die Fülle an Möglichkeiten von Mehrpunkt-Messungen, ein Schwerpunkt ist die Cluster Mission, [Paschmann and Daly, 1998], [Paschmann and Daly, 2008]. Diese wissenschaftlichen Aktivitäten liefern ein sehr gutes Fundament für die Mission, sie ermöglichen einer breiten Palette von Technikern und Wissenschaftlern eine Grundlage für ihre Arbeiten und sind unverzicht-

bar für ambitionierte Zielsetzungen und Forschungen im solar-terrestrischen Bereich. Die Cluster Mission war eine Initialzündung zur Umsetzung von koordinierten boden- und satellitengestützten Beobachtungen, darunter auch die Chimag Mission des IWF, siehe [Magnes, 1999]. Chinese Magnetometer – Chimag – und in weiterer Folge das South European Geomagnetic Array (SEGMA) – als Magnetometerketten (siehe Tab. 4.1) liefern wertvolle komplementäre Daten, erstere hervorgegangen aus Kooperationen mit dem Center for Space Sciences and Applied Research (CSSAR) in China seit 1997 (zurückreichend bis 1977). Die etablierte Aktivität und enge Zusammenarbeiten zwischen den Teams brachte den erwünschten Erfolg, die Analyse sich ergänzender Datensätze war von dauerhaftem wissenschaftlichen Nutzen.

#### A.4.8 Cluster Satelliten

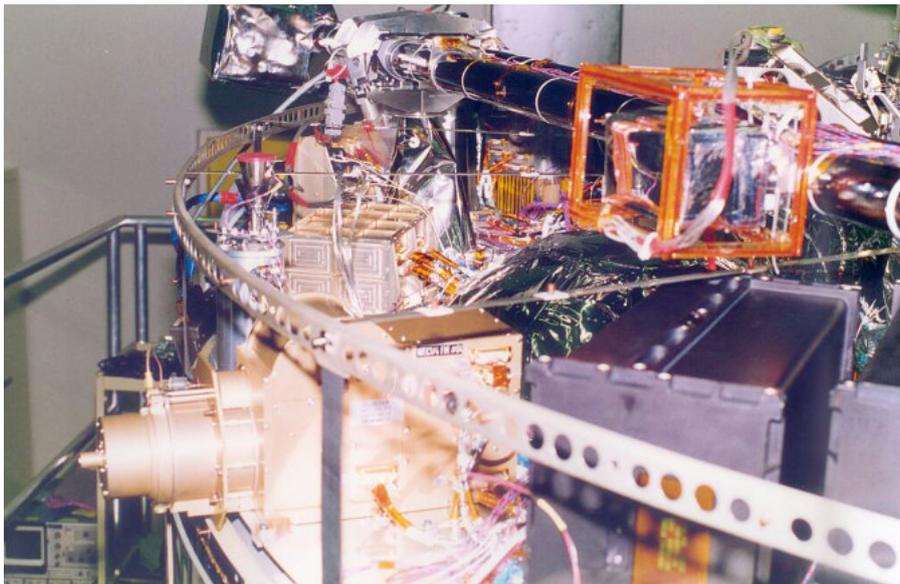
Die technischen und wissenschaftlichen Anforderungen an die Mission wurden erfolgreich in das Design von Cluster und bei allen 11 Instrumenten der Nutzlast eines jeden Satelliten umgesetzt. Das Profil der Mission, ausgedrückt in den Anforderungen um den Orbit zu erreichen, die Konstellation der Satelliten untereinander zu erhalten, die thermischen Gegebenheiten einzuhalten und die Kommunikationsverbindungen sicherzustellen, ist herausfordernd, schwierig zu erreichen, durch viele Tests sichergestellt, verifiziert und in der langjährigen Praxis etabliert. Die magnetische und elektromagnetische Reinheit des Satelliten und der Nutzlasten – eine vitale Anforderung für eine Magnetosphärenmission – wurde durch umfangreiche Tests und Verbesserungen sichergestellt. Am IWF wurden detaillierte Untersuchungen im Bereich der magnetischen Reinheit durchgeführt und grundlegende Arbeiten auf diesem Gebiet geleistet, siehe [Feldhofer, 2003]. Jeder der vier Cluster Satelliten hat eine zylindrische Form mit einem Durchmesser  $\varnothing$  von 2.9 m und Höhe 1.3 m. Die Startmasse jedes Satelliten beträgt 1200 kg. Ein innerer Zylinder umschließt den Raketenmotor jeder S/C, mit ihm wird der finale Orbit –  $4 \times 19 R_E$ ,  $90^\circ$  Inklination – erreicht und Korrekturen der Bahn können durchgeführt werden. Die 650 kg an Treibstoff für den Motor, aufgeteilt auf 6 sphärische Tanks (Haupttriebwerk 400 N; 8 Triebwerke 10 N), tragen mehr als 50 % zum Gewicht bei. Acht kleine Düsen ermöglichen die Ausrichtung und das Verhalten des Satelliten im Orbit zu kontrollieren.



**Abbildung A.23:** Cluster Spacecraft in offener Ansicht ohne Solarzellenbestückung an der Mantelfläche der Zylinderstruktur. © Özer

Die Solarzellen sind auf der Mantelfläche des Satelliten angebracht. Die Spinperiode der Satelliten be-

trägt etwas mehr als 4 Sekunden, die Spinrichtung ist senkrecht zur Achse Satellit-Sonne. Während einer Rotation sind unterschiedliche Solarzellen der Strahlung der Sonne ausgesetzt, am Beginn der Mission liefern sie in Summe knapp mehr als 300 W Leistung, durch Strahlungsbelastung und Alterung sinkt die verfügbare Leistung. Sie reicht allerdings aus um die nominelle Lebensdauer der Mission von 2 Jahren bei weitem zu überschreiten, inzwischen ist die Mission bereits im 17-ten Jahr und somit über einer vollständigen 11-jährigen Periode des Sonnenzyklusses. Seit 2010 können die Batterien nicht mehr benutzt werden, die S/Cs müssen somit bei Eklipsen vollständig ab- und danach wieder an-geschaltet werden. Der Spin der S/C,  $\sim 4$  Sekunden, stabilisiert den Satelliten und hält die vier Ausleger des EFW Experimentes (50 m Kabel) in ihrer vorgesehenen Konfiguration. Die zwei festen Ausleger, wiederum in radialer Richtung, von jeweils 5 m tragen die Sensoren von FGM, siehe Abbildung A.24 und STAFF.



**Abbildung A.24:** Spacecraft Ausleger (Boom) im eingeklappten Zustand mit Magnetometer-Box und den beiden drei-achsigen Fluxgate Sensoren. © Özer

Der zentrale Zylinder mit einer Plattform teilt den Satelliten in zwei Hälften. Die meisten Sensoren mit ihren Elektronikboxen besetzen den oberen Teil, siehe Abb. A.23; Housekeeping, Kontrolleinrichtungen und das Telekommunikations-Paket die untere Hälfte. Der satelliteneigene Raketenmotor sitzt innerhalb des zentralen Zylinders, zwei Antennen zur Kommunikation mit den Bodenstationen wurden in axialer Richtung im Orbit aufgeklappt. Der Nachbau aller Cluster Satelliten minimierte die Risiken der Mission, das Design und die Testprozeduren konnten übernommen und verfeinert werden, siehe Seite 194. Im Jahr 2000, zu Beginn des Millenniums, wurden die 4 Cluster S/C paarweise mit zwei russischen Soyuz Raketen in den Orbit transportiert. Abbildung A.25 zeigt die Rakete unmittelbar nach dem lift-off. Die Fregat-Oberstufe mußte vorher spezifiziert werden. Beim Fehlstart der Ariane 501 im Jahre 1996 waren alle vier S/C als Nutzlast auf einer einzelnen Rakete. Gemäß der Raketengleichung (Ziolkowski Gleichung) hängt die theoretisch erreichbare Endgeschwindigkeit einer Rakete

$$v_{id} = c_e \ln \frac{m_0}{m_b} \quad (\text{A.248})$$

nur von der effektiven Geschwindigkeit  $c_e$  der Feuergase und vom Massenverhältnis ab. Dabei ist  $m_0$  die Raketenmasse und  $m_b$  die Brennschlußmasse. Für mehrstufige Raketen, im Falle von Cluster mit Soyuz sind es vier Stufen ( $n = 4$ ) – ergibt dies

$$v_{id} = \sum_{i=1}^n c_{ei} \ln \frac{m_{0i}}{m_{bi}}. \quad (\text{A.249})$$



**Abbildung A.25:** Start einer Soyuz-Rakete mit zwei Cluster-Satelliten als Nutzlast von Baikonur, Kasachstan. Erstes Paar (Salsa FM6 und Samba FM7) am 16-Juli-2000, zweites Paar (Rumba FM5 und Tango FM8) am 09-August-2000. Die ursprüngliche Cluster Mission startete – und scheiterte bereits nach 37 Sekunden – mit dem Jungfernflug 501 der fünften Ariane Generation (4-Juni-1996) aufgrund eines Software-Fehlers (siehe Kap. B.3 und Seite 217). © ESA

TM Mode	Bitrate (kBit/s)	Bezeichnung
1, 2	2	Housekeeping
3, 4	22	Housekeeping, normal mode science
5, 6	131	Housekeeping, burst mode science
7	131/262	Housekeeping, normal mode science, recorder dumps
8	262	WBD science data
9, 10	131/262	Housekeeping, normal mode science, memory dumps

**Tabelle A.14:** Cluster S/C Telemetrie Moden: Nummerierung, Bitrate und Bezeichnung.

S/C	Name	Modell	Farbe	Linienstil	Symbol
C1	Rumba	FM5	schwarz	durchgezogen	Kreuz oder Quadrat
C2	Salsa	FM6	rot	gestrichelt	Plus oder Raute
C3	Samba	FM7	grün	punktiert	Asterisk oder Kreis
C4	Tango	FM8	magenta	Strich-Pkt-Pkt-Pkt	Stern oder Dreieck

**Tabelle A.15:** Akronyme, Namen, Symbole, Stile und allgemeine Bezeichnungen der Cluster Satelliten.

Als fast vergessener und zugleich sehr früher Wegbereiter des Mehrstufenprinzips bei Raketen kann Conrad Haas ( $\sim 1509 - 1576$ ) angesehen werden, ein weiterer Pionier ist Friedrich Schmiedl (1902 – 1994). Die effektive Geschwindigkeit  $c_e$  enthält sowohl den impulsiven Schub als auch den Druckschubanteil. Die Gesamtschubkraft ergibt sich zu

$$F_{ges} = \dot{m}c + (p_e - p_a)A_e = \dot{m}\left(c + \frac{A_e \Delta p}{\dot{m}}\right) = \dot{m}g_0 \frac{c_e}{g_0} = \dot{m}I_{sp}g_0 \quad (\text{A.250})$$

mit  $I_{sp}$  als spezifischen Impuls,  $\dot{m}$  der zeitlichen Massenänderung,  $p_e$  Düsenenddruck,  $p_a$  Außendruck,  $A_e$  Düsenendfläche,  $c$  Ausströmgeschwindigkeit der Gase und  $g_0$  der Erdbeschleunigung. Der spezifische Impuls  $I_{sp}$  ist die wichtigste Triebwerkskenngröße, er ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Laval-Düsen. Tabelle A.14 listet die möglichen Telemetrie Moden (TM) der vier, ident bestückten, Cluster Satelliten, siehe [Ferri and Warhaut, 1997].

#### Ergänzende Anmerkungen, Kulturelle Aspekte, Kuriosum

Zur Vereinheitlichung der Darstellungen von Cluster-Resultaten gibt es Farb- und Linienstile für jeden Satelliten, siehe Tabelle A.15. Zwei Symbole sind zugeordnet: das Erste soll mit Linien verwendet werden, das Zweite allein (Asteriske \* haben 6, Sterne \* 5 Äste). Die Namensgebung der vier Cluster Satelliten ist aus dem Wettbewerb "Name the Cluster quartet" hervorgegangen. Der österreichische Beitrag hatte die Namen Vento, Nubo, Fulmo und Pluvo, die gültige Bezeichnung ist die englische Einsendung. Zwei der 4 Cluster S/C tragen Kameras (Visual Monitoring Camera, VMC), es sind dies die jeweils oberen beim Start (Rumba und Samba), sie dienten zum einmaligen Überwachen der Trennung nach dem Start und funktionierten (wie Checkouts bewiesen) auch noch im Jahre 2016. Ein Satellit (Salsa) trägt eine gravierte  $10 \times 10$  cm Titan Platte. Das Kunstwerk ist Teil einer "kinetischen Skulptur", genannt "bewegte Platten" (System IV Moving Plates) von ihren Schöpfern, den Künstlern Eva Wohlgemuth und Andreas Baumann. Ähnliche Platten finden sich weltweit verteilt, montiert an fixen Plätzen oder ebenfalls beweglich.

## Anhang B

# Hardware-Tests, EMV, SEE, Zuverlässigkeit

### B.1 Elektromagnetische Verträglichkeit, Störgrößen, transiente Signale

#### B.1.1 Allgemein

Es kann eine Unterscheidung nach Klassen in (i) elektrische, (ii) magnetische und (iii) elektromagnetische (HF) Reinheit vorgenommen werden. Um gegenseitige Störungen von Instrumenten auf Satelliten zu verhindern müssen Untersuchungen über die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) an den Experimenten durchgeführt werden, grundlegende Anforderungen sind in [ECSS, 2008a] dargestellt. Zur Bestimmung dieser Beeinflussungen, und in der Folge deren Minimierung oder Beseitigung, besitzt das IWF eine entsprechende Ausstattung an EMV Meßgeräten. Neben dem Basisgerät, einem EMC-Analysator mit kalibrierten Antennen und diversen Zusätzen (Sniffsonden), ist Erfahrung im Umgang mit den Geräten die Grundlage für Messungen bei Experimenten die im Weltraum stationiert werden. EMV ist fixer Bestandteil jeder Mission, für aktuelle Entwicklungen siehe [Prattes et al., 2009], und wird im kommerziellen Umfeld ebenfalls weitläufig eingesetzt. Im technischen Bereich ist die EMV im Zusammenhang mit hochintegrierten und sehr sensiblen Schaltelementen ein zentrales Thema, in entsprechenden Normierungen wird dies berücksichtigt.

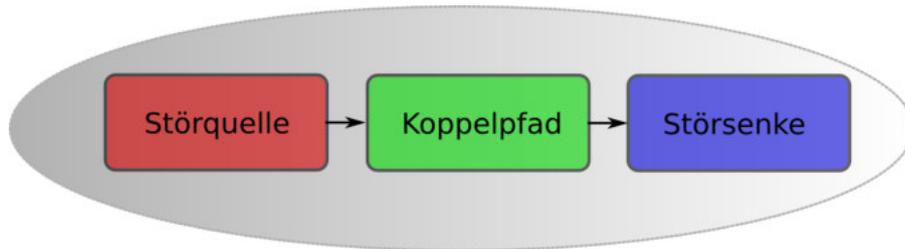
#### B.1.2 EMV Spezifikation von Satellitenbaugruppen

In Tabelle B.1 sind die Komponenten aufgelistet mit denen das IWF Untersuchungen der Elektromagnetischen Verträglichkeit durchführt. Beginnend mit den ersten Starts bis zu aktuellen Experimenten – EMV Untersuchungen / Anforderungen waren in der Vergangenheit und werden auch in der Zukunft wichtiger Bestandteil im Instrumentenbau sein. Unter optionalem Equipment sind in diesem Zusammenhang jene Geräte und Geräteteile zu verstehen, mit denen Effizienz bei Messungen erreicht wird.

B.1. ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT, STÖRGRÖSSEN, TRANSIENTE SIGNALE205

Index	Equipment	Bezeichnung	Frequenzbereich	Spezifikationen
1	EMC-Analyser	HP 8591EM	9 kHz - 1.8 GHz	Amplitude $-23 \text{ dB}\mu\text{V}$ - $+137 \text{ dB}\mu\text{V}$ , max. Gleichsp. 25 V
2	Vorverstärker	HP 8447F, Opt. H64	9 kHz - 50 MHz	max. Eingangsleist. 0 dBm, max. Gleichspannung 10 V
3	Vorverstärker	R&S HZ-16	100 kHz - 1.4 GHz	20 dB, max. Eingangsleistung 13 dBm
4	Vorverstärker	Langer PA303	100 kHz - 3 GHz	30 dB
5	Bikonische Antenne	HP 11955A	100 kHz - 3 GHz	maximale kontinuierliche Leistung 0.5 W
6	Log-per. Antenne	HP 11956A	30 MHz - 300 MHz	maximale kontinuierliche Leistung 1 W
7	Nahfeldsonde E und H	HP 11956A	200 MHz - 1 GHz	E Feld: RS E02, RS E10, H Feld: RS H 400-1, RS H 50-1, RS H 2.5-2
8	Nahfeldsonde E und H	R&S HZ-15	30 MHz - 3 GHz	E Feld: RF-E 10, H Feld: RF-R 3-2, RF-U 2.5-2, RF-K 7-4
9	Nahfeldsonde H	Langer RFI	30 MHz - 3 GHz	H Feld: LF-B 3 LF-R 400, LF-U 2.5 LF-U 5
10	Nahfeldsonde H	Langer LFI	100 kHz - 50 MHz	max. Eingangsleist. 0.5 W, max. Spg. Probenspitze 1 kV
	Nahfeldsonde H	HP 11940A	30 MHz - 1 GHz	
	Nahfeldsonde H		150 kHz - 2 GHz(*)	
11	Nahfeldsonde H	HP 11941A	9 kHz - 30 MHz	maximale Eingangsleist. 0.5 W, max. Spg. Probenspitze 1 kV
12	Nahfeldsonde H	MLF-12	40 Hz - 20 kHz(*)	maximale Spannung 10 V Peak
13	Nahfeldsonde H	MLF-11	3 kHz - 300 kHz(*)	maximale Spannung 10 V Peak
14	Nahfeldsonde H	MLF-21	100 kHz - 20 MHz(*)	maximale Spannung 10 V Peak
15	Nahfeldsonde H	MLF-22	500 kHz - 50 MHz(*)	maximale Spannung 10 V Peak
16	Nahfeldsonde H	MLF-23	40 MHz - 400 MHz(*)	maximale Spannung 10 V Peak
17	Nahfeldsonde E	EWB-11	60 Hz - 100 MHz(*)	maximale Spannung 10 V Peak
18	Netzschabbildung, LISN	HP 11967D	9 kHz - 30 MHz	maximale Eingangsleistung 0 dBm, max. Gleichsp. 10 V
19	Störspg. Begrenzer	HP 11947A	9 kHz - 200 MHz	maximale Eingangsspannung $\text{DC} \pm 12 \text{ V}$ , kontinuierlich 2.5 W (+34 dBm), Puls: 10 kW, 10 $\mu\text{s}$
	Transienten Limiter			max. prim. Leist. 350 A, DC - 60 Hz
20	Stromsonde	HP 11967A	100 Hz - 50 MHz	max. prim. Leist. 100 A, DC - 400 Hz
21	Stromsonde	HP 11967B	10 Hz - 2 MHz	Standard Korrekturfaktoren
22	ROM-card	08590-10027		Faktoren laut Kalibrierzertifikat
23	RAM-card	08591-10008		10 m, Type N und 90 cm, Type N
24	Koaxialkabel	HP 11966L		2 m, RG-223
25	SMA-Kabel{BNC}	8120-4811{-2582}		SMA-Buchse / N-Stecker{BNC-Stecker}
26	Adapter	1250-1250{-1700}		
27	Antennenstativ	HP 11968C		

**Tabelle B.1:** EMV Geräte und Meßeinrichtungen für Tests / Untersuchungen am IWF. (\*) nicht kalibriert; mit dieser Sonde sind im angegebenen Frequenzbereich nur qualitative Messungen möglich.



**Abbildung B.1:** Klassisches allgemeines Schema der EMV mit den drei wesentlichen Komponenten: (i) Störquelle (extern durch Plasmaumgebung oder S/C, intern durch die Elektronik des Instrumentes), (ii) Koppelpfad und (iii) Störsenke, wechselwirkend in einer bestimmten (sich verändernden) Umgebung. Die Emission / Immission kann leitungs- oder strahlungsgebunden erfolgen. Rückkopplungen im Sinne eines Regelkreises sollten in der praktischen Anwendung allerdings berücksichtigt werden.

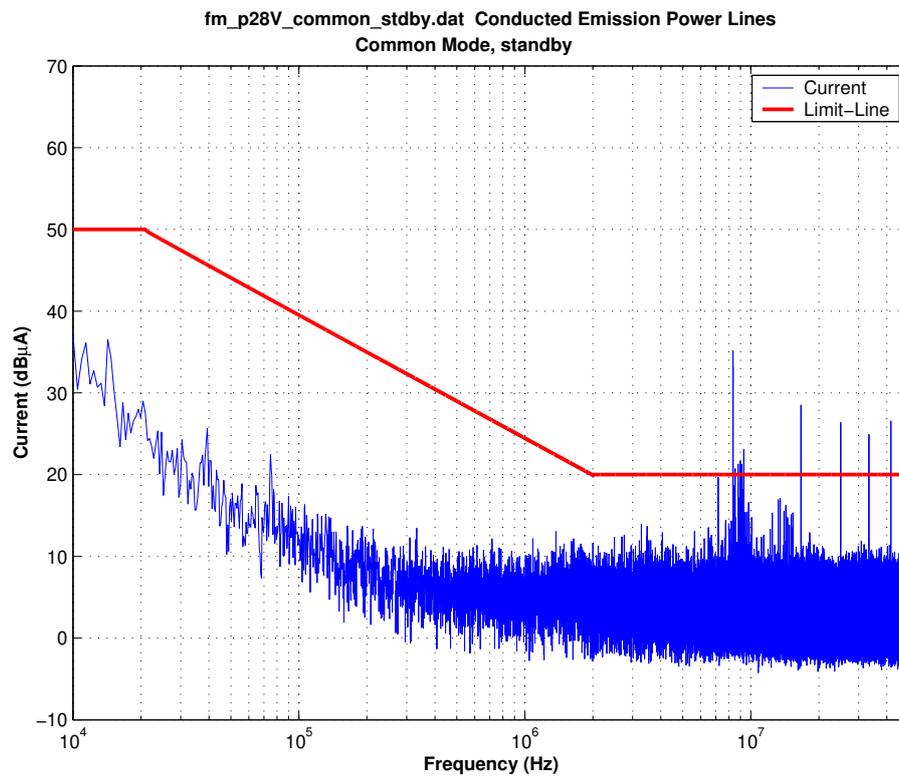
### B.1.3 Elektromagnetische Beeinflussung

Die elektromagnetische Beeinflussung funktioniert nach einem allgemeinen Schema, siehe Abbildung B.1. Eine Störquelle innerhalb oder außerhalb des Satelliten wirkt über einen Kopplungsweg – leitungsgebunden oder eingestrahlt – auf eine Störsenke, das alles in einer bestimmten Umgebung, z. B. im Plasma der Erdumgebung für Cluster FGM nach dem Start. Die Störsenke kann nun je nach Störpegel und eigener Störfestigkeit nicht oder gering gestört bis hin zum Totalausfall reagieren. Eine konkrete Messung, siehe Abbildung B.2, zeigt leitungsgebundene Emissionen einer Signalleitung im Common-Mode bei ASPOC im Standby Betrieb. Für EMV Anwendungen müssen einige Begriffe unterschieden werden, allgemein gelten folgende Definitionen und begriffliche Abgrenzungen, EMVV 2015, §4(1):

- *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV):* die Fähigkeit eines Betriebsmittels, in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere Betriebsmittel in derselben Umgebung unannehmbar wären
- *Elektromagnetische Störung:* jede elektromagnetische Erscheinung, die die Funktion eines Betriebsmittels beeinträchtigen könnte; eine elektromagnetische Störung kann ein elektromagnetisches Rauschen, ein unerwünschtes Signal oder eine Veränderung des Ausbreitungsmediums selbst sein
- *Störfestigkeit:* die Fähigkeit eines Betriebsmittels, unter Einfluss einer elektromagnetischen Störung ohne Funktionsbeeinträchtigung zu arbeiten
- *Elektromagnetische Umgebung:* alle elektromagnetischen Erscheinungen, die an einem bestimmten Ort festgestellt werden können

Typische Intrasystem-Beeinflussungen – Sender und Empfänger sind Teile eines Systems, im Gegensatz zur Intersystem-Beeinflussung – sind parasitäre Rückkopplungs-Erscheinungen in mehrstufigen Verstärkern, Signalwechsel auf benachbarten Datenleitungen (Crosstalk) oder Stromänderungen in Versorgungsleitungen. Komplexe Systeme erfordern bereits im Planungsstadium eine umfassende Berücksichtigung von EMV-Aspekten. Ein hoher präventiver Aufwand läßt die Wahrscheinlichkeit späterer EMV-Probleme gering erscheinen. Zur quantitativen Beurteilung der EMV verwendet man logarithmische Verhältnisse der verwendeten Größen. Damit verbunden ist (i) eine übersichtliche Darstellung von Größenverhältnissen über viele Zehnerpotenzen hinweg und (ii) eine einfache additive Verknüpfung von multiplikativen Verhältnissen. Man unterscheidet Pegel und Übertragungsmaße.

- Pegel beziehen die Systemgrößen auf einen festen Bezugswert, z. B.  $U_0 = 1 \mu\text{V}$ . Die bezogenen Systemgrößen, z. B. Spannungen, bezeichnet man dann als Spannungspegel ( $\text{dB}\mu\text{V}$ ).
- Übertragungsmaße setzen Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems ins Verhältnis und dienen der Kennzeichnung der Übertragungseigenschaften des Systems.



**Abbildung B.2:** EMV Messungen leitungsgebundene Emissionen – Signalleitung im Common Mode und Standby Betrieb. Alle breitbandigen Emissionen sind unterhalb der geforderten Limits, die schmalbandigen Abstrahlungen bei einigen Frequenzen sind genau bei den Taktraten der Elektronik.

Für beide Relationen gilt: Die ins Verhältnis gesetzten Größen müssen Frequenzbereichsgrößen sein, d. h. komplexe Amplituden, Amplitudendichten, etc. und es werden jeweils nur die Beträge, Amplituden oder Effektivwerte der Größen ins Verhältnis gesetzt.

### Störgrößen

Die von den Störquellen herrührenden Störgrößen, z. B. Ströme, Spannungen, elektrische und magnetische Felder, sind entweder (i) kontinuierlich periodisch veränderliche oder (ii) nicht-periodische impulsförmige Größen, die in der Regel zeitlich zufällig verteilt in Erscheinung treten. In beiden Fällen kann es sich um (i) schmalbandige oder (ii) breitbandige Vorgänge handeln. Damit kann im wesentlichen zwischen vier Störgrößen-Grundtypen unterschieden werden. Als Beispiel ist eine Sinusgrundwelle ein kontinuierliche, periodische, schmalbandige Störgröße, des weiteren ist ein Rechteckimpuls eine periodische breitbandige Störgröße – z. B. eine Taktimpulsfolge in Logikschaltungen – und ein Entladungsvorgang einer elektrostatischen Quelle (electrostatic discharge, ESD) ein Beispiel für eine nichtperiodische breitbandige Impulsstörung.

### B.1.4 Transiente impulsförmige Signale: Blitze, Schaltspannungen, Kurzschlüsse

Zur Messung von (i) impulsförmigen Strömen sind Shunt-Widerstände, Stromtransformatoren ( $\sim I$ ), Chattock-Rogowski Spulen ( $\sim dI/dt$ ), HOKA Proben (PCB Rogowski Spulen oder Luftspulen zusammen mit Hall Sensoren), closed loop Stromtransformatoren (Hall Effekt kompensierte Stromtransformatoren) und optische Lichtwellenleiter-Sensoren in Verwendung. Bei (ii) impulsförmigen Hochspannungen verwendet man (ii<sub>1</sub>) kapazitive / ohmsche Spannungsteiler oder generell (ii<sub>2</sub>) elektro-optische Kristalle mit Faraday-Effekt, Pockels-Zellen ( $\Delta n \propto E$ ) oder Kerr-Zellen ( $\Delta n \propto E^2$ ),  $\Delta n$  ist die Variation im Brechungsindex.

**Blitze** Bereits im 18. Jhd. konnte Benjamin Franklin (1706 – 1790) – einer der Gründerväter der Vereinigten Staaten – durch sein Drachensexperiment den Nachweis von atmosphärischer Elektrizität und der elektrischen Natur der Blitze erbringen, zu einem bedeutenden Abschnitt gehört auch seine Kartierung des Golfstroms. In der selben Epoche wurde von Prokop Diviš (1698 – 1765) die erste Blitzschutzanlage errichtet. Der Blitz (flash) ist eine atmosphärische Entladung (stroke) verbunden mit Strömen von 1 – 380 kA im alpinen und angrenzenden Bereich, der Medianwert in Österreich beträgt 12 – 15 kA. Die Wirkung für den Menschen ist proportional dem Produkt aus Einwirkdauer und Stromstärke, an markante Ereignisse wird manchmal durchaus humorvoll erinnert, siehe Abb. B.3. Der Blitzstrom  $I$  selbst ist proportional der Ladung  $Q = CU$  der Wolke,  $I \propto Q$ .

Der globale elektrische Kreislauf besteht aus (i) dem Schönwetterfeld (negativ, zum Boden gerichtet) mit  $\sim -150$  V/m (gemessene Werte in 40 km Höhe  $\sim -30$  mV/m), d. h. die Erde ist negativ gegenüber der Atmosphäre, (ii) der Entladungsstrom wird durch Luftpionen im Schönwetterfeld getragen, (iii) unter Gewittern ist eine Feldumkehr gegenüber dem Schönwetterfeld, (iv) in der Gewitterwolke (Tripol-Struktur) wird die Feldstärke um einen Faktor  $\sim 10^3$  erhöht ( $\sim -150$  kV/m) – der globale Ausgleich ( $\sim 1000 - 1500$  A,  $\sim 2$  pA/m<sup>2</sup>) passiert durch die hohe Leitfähigkeit (Leitfähigkeitskarten mit wenigen bis einige 10000 S/m) im Boden und in der mittleren Atmosphäre.

Die Ladung einer typischen Zelle eines Wärmegewitters entsteht durch Reibung von Regentropfen und Eiskristallen untereinander, der Aufwind in der Zelle verursacht durch den vertikalen Temperaturunterschied  $\Delta T$  bewirkt die Ladungstrennung. Die Wolke entspricht einem großen Kondensator und 4 Blitztypen sind zu unterscheiden – negative / positive (Ladung der Wolke) Auf- und Abwärtsblitze. Häufig tritt der negative Abwärtsblitz auf, negative Aufwärtsblitze sind speziell bei hohen Türmen relevant, positive Abwärtsblitze sind nur im Winter und positive Aufwärtsblitze generell sehr selten. Eine weitere Klassifikation ergibt sich durch (i) Wolke  $\leftrightarrow$  Erde, (ii) innerhalb der Wolke (Intracloud), (iii) zwischen Wolken (Intercloud) und (iv) Wolke  $\leftrightarrow$  obere Atmosphäre (Sky), letztere sind etwa (iv<sub>1</sub>) Red Sprites mit Längen bis 95 km, Breiten 5 – 30 km, Dauer 100 ms einzeln oder synchronisiert in Gruppen sowie (iv<sub>2</sub>) einzelne Blue Jets mit Längen bis 50 km und einer Dauer von 200 ms. Die drei Faktoren (i) Sonneneinstrahlung, (ii) Feuchtigkeit und (iii) Temperaturunterschied führen zu Ladungszentren, die Lebensdauer einer Zelle beträgt etwa 30 min, sie durchläuft die Stadien von Jugend, Reife und Alter und zerfällt somit wieder wenn



**Abbildung B.3:** Gedenktafel anlässlich eines Blitzeinschlages im Toten Gebirge auf dem Weg von Gößl am Grundlsee Richtung Großer Priel, Nähe Draußengatterl vorm Lahngangsee. erinnert sei hier ebenfalls an den Dichter Karl Morré (1832 – 1897) und sein Stück – 's Nullerl – (frei zitiert), Gabi: "Die Liab' und der Blitz frog'n net wo und wann sie einschlagen", oder an den "Walzerkönig" Johann Baptist Strauß (Sohn) (1825 – 1899): Polka schnell "Unter Donner und Blitz" und die "Elektro-Magnetische Polka" Op. 110.

Parameter	Wert
maximale Stromstärke	10 – 30 kA
Stromsteilheit	einige kA/ $\mu$ s
Ladungsfluß	2 – 5 C, positive Blitze $\sim$ 10 fach höher
Dauer des Stromflusses	40 – 70 ms, mittlerer Strom 2 As/50 ms von 40 A
Kerntemperaturen	$(2 - 3) \times 10^4$ K, innerhalb von 2 cm im Plasmakanal mit Lichtbogenwiderständen von m $\Omega$ – $\Omega$
Gesamtenergie	$10^9 - 10^{10}$ J (300 – 3000 kWh)
Länge des Blitzkanals	$\sim$ 5 km, stark variabel
sichtbarer Durchmesser	$\sim$ 15 cm

**Tabelle B.2:** Physikalische Parameter von Blitzen in Mitteleuropa.

sie nicht zur Entladung kommt.

Der Blitzvorgang beginnt mit stufenförmigen Leitblitzen ( $v \sim 10^5$  m/s, Ruckstufen mit Längen von  $\sim$  100 m) bis zur Hauptentladung ( $v \sim 10^8$  m/s, Richtung der Welle vom Boden zur Wolke), gefolgt von direkten Leitblitzen und weiteren Hauptentladungen. (Einzelentladungen in einem Mehrfachblitz, Multiplizität 3 – 5, zeitlicher Abstand 20 – 100 ms, meist der gleiche Fußpunkt, nur die erste Entladung ist verzweigt).

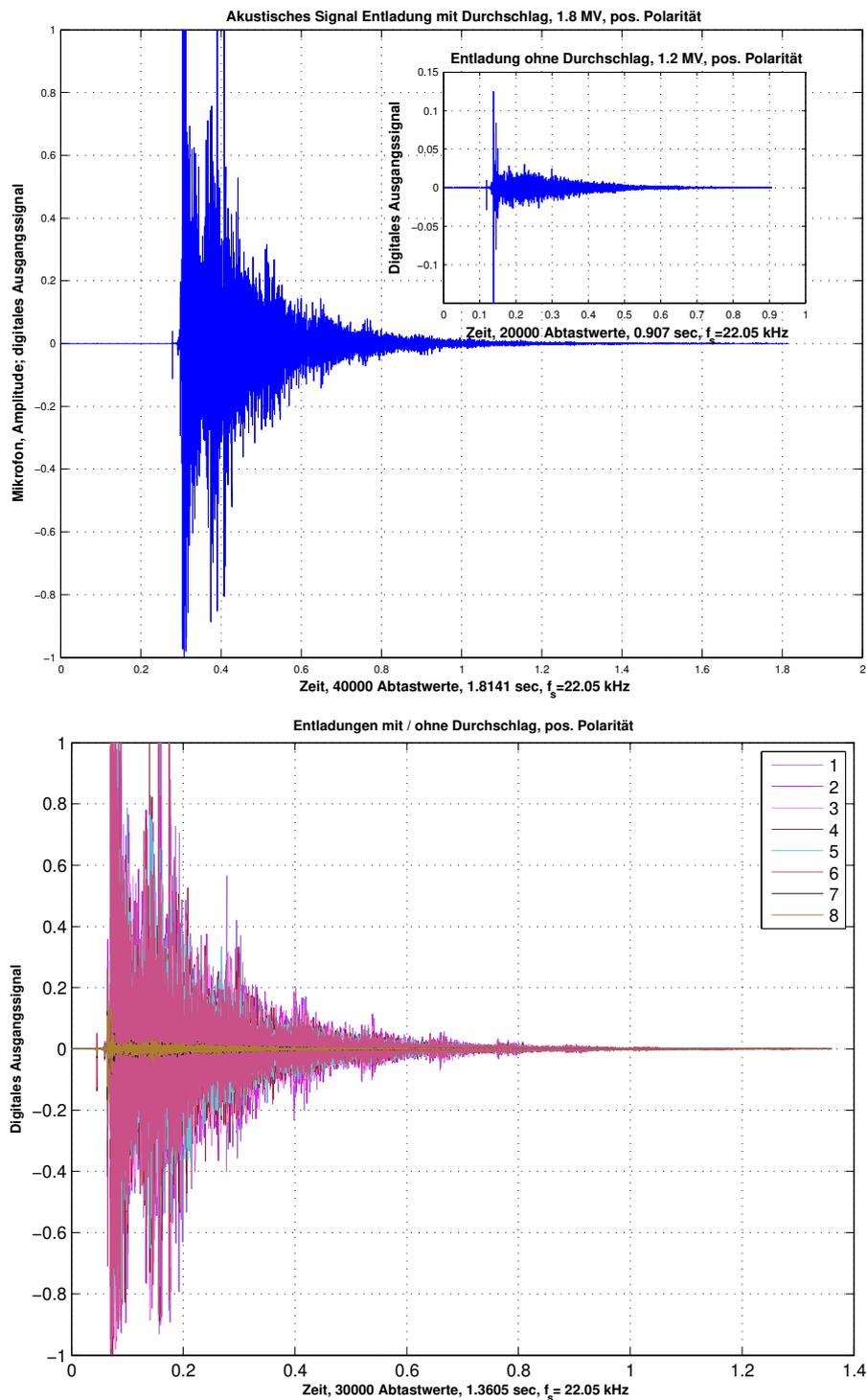
Die physikalischen Parameter der Hauptentladung von Blitzen können mit den Eckdaten in Tabelle B.2 beschrieben werden. Die Klassifikation erfolgt nach der Richtung des Leitblitzes, die statistische Verteilung beträgt Wolke-Boden 90 % und Boden-Wolke 10 %. Die globale Blitzverteilung ist (i)  $\sim$  40 pro Sekunde ständig in  $\sim$  1000 Gewittern, (ii) vorwiegend über Land, (iii) in den Tropen (mittleren Breiten) 20 – 30 (1 – 4) Blitze/km<sup>2</sup>/Jahr, (iv) lokale und globale Tages- und Jahresgänge, (v) Tagesgang deutet auf Blitze als Generator im globalen Feld, (vi)  $\sim$  1000 Gewitter mit je 1 – 2 A kompensieren den Schönwetterstrom. Weiters definiert man den Keraunischen Pegel als Gewittertage pro Jahr, in Europa  $\sim$  30 und in tropischen Gebieten  $\gtrsim$  120. In spezieller wissenschaftlicher Anwendung stehen Blitze bei der Untersuchung von Schumann-Resonanzen, siehe Kapitel 4.2.

Blitze und die mit ihnen verknüpften transienten Felder führen zu massiven elektromagnetischen Beeinflussungen am Einschlagort sowie über den Lightning Electromagnetic Pulse (LEMP) auch in dessen näherer Umgebung. Die Mechanismen der Kopplung – für Blitze primär (i) galvanisch und (ii) induktiv, weniger (iii) kapazitiv und (iv) Strahlung – sind ebenfalls in Abb. B.1 Seite 206 dargestellt. Abbildung B.4 (obere Grafik) zeigt Zeitreihen von akustischen Messungen im Hochspannungs-Labor mit und ohne Durchschlag, die untere Grafik die Wiederholgenauigkeit der einzelnen Entladungen, siehe Kap. 5.1 und [Eichelberger et al., 2010] für Auswirkungen auf planetare Atmosphären.

Blitzschutz sollte bereits im Planungsstadium einer Anlage berücksichtigt werden, ein Blitzschutzsystem (Lightning Protection System, LPS) kann aus mehreren Zonen bestehen mit jeweils einem (i) äußeren Blitzschutz (Fangeinrichtung, Ableitungen, Erdung) und (ii) inneren Blitzschutz (Potentialausgleich, Trennung zwischen Teilen). Die Fangeinrichtung legt den Fußpunkt außerhalb des zu schützenden Volumens fest, die Ableitungseinrichtung führt den Fußpunkt zur Erdungsanlage, diese wiederum muß die hohen Impulsströme in der Erde (flächig) verteilen und gute Erdfähigkeit besitzen. Der Blitzschutz-Potentialausgleich (im Sinne von transienten Vorgängen, d. h. keine Schleifen) verhindert Folgeüberschläge verursacht durch den Längsspannungsabfall (ohmsch- und vor allem induktiver Belag) entlang des LPS. Blitzschutz wird vermehrt als integraler Bestandteil von Gebäudestrukturen betrachtet, das LPS soll in einem "Drahtmodell" (eigener Layer im CAD Programm) erkennbar sein. Mit zunehmendem Vermaschungsgrad sinken die Induktivitäten (Parallelschaltung von Induktivitäten), natürliche Bestandteile können in den Blitzschutz integriert werden. Im Entwurf gibt es das (i) Schutzwinkel-, (ii) Blitzkugel-, in Zukunft möglicherweise Ellipsoid- und (iii) Maschenverfahren.

Blitzschutzsysteme bei Raketenstartplätzen, z. B. für Vega, Soyuz oder Ariane 5, basieren auf Hybridmethoden, d. h. numerischer Simulation und Tests. Spezifikationen für eine Ariane 5 (externe Struktur aus Alulegierung (EPC), Stahl (EAP) und Kohlefaser (dritte Stufe, VEB und fairing), 1553 MIL Bussystem) definieren Werte bei (i) direktem Einschlag in die Raketenspitze auf der Startrampe mit 5 kA, 4  $\mu$ s

B.1. ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT, STÖRGRÖSSEN, TRANSIENTE SIGNALE211



**Abbildung B.4:** Obere Grafik: Akustische Messung (Mikrofon Shure SM57, Notebook Audiochip, ~ 7 m Entfernung) im Hochspannungslabor einer elektrischen Entladung mit Durchschlag (Blitz), Spannung 1.8 MV, positive Polarität und elektrischen Entladung ohne Durchschlag, Spannung 1.2 MV, ebenfalls positive Polarität. Untere Grafik: Wiederholgenauigkeit der akustischen Blitz-Messung im HS-Labor, positive Polarität, mit (Signale 1 – 6) und ohne (Signale 7 – 8) Durchschlag.

Anstiegszeit und  $50 \mu\text{s}$  mittlere Pulsdauer, (ii) einem nahen Einschlag in das 4-Mast Schutzsystem, das die Rakete umgibt, mit  $200 \text{ kA}$  und gleichen Zeiten wie vorhin. Das worst-case Szenarium wäre eine Triggerung von pyrotechnischen Zündern und unkontrollierten Düsenbewegungen. Eine Spanne von  $20 \text{ dB}$  zwischen den Suszeptibilitäts-Pegeln und den erwarteten Größen bei  $5 \text{ kA}$  und  $50 \mu\text{s}$  wird angestrebt.

Blitzortung geschieht primär mittels (i) Satelliten im optischen oder RF Bereich, siehe [Jaffer et al., 2008], [Jaffer et al., 2010], [Jaffer et al., 2010], [Jaffer et al., 2011] (adaptive Filterung) oder (ii) terrestrisch mit einem Netzwerk von Sensoren, z. B. das Austrian Lightning Detection and Information System, ALDIS, mit Methoden des (ii<sub>1</sub>) magnetic direction finding (MDF) und (ii<sub>2</sub>) time of arrival (TOA) des elektromagnetischen Signals (Problem – kein Referenzimpuls). Das Ortungssystem detektiert die Hauptentladung, erst diese hat die notwendige Energie. Der Unsicherheitsbereich liegt derzeit bei  $\pm 300 \text{ m}$  mit einer Detektions-Effizienz von  $90 \%$ . Der Blitzkanal entspricht einer breitbandigen Sendeantenne von kHz bis MHz. Die Anzahl der registrierten Blitze (Wolke-Erde, Erde-Wolke) ist in Österreich im Bereich von  $\sim (2 - 3) \times 10^5 / \text{Jahr}$ , die Blitzdichte variiert von  $\sim 1 - 5 \text{ Blitze/km}^2/\text{Jahr}$  und hängt naturgemäß stark von der Topographie und lokalen Gegebenheiten ab.

## B.2 Single Event Effekte, Strahlungsbelastung, Versetzungsfehler

### B.2.1 Single Event Effekte

Generell gilt, daß eine umfangreiche Standardisierung vorliegt, z. B. behandeln die Regularien der European Cooperation for Space Standardization (ECSS) – neben zahlreichen anderen Thematiken – ebenfalls Single Event Effekte (Single Event Effects, SEEs). Sie sind dominierende Zuverlässigkeits-Faktoren in modernen CMOS Technologien und treten seit den 1980'er Jahren auch verstärkt in kommerzieller Elektronik auf. In schwachen Fällen verursachen sie temporäre Glitches, in extremer Auswirkung setzen sie das System ausserkraft, siehe Seite 214. Bereits Mitte der 1970'er Jahre konnten SEEs erstmals auf Satelliten nachgewiesen werden und sie wurden zu einem wachsenden Problem bei (i) niedrigen Höhen, besonders im Zusammenhang mit schrumpfenden IC Strukturbreiten, (ii) kleineren Spannungen und (iii) höheren Taktfrequenzen. Hochenergetische Teilchen wechselwirken mit dem Halbleitermaterial, brechen die Strukturen auf und hinterlassen ionisierte Fragmente an ungewollter elektrischer Ladung. Halbleiter-Hersteller messen SEEs in failures in time (FITs), ein FIT entspricht einem Fehler in  $10^9$  Betriebsstunden. Typische harte Fehler, z. B. Elektromigration, haben ein FIT von  $1 - 50$ , die aggregate Fehlerrate sind  $200 \text{ FITs}$ . Ungeprüfte Soft Errors können FITs von  $50000$  pro IC haben. Bei der Simulation mit Spice-Modellen werden Stromimpulse in unterschiedliche Knoten der Schaltung einspeist um das Verhalten während des Timing-Zyklus zu studieren. Herkömmliche Schutzmechanismen für Logikbausteine inkludieren (i) Redundanz, (ii) Abschirmung – siehe Abb. 2.2 – und (iii) Scan-Strategien. Error correction codes (ECCs), z. B. Hamming-Code, Schirmung und Fehlermanagement schützt den Speicher vor SEEs. Je höher die Taktrate desto anfälliger wird man auf Soft Errors und transiente Vorgänge. Anstelle von langsameren Prozesstechnologien wird interne Redundanz verwendet, die Schaltungen sind inhärent strahlungsfester. Zur Erzeugung von internen redundanten Schaltkreisen implementiert man mehrere Transistoren für die idente Funktion, für Schaltungsentwickler ergeben sich Zielkonflikte in Bezug auf Geschwindigkeit, Chipfläche und Leistungsverbrauch bei diesen "hardend-by-design" Konfigurationen.

Ein primäres Teilchen kann bei einer Wechselwirkung mehrere Sekundärteilchen erzeugen, typischerweise Ionen, welche wiederum Speicherzellen beeinflussen können. Schaltungsentwickler verwenden öfters bit spacing, in Falle von Mehrfachfehlern bei einem System sind die Chancen besser diese zu erkennen. Unterschiedliche Materialien spielen zudem eine wichtige Rolle in einem strahlungsfesten Design gegen SEEs und große Kapazitäten bei SRAM werden zur Härtung gegen SEEs verwendet. Speichert man mehr Ladung hat man robustere Signale und es benötigt mehr Energie um eine Speicherzelle zu beeinflussen. Die Verwendung von Silicon-On-Insulator (SOI) Techniken macht Silizium mehrfach resistenter gegenüber SEEs. Kommerzielle Speicher und Logikbausteine sind empfindlich – in unterschiedlicher Stärke – gegenüber 5 Klassen von SEEs:

- soft errors, oder single event upsets – SEUs
- single event latch ups – SELs

- single event functional interrupts – SEFIs
- single event burnouts – SEBs
- single event transients – SETs

SEUs sind bei weitem die häufigsten SEEs, sie sind transiente Fehler. Externer Energieeintrag, typischerweise kosmische Strahlung (Kap. A.2.5), verursacht SEUs. Sie entstehen wenn z. B. ein Strahlungsereignis den Zustand einer Leitung von logisch 0  $\rightarrow$  1 oder 1  $\rightarrow$  0 ändert. Nach einem SEU benötigt das System typischerweise einen Reset, danach läuft es bis erneut ein Strahlungsereignis auftritt. SELs werden hervorgerufen wenn ein Strahlungsereignis einen plötzlichen Spannungsabfall verursacht und eventuell ein bipolarer Pfad entsteht der wiederum einen quasi-kurzgeschlossenen Strompfad erzeugt. Als Folge könnte Übertemperatur und thermische Zerstörung der Schaltung auftreten. SELs sind ähnlich einem elektrischen Latch-up. Schaltungen die empfänglich auf elektrische Latch-ups reagieren sind ebenfalls sensitiv auf SELs. Neustart (Reboot) kann für gewöhnlich den Latch-up korrigieren. Allerdings könnte der ursprüngliche Latch-up nachhaltigen Einfluß haben, z. B. durch Elektromigration für einen Schaltkreis. Ein SEFI entsteht wenn ein Programmzähler durch einen Strahlungsereignis den Zählerstand ändert, die Software gelangt in einen undefinierten Zustand. Ein SEFI kann ein Gerät zum "power-off self-test" triggern. SEBs – ebenfalls bekannt als "single event gate ruptures" – entstehen wenn ein massives Strahlungsereignis einen Pfad im Gateoxid verursacht und das Gate im Design zerstört, die Folge ist meist ein kompletter Systemausfall. SEBs sind selten haben aber drastische Auswirkungen, bis dato sind sie nur in Leistungsfeldeffekttransistoren (FET) bei hohen Spannungen aufgetreten. Erinnerung sei hier an Julius Edgar Lilienfeld, 1882 – 1963, er entdeckte das FET Prinzip im Jahr 1925. SETs werden möglicherweise ein Problem in kommerziellen Designs bei 65/45 nm Prozessen, sie können Standardzellen Logik, Speicher und programmierbare Logik beeinflussen. SETs entstehen wenn ein Strahlungsereignis ein Störsignal verursacht welches durch die Logik propagiert. Durch kleine Prozessgeometrien, verbunden mit einer hohen Taktrate, wird das Signal an einer Flanke gelockt. Bei hohen Frequenzen der Logik werden dieser Signale durch die Schaltung verteilt, es spielt keine Rolle, daß der Knoten auf den ursprünglichen Wert zurückgeht, das Störsignal wurde bereits über den Takt verbreitet.

Es sind diverse Abwägungen, z. B. Aufwand, Effizienz, zeitkritische Aspekte und Flächenbedarf zwischen unterschiedlichen Schutzmechanismen, darunter Drei- oder Mehrfachredundanz, Detektion und Korrektur von Systemfehlern, speziellen strahlungsfesten Bibliotheken im Designvorgang und weiteren Techniken vorzunehmen.

## B.2.2 Strahlungsbelastung, Versetzungsfehler

Die Strahlungsbelastung (total ionizing dose, TID und SEE) für den AD-Umsetzer CS5508 von Crystal, dieser Baustein war bei den Magnetometern auf DS1 und Rosetta RPC-Mag in Verwendung, wurde ausgiebig getestet und verifiziert, siehe [Omerbegović, 1999] und die Abbildungen B.5, B.6. Die Grafiken stellen den Übergang der Systemgrenzen vom Board (makroskopisches System) über Baustein bis zum Chip dar.

Viele der Effekte von hochenergetischen geladenen Teilchen auf Satelliten sind aufgrund der TID, sie trägt bei zur Degeneration von elektronischen Teilen und Verschlechterung bei Solarzellen. Die größte Beeinträchtigung für Solarzellen ist verursacht durch das Displacement-Damage (DD), dabei wird das Gitter durch Versetzung von Atomen aus ihrer nominellen Position hin zu Zwischengitterplätzen beschädigt. Zurück bleibt eine Gitterlücke und diese Plätze haben einen Haupteinfluss auf die Rekombinationsrate von Ladungsträgern und damit auf die Leistung der Solarzelle. Versetzungsfehler verursachen Leistungsverluste in der Größenordnung von 30 % die im Design berücksichtigt werden müssen. Als grobe Richtlinie gilt, daß Protonen im Bereich von 1 – 10 MeV die Hauptursache darstellen.

In der Nähe der Erde, außerhalb der Magnetosphäre, sind zwei Quellregionen für energiereiche Teilchen vorhanden: (i) galaktische kosmische Strahlung mit 11-jähriger Modulation im Aktivitätszyklus und (ii) Teilchen in Verbindung mit sporadischen Ereignissen auf der Sonne (Solaren Energetischen Teilchen (SEP)). Diese Ereignisse mit der größten Teilchenfluenz, d. h. Teilchenfluß integriert über die Eventzeit, kommen ein- bis zweimal pro Sonnenzyklus mit Zeitdauern von einigen Tagen vor.

Die gemessene kosmische Strahlung im Weltraum bei 1 AU besteht näherungsweise aus 83 % Protonen,

13 % Alphateilchen (Heliumkerne), 1 % Kerne mit Ordnungszahl  $> 2$  und 3 % Elektronen. Diese Zusammensetzung besteht über einen Energiebereich von einigen hundert MeV bis  $> 10^{20}$  MeV. Zusätzlich zu energetischen Protonen sind bei solaren Ereignissen Helium und schwerere Ionen, darunter Fe, C, O, beteiligt, siehe Seite 184.

### B.2.3 Ursachen und Tests hinsichtlich SEE

Eine Anomalie am Satelliten kann verbunden sein mit (i) einem Bedienungsfehler, z. B. falsche Telecommands (TCs), (ii) einer interner Fehlfunktion (Zuverlässigkeit) oder (iii) einem externen Ereignis, darunter elektrostatische Entladung, SEE, und TID Ursache. SEE Quellen für Erdorbits sind (i) auf ihrer Bahn gefangene Protonen, speziell bei der südatlantischen Anomalie (south atlantic anomaly, SAA) kommen Ionen bis tief in die Atmosphäre (Größe und Stärke der SAA sind antikorreliert mit dem 10.7 cm Fluß, die SAA hat eine westwärtige Drift mit  $\sim 0.3^\circ/\text{Jahr}$  mit kurzzeitiger überlagerter stärkerer Ostwärtsdrift von  $\sim 1.14^\circ/\text{Jahr}$  aufgrund von Jerks im Erdmagnetfeld), (ii) solare Protonen oder (iii) kosmische Strahlung. Die Anzahl der Anomalien bei Solarmaximum ist kleiner als bei Solarminimum, d. h. es besteht eine Modulation mit dem Aktivitätszyklus. SEEs sind verursacht durch Ansammlung einer genügend großen Energiemenge (Ladung) in einem sensitiven Volumen des elektronischen Bauteiles durch eine einzelnes Ion. Die Fähigkeit des Ions zum Auslösen eines SEE hängt ab vom linearen Energietransfer (linear energy transfer, LET), der Rate mit der das Ion Energie entlang des Pfades verliert, gemessen in Einheiten von MeV/Einheitslänge oder  $\text{MeVcm}^{-2}/\text{g}$ . Der Wirkungsquerschnitt für einen SEE ist gegeben durch die Art des Halbleiters, nur Teilchen mit einem LET über einem Schwellwert sind in der Lage einen SEE zu verursachen. Typische Teilchenenergien liegen im Bereich von  $10^{-2} - 10^5$  MeV pro Nukleon.

Die Tests für Geräte und elektronische Bauteile auf Suszeptibilität hinsichtlich SEEs gliedern sich in Versuche mit (i) schweren Ionen, (ii) induzierte SEU, SEL und SET durch Protonen und (iii) Laser SEE Versuche. Mit Protonen erfolgen Tests für Versetzungsfehler im Gitter (DD) und TID. Zukünftige Tests mit impulsförmiger elektromagnetischer Strahlung verwenden eine Art inversen Archimedes ( $\sim 287 - 212$  v. Chr.; aus seiner Werkstatt/Umgebung könnte auch der Antikythera-Mechanismus stammen, siehe Abb. A.2) Brennspiegel – der Legende nach sollen damit römische Schiffe in Brand gesetzt worden sein – in der aktuellen Version mit einem Reflektor und der Elektronik im Brennpunkt.

## B.3 Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit

Verlässlichkeit oder Zuverlässigkeit (Dependability), ein separater Punkt in den ECSS, ist definiert als

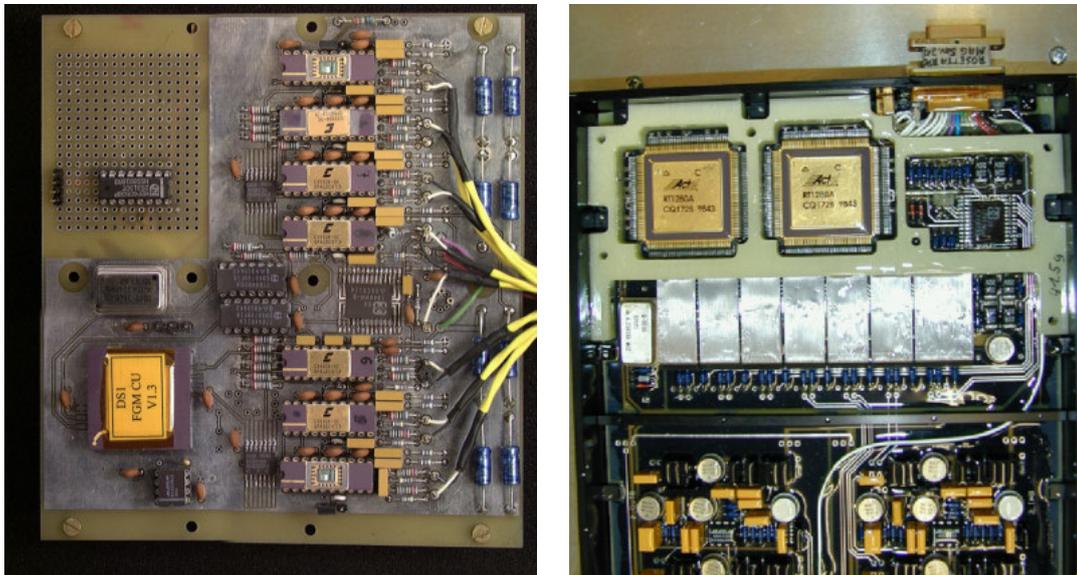
*... the extent to which the fulfilment of a required function can be justifiably trusted. (Notes: Its main components are reliability, availability and maintainability. Dependability shall be considered in conjunction with safety.)*

Mit Hard- und Softwareaspekten ergibt sich folgende Ergänzung und zusätzliche Überlegung:

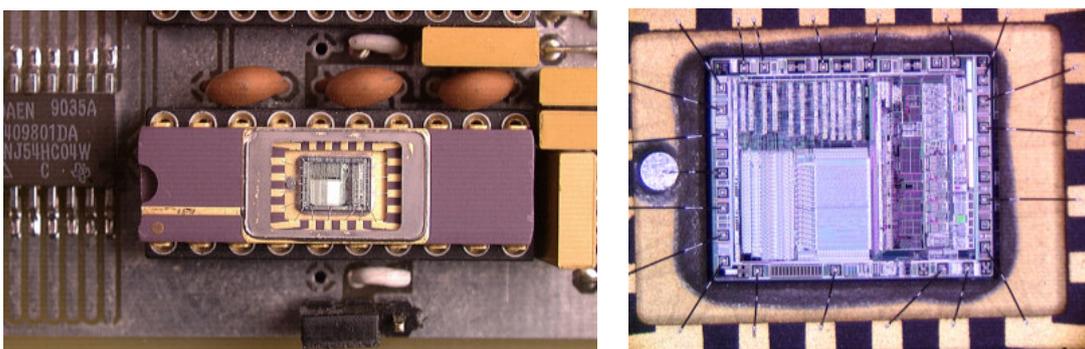
*... the trustworthiness of a (computer) system such that reliance can justifiably be placed on the services it delivers.*

Dabei sind zumindest zwei Aspekte von Vertrauen (reliance) zu berücksichtigen, nämlich (i) das System verhält sich gemäß den Spezifikationen und (ii) vermeidet Risiko, d. h. ein Verhalten mit unerwünschten Konsequenzen. Je "näher" sich die Spezifikationen und Risikobereiche sind, desto höher ist die Kritikalität eines Systems, diese Distanz bestimmt die anwendungsinhärente fehlertolerante Bandbreite. Zudem gilt es die Programm-Spezifikationen mitsamt der Validierung des Codes ins Zentrum des Entwicklungsprozesses zu bringen. Es gilt unterschiedliche Eigenschaftsmerkmale der Verlässlichkeit zu definieren (Auszug aus umfangreicheren Betrachtungen bei ECSS):

- Funktionsfähigkeit  $R(t)$  (reliability): Verlässlichkeit in Bezug auf Servicekontinuität; die Wahrscheinlichkeit, daß ein System mit seinen Spezifikationen während des Zeitraumes  $t$  übereinstimmt.



**Abbildung B.5:** DeepSpace 1 Magnetometer Bread Board Modell (links) und Rosetta RPC-Mag Platine (rechts). Zu erkennen sind die 7 ADCs, 3 für jede Achse jeweils von Inboard und Outboard Sensor, einer mit vorgeschaltetem Multiplexer für Housekeeping Daten. Die digitale Steuerung erfolgt mit den FPGAs, sie liefert auch das entsprechende digitale Protokoll zur S/C. © Özer



**Abbildung B.6:** Crystal CS5508 20 Bit AD-Umsetzer für DS1 Magnetometer und Rosetta RPC-Mag (Kap. 2.5), offenes Gehäuse mit Chipansicht für Testzwecke. Chipansicht des 20 Bit AD-Umsetzers Crystal CS5508.

- Verfügbarkeit  $A$  oder  $V$  (availability): Verlässlichkeit in Bezug auf Bereitschaft zur Verwendung; ist der zeitliche Prozentsatz in dem das System mit seinen Spezifikationen übereinstimmt.
- Sicherheit  $S(t)$  (safety): Verlässlichkeit in Bezug auf Vermeidung von katastrophalen Konsequenzen; ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein System ein spezifiziertes, unerwünschtes Verhalten während des ganzen Zeitraumes  $t$  nicht ausführt.
- Vertraulichkeit (security): Verlässlichkeit in Bezug auf Abwendung von unautorisiertem Zugriff und / oder Hantierung mit Information, es ist keine quantitative Definition möglich.
  - Geheimhaltung (Secrecy) – Wer kann Information lesen?
  - Integrität (Integrity) – Wer kann Daten ändern und wenn ja – wie?
  - Verfügbarkeit (Availability) – vgl. 2<sup>ten</sup> Punkt
- Verwendbarkeit (Usability), Wiederherstellbarkeit (Recoverability), Wartbarkeit (Maintainability), Erweiterbarkeit (Extendability), Vertrauenswürdigkeit (Trustability), ...

Bei einem Satellitensystem im (Low-Earth) Orbit gibt es in praktisch allen Fällen nicht die Möglichkeit der Wartung, die Interventionsmöglichkeiten sind stark limitiert, Ausnahmen sind (i) das Hubble Weltraumteleskop mit Space Shuttle Missionen (30 Jahre, Starts von 1981 – 2011, mit in Summe 135 Shuttleflügen, 5 Wartungsmissionen für das Hubble-Teleskop; Ende des Apollo-Programmes war 1975), (ii) Reparatur des Solar-Max Satelliten und (iii) Behebung eines Fehlers der High-gain Antenne (HGA) beim Compton Gamma Ray Observatory. Nach dem Ausfall des zweiten Reaction-wheels bei der Kepler-Mission war die ursprüngliche Zielsetzung (Exoplaneten-Suche) nicht mehr erreichbar, Änderungen auf alternative Fragestellungen (äußeres Sonnensystem, Sternbildungs-Regionen, etc.) erlauben allerdings die Fortsetzung der Teleskop-Beobachtungen – nunmehr als K2-Mission. Unter diesen Gesichtspunkten ist die Funktionsfähigkeit der wichtigste Parameter, die End-of-Life (EOL) Performance ist eine relevante Größe. Die Definition aller Attribute von Verlässlichkeit basiert auf klaren, eindeutigen Spezifikationen, sie müssen unbedingt (i) exakt, (ii) widerspruchsfrei, (iii) vollständig und (iv) autoritativ sein.

Verschlechterungen (Impairments) der Verlässlichkeit sind – dazu drei Definitionen resp. Anmerkungen:

- Ausfall, Versagen (Failure): Abweichung des gelieferten Services mit den Übereinstimmungen der Spezifikationen, ein Übergang von korrekter zu inkorrekt Servicelieferung.
- Fehlzustand (Error): Teil des Systemzustandes der verantwortlich dafür ist, daß ein System zum Versagen führt, zugleich sichtbar machen einer Fehlerursache im System.
- Fehlerursache (Fault): Befundene oder hypothetische Ursache eines Fehlzustandes. Die Ursache des Fehlzustandes ist vorgesehen zu verhindern oder zu tolerieren.

Die Fehlerursache – Versagens Kette gliedert sich gemäß Fehlerursache → Fehlzustand → Ausfall → Fehlerursache (nächst höhere Hierarchie) → Fehlzustand → Ausfall → ... →.

- Fehlerursache → Fehlzustand
  - Eine Fehlerursache die nicht durch einen Prozeß aktiviert wurde ist ruhend (dormant),
  - hingegen ist sie aktiv wenn ein Fehlzustand eintritt.
- Fehlzustand → Ausfall
  - Ein Fehlzustand ist latent wenn er noch nicht erkannt ist,
  - hingegen ist er detektiert durch einen Detektionsalgorithmus oder speziellen Mechanismus.
- Ausfall → Fehlerursache
  - Ein Ausfall tritt ein wenn ein Fehlzustand "durchgeht" und das gelieferte Service in Mitleidenschaft zieht und
  - er resultiert aus einer Fehlerursache für das System das mit seinen Komponenten interagiert.

Ob ein Fehlzustand tatsächlich zu einem Ausfall führt hängt ab von (i) der Systembeschaffenheit und dem Vorhandensein von Redundanz, (ii) der Aktivität des Systems nach dem Fehlzustand, ein Fehlzustand könnte überschrieben werden und (iii) der Definition von Ausfall aus der Sicht der Anwender. Folgende Maßnahmen können verwendet werden um Verlässlichkeit zu erreichen: (i) Verhindern der Fehlerursache um das Eintreten wenn möglich hintanzustellen, (ii) entfernen der Fehlerursache durch Methoden die geeignet sind die Anzahl und Schwere von Fehlerursachen zu minimieren, (iii) Vorhersage von Fehlerursachen um die aktuelle Anzahl und zukünftige Ereignisse und deren Gewichtung auszuwerten und zu modellieren, weiters (iv) Fehlertoleranz durch Techniken die darauf abzielen ein Service in Übereinstimmung mit den Spezifikationen zu liefern, trotz Fehlerursachen. Die Fehlervermeidung ist bestimmt durch Fehlervermeidung und Fehlerentfernung. Ein System benötigt eine Art von Redundanz um Fehlerursachen zu tolerieren, sie kann in drei unterschiedlichen Bereichen realisiert werden:

- Gebiet der Information; redundante Information, z. B. fehlerkorrigierende Codes (error correcting codes), robuste Datenstrukturen.
  - Für alle error correcting codes (ECC) gilt  $(2t + p + 1) \leq d$ ,  $d$  Hamming Distanz des Codes,  $t$  Anzahl der tolerierbaren Einzelbitfehler,  $p$  Anzahl der zusätzlich detektierbaren Fehler
  - Robuste Datenstrukturen; Speichern die Anzahl der Elemente, redundante Zeiger, Status und Typinformation, Checksummen oder CRC
  - Anwendung spezifischen Wissens
- Gebiet des Raumes / Abstandes; Replikation von Komponenten, z. B. 2 oder mehrere CPU's, unterbrechungsfreie Stromversorgung (UPS), realisiert im Falle der VLF Anlage (Kap. 4.1.4).
  - aktive Redundanz; parallele störtsichere Komponenten, Abstimmung – dreifache modulare Redundanz (triple modular redundancy, TMR)
  - passive oder einsatzbereite Redundanz; einsatzbereite Komponenten befinden sich in Betrieb (hot standby) oder starten bei Ausfall (cold standby), zweiteres ist realisiert bei Cluster FGM, siehe Kap. 2.1. Die Konfiguration bei ASPOC/MMS ist dargestellt in Kap. A.3.2.
- Zeitliche Domäne; Replikation von Berechnungen, z. B. wiederholte Bestimmung von Resultaten durch unterschiedliche Algorithmen, mehrfaches senden von Nachrichten über Kanäle (Kanal-kodierungs-Methoden).
  - mehrfache Berechnungen; eine Funktion wird  $n$  mal mit dem selben Eingangswert berechnet, das Ergebnis wird überprüft durch Akzeptanztests oder es wird unter den Mehrfachresultaten eine entsprechende Wahl vorgenommen
  - mehrfaches senden von Nachrichten; die Nachrichtenübermittlung wird  $n$  mal wiederholt, nochmalige Aussendung nur bei Versagen (positive acknowledge retransmit, PAR), routinemäßige  $n$  fache Wiederholung mit verminderter zeitlicher Unschärfe bei Echtzeitsystemen

Ziele der fehlertoleranten Modellierung sind (i) in der Designphase das entwickeln und implementieren eines Systems um die benötigte Verlässlichkeit zu erreichen und (ii) in der Validierungsphase ein erlangen von Vertrauen ob das Anforderungsziel der Verlässlichkeit erreicht wurde. Beide Schritte sind durch das Systems Engineering abgedeckt, siehe Kap. C.1.

Eine kurze Anmerkung dazu: Zu einer folgenreichen Abweichung aufgrund hoher Dynamik bei der Fallschirm-Entfaltung, verursacht durch Kombination unterschiedlicher Parameter (also eine falsche Vorhersage und kein Ausfall eines spezifischen Subsystems oder Komponente), kam es bei der Landung des Schiaparelli Modules (19 Okt. 2016) der ExoMars 2016 Mission. Eine Untersuchungskommission stellte 4 Grundursachen des Ausfalles fest: (i) Die Dynamik des Landefallschirms wurde zu konservativ modelliert, (ii) ein zu langes verharren und inadäquates handieren eines Sättigungsflags (angenommene 15 msec) – man erinnere sich an den Fehler beim Start von Cluster 1996 –, (iii) Failure Detection, Isolation and Recovery (FDIR) und Robustheit des Designs waren ungenügend und (iv) Pannen im Management mit Zulieferer und Akzeptanz von Hardware. Zu einem Totalausfall aufgrund eines Softwarefehlers kam es ebenfalls bei der Hitomi Mission, das Lagekontroll-System des Röntgensatelliten steuerte das Teleskop

Verteilung	Parameter		Funktionsfähigkeit $R(t)$
	Ausfallsrate $\lambda(t)$	Wahrsch.-Dichtefunktion $f(t)$	
Konstant	$\lambda$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$
Weibull	$\alpha \lambda (\lambda t)^{\alpha-1}$	$\alpha \lambda (\lambda t)^{\alpha-1} e^{-(\lambda t)^\alpha}$	$e^{-(\lambda t)^\alpha}$
Lognormal	$f(t)/R(t)$	$1/(\sigma t \sqrt{2\pi}) \times e^{-k}$	$1 - 1/(\sigma \sqrt{2\pi}) \times \int_0^t (1/x) e^{-k} dx$

**Tabelle B.3:** Verteilungsfunktionen der Ausfallsraten, Dichtefunktionen und Funktionsfähigkeit für drei unterschiedliche Funktionen,  $k = 1/2((\ln t - \mu)/\sigma)^2$ .

mit den Düsen in die falsche Richtung und somit dermaßen in Rotation, daß es auseinanderbrach.

Techniken sind (i) deterministische Modellierung, d. h. die maximale Anzahl an Fehlerursachen, die toleriert werden kann, ohne das ein Systemausfall vorliegt, das Evaluierungskriterium ist  $n$ -resilency, d. h. ein System ist  $n$ -resilient wenn es  $n$  Komponentenausfälle zulassen kann und (ii) probabilistische (quantitative) Modellierung, Komponentenausfall und Reparaturraten werden als stochastischer Prozeß beschrieben, unter Berücksichtigung von Ausfallsraten und statistischen Modellen.

Bei der probabilistischen Modellierung gibt es drei verschiedene Formen von Informationen die verwendet werden um die Verlässlichkeit des Systems zu modellieren.

- Historischer Bezug (Statistik); Information/Erfahrung über das Verhalten von identischen oder sehr ähnlichen Komponenten in der Vergangenheit wird bewertet.
- Experimenteller Bezug (Statistik); Information/Erfahrung wird gewonnen durch experimentieren bei Einzelkomponenten des Systems, bei Software typischerweise Tests und Debugging.
- Struktureller Bezug; Allgemeine Verlässlichkeit eines Systems wird abgeleitet von der Struktur und den Verlässlichkeitszahlen seiner Einzelobjekte.

#### Probabilistische Funktionen

- Funktionsfähigkeit (Reliability)  $R(t)$ , ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich ein System während der ganzen Zeit  $t$  in Übereinstimmung zu den Spezifikationen verhält.  $R(0) = 1$ ,  $R(\infty) = 0$ ,  $R(t) = 1 - Q(t)$ . In diesem Zusammenhang in der Analyse relevant sind u. a. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA), Hardware-Software Interaction Analysis (HSIA), Fault Tree Analysis (FTA), Worst Case Analysis (WCA), Failure Detection Isolation and Recovery (FDIR) Analysis.
- Ausfallswahrscheinlichkeit  $Q(t)$ , ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich das System während der ganzen Zeit  $t$  nicht gemäß seinen Spezifikationen verhält.

#### Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion (Fehlerhäufigkeit)

- Die Ausfalldichte (Failure density)  $f(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  ist definiert durch die Anzahl der Ausfälle während  $\Delta t$ ,  $f(t) = dQ(t)/dt = -R(t)/dt$ .

#### Ausfallsrate (Failure rate)

- Die Ausfallsrate  $\lambda(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  ist definiert durch die Anzahl der Ausfälle während  $\Delta t$  in Bezug zur Anzahl der korrekten Aktionen zur Zeit  $t$ ,  $\lambda(t) = f(t)/R(t) = -(dR(t)/dt) \times (1/R(t))$ .

Eine konstante Ausfallsrate wird verwendet um die herkömmliche "Badewannenkurve" zu modellieren. Die Weibull Verteilung der Ausfallsrate verwendet man um Anfangs- und Finalausfälle nach Ablauf der Zeitperiode von Komponenten darzustellen:  $\alpha < 1$  Ausfallsrate nimmt mit der Zeit ab,  $\alpha = 1$  konstante Ausfallsrate,  $\alpha > 1$  Ausfallsrate steigt mit der Zeit an. Die Lognormal Verteilung der Ausfallsrate gilt für Halbleiter, sie ist der beste Fit bei empirischen Daten, es wird angenommen, daß sie eine geeignete Beschreibung für Betriebszeiten bei Halbleitern darstellt, für die Zusammenhänge siehe Tab. B.3. Die strukturbasierte Modellierung auf Wahrscheinlichkeitsbasis besteht aus folgenden Annahmen und Modellen

- Annahmen; identifizierbare, unabhängige Komponenten, jede mit einer gegebenen Ausfallsrate, die Modellierung basiert auf der Struktur der Verbindung der einzelnen Komponenten,
- Modelle; (i) einfache Blockdiagramme, (ii) beliebige Blockdiagramme, (iii) Markov Modelle, (iv) Verallgemeinerte stochastische Petri Netze (Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN),

einzelparametrische Maßzahlen sind gegeben durch

- Mittlere Zeit bis zum Ausfall (mean time to failure)  $t_{\text{MTTF}} = \int_0^\infty t f(t) dt$ ,
- Mittlere Zeit bis zur Behebung (mean time to repair)  $t_{\text{MTTR}} = \int_0^\infty t f_r(t) dt$ ,
- Missionszuverlässigkeit (mission reliability)  $R_m = R(t_m)$ , mit  $t_m$  als Einsatzdauer,
- Stationäre Verfügbarkeit (steady state availability)  $A = t_{\text{MTTF}} / (t_{\text{MTTF}} + t_{\text{MTTR}})$ .

Die Behebungsrate  $\mu(t)$  ist analog zur Fehlerrate, meist konstant  $\mu(t) = \mu$  und in Beziehung zur mittleren Zeit bis zum Ausfall  $t_{\text{MTTR}} = 1/\mu$ . Zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit (Zuverlässigkeit) von Weltraummissionen gilt die (i) Annahme einer Missionsdauer  $t_m$ , (ii) während der Mission gibt es keine Möglichkeit der Wartung oder Reparatur, (iii) ein typische Beispiel wäre z. B. ein Flug zum Mars und (iv) die Tauglichkeit von Designs hängt von der Missionsdauer  $t_m$  ab. Verfügbarkeit ist der zeitliche Prozentsatz in dem das System in Übereinstimmung gemäß den Spezifikationen ist, ebenfalls bezeichnet als stationäre oder augenblickliche Verfügbarkeit. Für  $t \rightarrow \infty$  ergibt sich die Verfügbarkeit  $A = t_{\text{MTTF}}/t_{\text{MTBF}} = t_{\text{MTTF}}/(t_{\text{MTTF}} + t_{\text{MTTR}})$  mit der mittleren Zeit zwischen Ausfällen (mean time between failures,  $t_{\text{MTBF}}$ ). Ohne Wartung und Reparatur ergibt sich  $t_{\text{MTTR}} = \infty$ , d. h.  $A = 0$ . Missions-Verfügbarkeit  $t \rightarrow t_m$  ergibt sich zu  $A_m = 1/t_m \times \int_0^{t_m} R(t) dt$ .

Eine typische Ausfallsrate für Halbleiter, gegeben in failures per unit time (FITs), zeigt, daß die ansteigende Periode am Ende der Betriebsdauer keine Rolle spielt. Bei Modellen zur Fehlerursache bei CMOS very large scale integration (VLSI) gilt (i) Fehlerursache binär (ja / nein, 0 / 1), (ii) überbrücken der offenen Fehlerursachen, (iii) parametrische und transiente Fehlerursachen, sie vermindern die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit, z. B. Leckströme am Substrat, Gate-Oxid Leckströme, Variationen in den Schwellspannungen, kapazitive Kopplungen, Übersprechen und (iv) verzögerte Fehlerursachen, sie sind Einzelgate- oder pfadorientierte Verzögerungen. Fehlerursachen bei Halbleitern sind stressabhängig, der bedeutendste Einflußfaktor ist die Temperatur  $T$ . Der allgemeine Zusammenhang zwischen der Aktivierungsenergie von Ausfällen und der Temperatur ist durch die Arrhenius Gleichung B.1 (Svante August Arrhenius, 1859 – 1927) gegeben

$$R = R_0 e^{-E_A/kT}, \quad (\text{B.1})$$

mit  $R_0$  einer Konstante,  $T$  Temperatur,  $E_A$  Aktivierungsenergie (eV) und  $k$  Boltzmann Konstante (eV/K). Man beschleunigt Stresstests für Halbleiter um (i) "freaks" (ungewöhnliche Ereignisse) und weitere (ii) frühe Ausfälle (screening) zu vermeiden. Die Bedingungen dafür sind höhere Temperatur und Temperaturzyklen, Spannungs- und Feuchtigkeitsstress,  $\alpha$  Teilchen und hohe Spannungsgradienten. Für Software gibt es keine entsprechende empirische mathematische Basis um Stress als Methode zur Charakterisierung des Verhaltens von Komponenten zu verwenden. Allerdings gibt es praktisch immer eine wechselseitige Abhängigkeit von Hardware und Software. Bei Netzwerken spielt zusätzlich die Topologie (verbunden mit der Kaskadierung) eine wichtige Rolle, z. B. Ring-, Maschen- oder p-Cycle Strukturen. Paradigmatisch werden oft "Sandhaufen"-Dynamiken zur Beschreibung von Last-Kaskaden verwendet. Bezüglich der Stabilität eines Netzwerkes gibt es eine kritische (maximale) Anzahl an Verbindungen.

### B.3.1 ADC Definitionen

Die folgenden Parameter gilt es beim ADC zu berücksichtigen: (i) Umsetzzeit (Conversion time): Die benötigte Zeit für eine vollständige Messung vom ADC. Sie enthält nicht die Erfassungs- und Multiplexer-Zeit oder andere Zeiten der kompletten Umsetzung und ist kleiner als die Durchsatzzeit. (ii) DC Gleichtaktfehler (DC Common-Mode Error): Diese Spezifikation ist anwendbar auf ADCs mit differentiellen Eingängen. Es ist die Änderung im Ausgangscode wenn die Analogspannung an den beiden Eingängen im Gleichtakt verändert wird, ausgedrückt in LSBs. (iii) Differentielle Nichtlinearität, (Differential Nonlinearity, DNL):

DNL ist ein Maß für die ungünstigste Abweichung vom idealen 1 LSB Eingangsspannungs-Bereich verbunden mit jedem Ausgangscode. Sie kann ausgedrückt werden als Prozentsatz der Vollausssteuerung. Ist die DNL größer als 1 LSB führt dies zu fehlenden Codes im ADC.

Dynamische Spezifikationen stehen in Zusammenhang mit AC Eingangssignalen, dazu gehören S/N Verhältnis (SNR), SINAD ( $S/(N+D)$ ), ENOB, THD, IMD, FPBW und SSBW.

(iv) Effektive Anzahl der Bits (Effective Number of Bits, ENOB): Die ENOB eines ADCs werden bestimmt durch Messung der SINAD mittels  $ENOB = (SINAD - 1.76)/6.02$ . Diese Spezifikation kombiniert die Effekte von einigen anderen dynamischen Spezifikationen. Fehler resultieren aus dynamischer und integraler Nichtlinearität, fehlenden Codes, THD und Fluktuationen in der Abtastzeit. (v) Bandbreite bei Vollausssteuerung (Full Power Bandwidth, FPBW): Die Frequenz bei der das S/N Verhältnis um 3 dB abgenommen hat, relative zum niederfrequenten Level, für ein Eingangssignal, daß bei (oder nahe bei) der Vollausssteuerung liegt. Dies entspricht einem Abfall der ENOB um 1/2 Bit relativ zum LF-Level. (vi) Verstärkungsfehler (Gain Error, Full Scale Error): Die Differenz, gewöhnlich ausgedrückt in LSBs, zwischen der Eingangsspannung die idealerweise den Code für die Vollausssteuerung erzeugt und der tatsächlichen Eingangsspannung die diesen Code erzeugt. (vii) Verstärkungs Temperatur Koeffizient (Gain Temperature Coefficient, Full Scale Temperature Coefficient): Änderung in der Verstärkung relativ zur Temperaturänderung ausgedrückt in ppm/°C. (viii) Integrale Nichtlinearität (Integral Nonlinearity, Linearity Error, INL): Ungünstigste Abweichung der ADC Transferfunktion von der Linie zwischen den ADC Endpunkten Null und Vollausssteuerung. Sie wird angegeben in Prozenten des Endausschlages oder in Teilen von LSBs und bezeichnet als INL oder ILE. (ix) Intermodulations-Störung (Intermodulation Distortion, IMD): Zwei nahegelegene Frequenzkomponenten in einem Signal interferieren durch Nichtlinearitäten im ADC und erzeugen Signale mit zusätzlichen Frequenzen. IMD ist für gewöhnlich definiert als das Verhältnis der rms Summe der Amplituden der Störungsprodukte zur rms Summe der Eingangsfrequenz-Amplitude. (x) Geringwertigstes Bit (Least Significant Bit, LSB): In einem binärcodierten System ist das LSB jenes Bit mit dem geringsten Wert oder Gewicht. Es ergibt sich Quotient des Endausschlages der Spannung und  $2^n$ . (xi) Fehlende Codes (Missing Codes): Verursacht ein inkrementeller Anstieg oder Abfall der Eingangsspannung am ADC einen inkrementellen Anstieg oder Abfall am numerischen Ausgang der größer als 1 LSB ist, dann liegen fehlende Codes vor. Damit gibt es digitale Kombinationen die mit keiner Eingangsspannung erreicht werden können. (xii) Höchstwertigstes Bit (Most Significant Bit, MSB): In einem Binärsystem das Bit mit dem höchsten Wert oder Gewicht, entspricht der Hälfte der Endausssteuerung. (xiii) Offset (Zero Error): Die Differenz zwischen der idealen Eingangsspannung (1/2 LSB) und der tatsächlichen Eingangsspannung die notwendig ist um einen Übergang von 0 auf 1 LSB zu erzeugen. Alle digitalen Codes in der Übertragungsfunktion haben den selben Wert an Offsetversatz, für gewöhnlich ausgedrückt in LSBs. (xiv) Max. Harmonische (Peak Harmonic): Die Amplitude, relativ zur Grundfrequenz, mit der größten harmonischen Komponente resultierend von der A/D Umsetzung eines AC Signals. (xv) Empfindlichkeit auf Eingangsspannungs-Änderungen (Power Supply Sensitivity): Die Sensitivität eines Umsetzers bezüglich Änderungen der DC Spannungsversorgung. (xvi) Quantisierungsfehler (Quantization Error): Dieser Fehler tritt prinzipbedingt bei allen A/D Umsetzern auf. Nachdem ein idealer Umsetzer endliche Auflösung hat, liefern alle Analogspannungen zwischen zwei benachbarten Ausgangscodes den selben digitalen Wert. Es ist eine Abweichung bis zu 1/2 LSB möglich. (xvii) Radiometrische Anwendung: Viele A/D Anwendungen benötigen eine genaue, stabile Referenzspannung, die Eingangsspannung wird mit ihr verglichen um den digitalen Ausgangswert zu erhalten. Dieser Ansatz resultiert in einer absoluten Umsetzung. Einige Anwendungen verwenden Meßumformer oder Signalquellen deren Referenz proportional zu einer externen Referenz ist. In diesen radiometrischen Anwendungen wird die Referenz für die Signalquelle verbunden mit dem Referenzeingang des Umsetzers. Somit verursacht jede Variation in der Spannungsquelle der Referenz eine Änderung der Umsetzerreferenz und die Genauigkeit wird erhöht. (xviii) Auflösung: Das kleinste analoge Inkrement entsprechend einer Änderung von 1 LSB im ADC Code. (xix) Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio, SNR, S/N): Das Verhältnis der Signalamplitude zum Rauschpegel des Hintergrunds. Der Hintergrund Rauschlevel wird bestimmt durch Integration der Rauschleistungs-Dichte über die gewünschte Bandbreite. (xx) Signal-Rausch und Stör Verhältnis (Signal-to-Noise and Distortion Ratio, SINAD, S/N+D): Ähnlich dem S/N Verhältnis inkludiert das SINAD harmonische Störkomponenten als Teil des Rauschens. (xxi) Kleinsignal Bandbreite (Small Signal Bandwidth, SSBW): Die Frequenz bei der das S/N Verhältnis um 3 dB abgenommen hat, relativ zum niederfrequenten Wert, für ein Eingangssignal das wesentlich kleiner als die Vollausssteuerung am Eingang ist, z. B.

20 dB oder 40 dB unterhalb der Vollaussteuerung. (xxii) Gesamtharmonische Störung (Total Harmonic Distortion, THD): Aufgrund der inhärenten Nichtlinearitäten sogar bei idealen ADC Transferfunktionen erzeugen ADCs Harmonische der Eingangsfrequenz. THD ist definiert als das Verhältnis der rms Summe der Amplituden der harmonischen Störungen zur Amplitude des Eingangssignals. (xxiii) Durchsatzrate (Throughput Rate): Die maximale kontinuierliche Konvertierungsrate eines ADCs. (xxiv) Durchsatzzeit (Throughput Time): Die Inverse der Durchsatzrate. (xxv) Gesamter nichtabgeglichener Fehler (Total Unadjusted Error, TUE): Die maximale Abweichung der Spannung entsprechend zum Zentrum des digitalen Codes in Verbindung zum Eingangsspannungsbereich für den idealen Fall. TUE inkludiert den Offset- und Verstärkungs-Fehler und Fehler bezüglich differentieller und integraler Nichtlinearitäten.

DC Genauigkeit und Leistungsdaten sind gegeben durch DNL, INL, fehlende Codes, Offsetfehler (inkl. dessen Temperaturkoeffizient) und Verstärkungsfehler (inkl. dessen Temperaturkoeffizient). Zu den Leistungsdaten am Analogeingang gehören analoger Eingangsstrom (inkl. Temperaturkoeffizient), analoger Eingangswiderstand und Eingangskapazität. Im zeitlichen Verhalten sind maximale und minimale Konvertierungsrate sowie Haltezeit der Daten relevant. Die Leistungs-Spezifikationen sind gegeben durch die Versorgungsspannungen +Vcc, -Vee und den nominellen Leistungsverbrauch. Unterschiedliche Testpegel gibt es bei statischen/dynamischen und funktionalen Tests und beim Umschalten in andere Moden.

### Quantisierungsfehler

Der Signal-Rausch-Abstand eines  $(B + 1)$  Bit Quantisierers ist gegeben durch

$$SNR = 10 \times \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_e^2} = 10 \times \log_{10} \frac{12 \times 2^{2B} \sigma_x^2}{X_m^2} = 6.02 \text{ dB} + 10.8 - 20 \times \log_{10} \frac{X_m}{\sigma_x} \quad (\text{B.2})$$

mit  $\sigma_x$  dem Effektivwert des Signals und  $X_m$  dem Aussteuerungsbereich des A/D Wandlers. Wählt man  $\sigma_x = X_m/4$  erhält man als Ergebnis

$$SNR \approx 6 \times B - 1.25 \text{ dB}, \quad (\text{B.3})$$

das entspricht für die übertragenen 14 Bit von Cluster-FGM einem Wert von  $\sim 80$  dB. Bei theoretisch möglicher 16 Bit Auflösung des Chips CS5016 wären es 92 dB, siehe Abb. 2.7.

# Anhang C

## Software und Datenverarbeitung

### C.1 Systems Engineering

Systems Engineering (SE) wird durchgehend als Richtlinie, konzeptionelles Modell und methodische Komponente zur Lösung der komplexen Problemstellungen verwendet (bekanntlich zeigen natürliche Prozesse meist fundamentale Unstetigkeiten), siehe [Haberfellner et al., 2002], Diskrepanzen in der Vorgangsweise können dadurch aufgelöst oder zumindest stark verringert werden. Die nachstehende Betrachtungsweise (Konventionen über das Herangehen) mag von fundamentaler Bedeutung sein – oder auch nicht – die SE Philosophie und Problemlösungswege tragen mit Sicherheit zum Verständnis bei.

**SE-Philosophie** Die SE-Philosophie gliedert sich in Systemdenken ("Systems Thinking") und Vorgehensmodell ("Action Modell").

Als allgemeine Designprinzipien im Systems Thinking gelten (i) eine minimale Anzahl an Schnittstellen, (ii) eine modulare Struktur, (iii) das Prinzip von "piecemeal engineering" nach Karl R. Popper (1902 – 1994), d. h. komplexe Systeme werden nicht in großen, irreversiblen Schritten verändert, sondern in kleinen Stufen mit der Option der Korrektur – trotzdem wird holistisch gedacht – und (iv) das Prinzip der minimalen Präjudizierung, d. h. die Lösung mit dem meisten Spielraum für zukünftige Entwicklungen wird bevorzugt. Als anerkannte Basistechniken dienen Bubble-Charting und hierarchische Strukturierung mittels Object-breakdown-structure.

Das Action Modell besteht aus den vier Basisblöcken (i) von Allgemeinen zum Speziellen, (ii) Denken in Varianten und Alternativen, (iii) der Prozess der Systementwicklung und Implementierung wird in Projektphasen unterteilt – die Makrologik – und (d) unabhängig von der Art des Problems und der Projektphase wird ein Problemlösungszyklus als eine Art Arbeits- und Denk-Logik verwendet – die Mikrologik. Die Feinunterteilung des Problemlösungszyklusses besteht (i) in einem Suchen nach Zielen mittels Situationsanalyse und deren Formulierung, (ii) in einer Suche nach Lösungen, d. h. Synthese und Analyse von Lösungen und deren Evaluierung sowie (iii) der Auswahl einer Lösung in einem Entscheidungsprozeß.

**Problemlösung** Der eigentliche Problemlösungs-Prozess gliedert sich in Systemgestaltung ("Systems Design") und Projekt Management.

Im Systems Design liegt der Schwerpunkt auf dem Problem selbst, den systematischen Zielen, technischen Aspekten und der Struktur der Lösung. Es handelt sich um die Problemlösung im engeren Sinne.

Im Projekt Management liegt der Schwerpunkt auf der organisatorischen Seite, d. h. der Planung von Ressourcen, Organisation des Informationsflusses, Prozeß der Meinungsbildung und Entscheidung. Als Instrumente und Techniken im Projektmanagement – speziell in Planung und Kontrolle – dienen (i) Objekte zur Strukturierung der Aufgaben, (ii) Zuordnung der Aufgaben, (iii) Netzwerk- und Balken-Diagramme zur Planung und Kontrolle von Terminen und Fristen, (iv) Planung von Ressourcen mittels Kennzahlen aus ähnlichen erfolgreichen vorherigen Projekten, (v) Zeit-Kosten Diagramme und (vi) Darlegung der Fortschritte im Projekt.

Bezeichnung	Mode, nominelle Ausgangs-Abtastrate			
	A – 16 Hz	B – 18 Hz	C – 22 Hz	D – 67 Hz
Flugmodell F6	15.522(1)	18.43(1)	22.4214(1)	67.2643(1)
Flugmodell F7	15.522(1)	18.43(1)	22.4218(1)	67.2656(1)
Flugmodell F8	15.522(1)	18.43(1)	22.4217(1)	67.2651(1)
Flugmodell F9	15.522(1)	18.43(1)	22.4214(1)	67.2644(1)
Ersatzmodell FS	15.720(1)	18.43(1)	22.4218(1)	67.2654(1)

**Tabelle C.1:** Messung der Cluster FGM Abtastraten für die Flugmodelle und das Ersatzmodell in allen Moden. Die Angabe in Klammer ist die Unsicherheit der letzten Nachkommastelle.

Byte	Bezeichnung	Kombination / Wert
1 / 2,3	Fluginheit (Ersatz) / Typ der Messung	6, 7, 8, 9 (5) / FD, FS
4 / 5 / 6	Bereich / Sensor / ADC	3, 5 / I, O / 1, 2
7 / 8	Mode / Nummer der Messung	B, N / 1, 2, 3, 4, 5, 6

**Tabelle C.2:** IWF Dateinamenstruktur für die Bodenkalibration der Cluster Magnetometer mit den kompakten Bezeichnungen der möglichen Konfigurationen des Instruments.

## C.2 Digitale Frequenzanalyse und Meßmethoden

### C.2.1 Abtastrate und Bandbreite bei Cluster FGM

#### Allgemein

Dieses Kapitel liefert eine Einführung in die unterschiedlichen Formulierungen und beschreibt die Algorithmen wie sie für die Kalibration verwendet werden. Die Cluster FGM Abtastraten- und digitale Frequenzanalyse der Flugmodelle F6, F7, F8, F9 und der Ersatzeinheit FS werden dargestellt. Um die Kalibrierparameter zu erhalten wurde ein Optimierungs-Ansatz mittels minimaler Fehlerquadrate realisiert. Bona fide wird diese Technik für alle Modelle verwendet. Detaillierte Resultate, der Meßaufbau und die Kalibrierung sind in nachfolgenden Abschnitten angegeben. Die Moden von Cluster FGM werden durch die Abtastrate, d. h. durch die zeitliche Auflösung, unterschieden. Grundsätzlich gibt es vier Moden, siehe Tab. C.1, mit den Werten hervorgegangen aus umfassenden Analysen und akribischen Untersuchungen. In der Tabelle stehen bereits die gemittelten Werte, bestimmt durch umfangreiche und zeitaufwendige Tests. Es wurden nur Datensätze von hoher Qualität verwendet, d. h. bestmögliches Signal-Rausch-Verhältnis und die Frequenz des Testsignals ist unter der Nyquist Frequenz,  $f_T < f_{Ny}$ . Die Zeitreihen reichen aus um die Abtastrate mit der notwendigen Präzision bestimmen zu können. Das Magnetometer hat prinzipiell sechs mögliche operative Bereiche, allerdings werden während der Cluster Mission nicht alle verwendet, Tab. 2.1 zeigt die aktiven Kombinationen. Die Prozessierung der Daten wird beträchtlich vereinfacht wenn nicht zu oft eine Bereichsumschaltung stattfindet, da jeder Bereich seine eigenen Kalibrierfaktoren hat und dies berücksichtigt werden muß. In Anbetracht der effektiven 14 Bit Auflösung der Magnetfeldmessung wurde ein Faktor 4 zwischen den einzelnen Bereichen realisiert.

#### Archivierung und Dokumentation

Für alle Testläufe und dokumentierte Daten gibt es eine einheitliche Namenskonvention für die Dateien, beginnend mit der Ziffer für die Flugmodelle oder der Ersatzeinheit. Die Bezeichnung besteht aus einer Kombination aus Buchstaben und Zahlen. Die letzte Ziffer eines jeden Namens gibt die Anzahl der Messungen an. Die kompakte Nomenklatura ist wiedergegeben in Tab. C.2, sie ist notwendig um Resultate von Einzelmessungen in den Dokumenten [Eichelberger et al., 1999b], [Eichelberger et al., 1999a], [Eichelberger et al., 1999c] und [Eichelberger et al., 2000b] schnell aufzufinden und systematisch zuordnen zu können.

### Technik und Software der Kalibration

Mit dem Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate (least square method) können die Kalibrierparameter einfach bestimmen werden. Die korrekten Parameter zeichnen sich dadurch aus, daß die Resultate ein möglichst kleines Residuum aufweisen. Diese Technik ist sehr effizient, vorausgesetzt die Eingangsdaten (Complete Calibration Data, CCD-Record) für die Optimierung sind von hoher Qualität und die Startwerte werden "günstig" gewählt. Dazu noch einige wichtige Vorbemerkungen: (i) Die Bestimmung von Bandbreiten und Abtastraten der Instrumente erfolgt nicht theoretisch aus dem Elektronik-Layout der Schaltung heraus durch die Anwendung rigoroser mathematischer Theoreme und Lemmata, speziell einfache Funktionen in der Analyse ausgenommen. Es werden Annahmen eingeführt deren Gültigkeitsdomänen nicht präzise definiert sind, letzten Endes werden sie begründet durch ihren Erfolg in der Auswertepaxis. (ii) Eine der wichtigsten, aber auch sehr schwierigen Aufgaben, ist der ständige Austausch zwischen Entwicklung/Theorie auf der einen Seite und Experimente mit Messungen auf der anderen. Der Schwerpunkt liegt auf der technischen, physikalischen Seite und weniger auf mathematischer Strenge. Einer etwas technische Diskussion folgt anschließend eine intuitive Interpretation um das qualitative und quantitative Verhalten der Lösung verstehen zu können. Eine parametrische Optimierung wird verwendet um einen Satz an Parametern  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  zu finden, die in einer gewissen Weise als "optimal" gelten können. In diesem Zusammenhang ist es die Minimierung von System Charakteristiken die von  $x$  abhängen, oder anders formuliert: Die Zielfunktion  $f(x)$  wird minimiert. Bedingungen sind in der Form von Identitäten  $G_i(x) = 0$  mit  $i = \{1, \dots, me\}$ , Maximalgrößen (Ungleichheiten),  $G_i(x) \leq 0$ , mit  $i = \{me + 1, \dots, m\}$  und / oder Grenzen für die Parameter,  $x_l$  und  $x_u$ , gegeben. Die allgemeine Beschreibung des Problems ist somit folgende: Minimierung von  $f(x)$ ,  $x \in R^n$  unter den Bedingungen  $G_i(x) = 0$ ,  $i = \{1, \dots, me\}$  und  $G_i(x) \leq 0$ ,  $i = \{me + 1, \dots, m\}$ , sowie  $x_l \leq x \leq x_u$ . Dabei ist  $x$  der Vektor von Design-Parametern  $x \in R^n$ ,  $f(x)$  als Zielfunktion liefert einen skalaren Wert  $f(x) : R^n \rightarrow R$  und  $G(x)$  ist eine Vektorfunktion. Sie liefert die Werte von den Gleichheits- oder Ungleichheits-Bedingungen an den Stellen der Parameter  $x$ ,  $G(x) : R^n \rightarrow R^m$ . Eine effiziente und vor allem quantitativ exakte Lösung dieses Problems hängt nicht nur von der Größe des Systems im Sinne von Parametern und Randbedingungen ab, sondern auch von der Charakteristik der Zielfunktion selbst. Generell schwierig zu lösen sind Aufgaben mit Nichtlinearitäten (Nonlinear Programming, kurz NP Problem), die Zielfunktion und Randbedingungen können nichtlinear von den Design-Variablen abhängen, eine Lösung erfolgt i. Allg. iterativ, d. h. nach jedem Rechenschritt wird die Richtung der Minimierung neu bestimmt. Eine Optimierung in der digitalen Frequenzanalyse erfolgt deshalb über die Minimierung der Zielfunktion bestehend aus mehreren Variablen. Es kann vorkommen, daß die Variablen keinen Einschränkungen hinsichtlich ihres Wertebereiches unterworfen sind (unconstrained minimization), mathematisch kann dies folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\min\{f(x)\} : x \in R^n, x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (C.1)$$

Die Routine findet ein Minimum (unconstrained) von einer Summe von Quadraten von  $m$  nichtlinearen Funktionen in  $n$  Variablen ( $m/n$ ), d. h. sie ist anwendbar auf Probleme der Form

$$\min\{f(x)\} = \sum f_i^2(x), i = (1, 2, \dots, m), x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (C.2)$$

Im allgemeinen wird die Routine für Funktionen verwendet die kontinuierliche erste und zweite Ableitungen haben, kleinere Unstetigkeiten können vorhanden sein. Ein Unterprogramm enthält die Zielfunktion, die Werte des Vektors  $f_i(x)$  werden bestimmt. Ein weiteres Unterprogramm berechnet die Jacobi-Matrix der ersten Ableitungen  $\partial f_i / \partial x_j$  am Punkt  $x$ . Die Zielfunktion für die digitale Frequenzanalyse lautet:

$$\begin{aligned} f_{Obj} = & A_0 \\ & + A_1 \sin(2\pi f_H x / f_s + \phi_1) \\ & + A_3 \sin(2\pi 3 f_H x / f_s + \phi_3) \\ & + A_5 \sin(2\pi 5 f_H x / f_s + \phi_5) \\ & + A_{power} \sin(2\pi f_{power} x / f_s + \phi_{power}). \end{aligned} \quad (C.3)$$

Es sind somit Offset, Grundschwingung, Oberschwingungen und Einflüsse der Netzversorgung der Anlage berücksichtigt. Der Vektor mit den ersten partiellen Ableitungen von  $f(x)$  enthält die Gradienten, er wird

$g(x)$  bezeichnet:

$$g(x) = (\partial f(x)/\partial x_1, \partial f(x)/\partial x_2, \dots, \partial f(x)/\partial x_n)^T. \quad (\text{C.4})$$

Dieser Gradienten-Vektor ist wichtig bei der Optimierung, er verschwindet im Minimum der Funktion mit stetigen ersten Ableitungen. In nichtlinearen Problemen mit minimalen Fehlerquadraten wird die Matrix mit den ersten partiellen Ableitungen der Funktion  $f(x)$  als Jacobi-Matrix bezeichnet, die  $(i, j)$ -te Komponente ist  $\partial f_i/\partial x_j$ . Die Jacobi-Matrix der Zielfunktion lautet:

$$\begin{aligned} \partial g/\partial A_0 &= 1 \\ \partial g/\partial A_1 &= \sin(2\pi f_H x/f_s + \phi_1) \\ \partial g/\partial f_s &= -2A_1 \cos(2\pi f_H x/f_s + \phi_1) \pi f_H x/f_s^2 \\ &\quad -6A_3 \cos(6\pi f_H x/f_s + \phi_3) \pi f_H x/f_s^2 \\ &\quad -10A_5 \cos(10\pi f_H x/f_s + \phi_5) \pi f_H x/f_s^2 \\ &\quad -2A_{\text{power}} \cos(2\pi f_{\text{power}} x/f_s + \phi_{\text{power}}) \pi f_{\text{power}} x/f_s^2 \\ \partial g/\partial \phi_1 &= A_1 \cos(2\pi f_H x/f_s + \phi_1) \\ \partial g/\partial A_3 &= \sin(6\pi f_H x/f_s + \phi_3) \\ \partial g/\partial \phi_3 &= A_3 \cos(6\pi f_H x/f_s + \phi_3) \\ \partial g/\partial A_5 &= \sin(10\pi f_H x/f_s + \phi_5) \\ \partial g/\partial \phi_5 &= A_5 \cos(10\pi f_H x/f_s + \phi_5) \\ \partial g/\partial A_{\text{power}} &= \sin(2\pi f_{\text{power}} x/f_s + \phi_{\text{power}}) \\ \partial g/\partial f_{\text{power}} &= 2A_{\text{power}} \cos(2\pi f_{\text{power}} x/f_s + \phi_{\text{power}}) \pi x/f_s \\ \partial g/\partial \phi_{\text{power}} &= A_{\text{power}} \cos(2\pi f_{\text{power}} x/f_s + \phi_{\text{power}}) \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

Existiert mehr als nur ein lokales Minimum wird die Lösung und die Anzahl der Iterationen stark vom gewählten Startvektor abhängen. Es müssen dem Programm Optionen angegeben werden damit die Charakteristik der Optimierung verändert wird, d. h. Werte zur Routine und deren Abbruchkriterium. Die Anzahl der Funktionsaufrufe wird stark minimiert, bzw. ein Lösung überhaupt erst ermöglicht, wenn man den Parameterraum einschränkt. Es ist deshalb günstig der Routine Schranken  $x_l$  und  $x_u$  zu geben innerhalb derer die Optimierung ablaufen muß. Dabei ist schnelle Konvergenz ein weiterer Vorteil. Typischerweise wird die Optimierung eher zu einem Ziel gelangen wenn die partiellen Ableitungen analytisch berechnet werden können, was im Falle der Frequenzanalyse zutrifft.

### Analyse, Erfahrungen und praktische Anwendungen

Zusätzlich zum Fit – anzumerken gilt, daß frühe Anwendungen der Ausgleichsrechnung zurückgehen auf das umfangreiche Wirken des Ruder Josip Bošković – wird eine Fourieranalyse (FFT) vom Residuum durchgeführt und die wesentlichen Komponenten bestimmt. Vorher, in der Konstruktion eines (Fit) Modells, versucht man den besten Kompromiss zwischen zwei sich widersprechenden Erfordernissen durchzuführen, nämlich

- einfache Gleichungen zu finden, wennmöglich analytisch lösbar, ansonsten erfolgt die numerische Bestimmung der Werte und
- in diesem Prozess der Vereinfachung dürfen keine essentiellen Eigenschaften der Physik oder des technischen Systems, die man studieren möchte, verloren gehen.

Es ist immer sicherzustellen, daß bei der Approximation nichts wesentliches unberücksichtigt geblieben ist. Rechnungen während der Optimierung benötigen im Regelfall eine große Anzahl an Iterationen um zu konvergieren und sind sensitiv hinsichtlich numerischer Zahlendarstellungen, z. B. Rundungsprobleme in der Berechnung von Gradienten. Gute Startwerte sind deshalb die Grundvoraussetzung um Konvergenz zu erzielen. Die Recheneffizienz wird gesteigert und ein globales Minimum wird einfacher und schneller erreicht anstatt eines lokalen. Mit weniger strengen Abbruchkriterien erzielt man natürlich schnellere Konvergenz bei weniger genauen Lösungen. Übermäßige harte Abbruchkriterien, oder bei Problemen die sensitiv auf Änderungen der unabhängigen Variablen reagieren, könnten Sättigungen oder Rundungsfehler

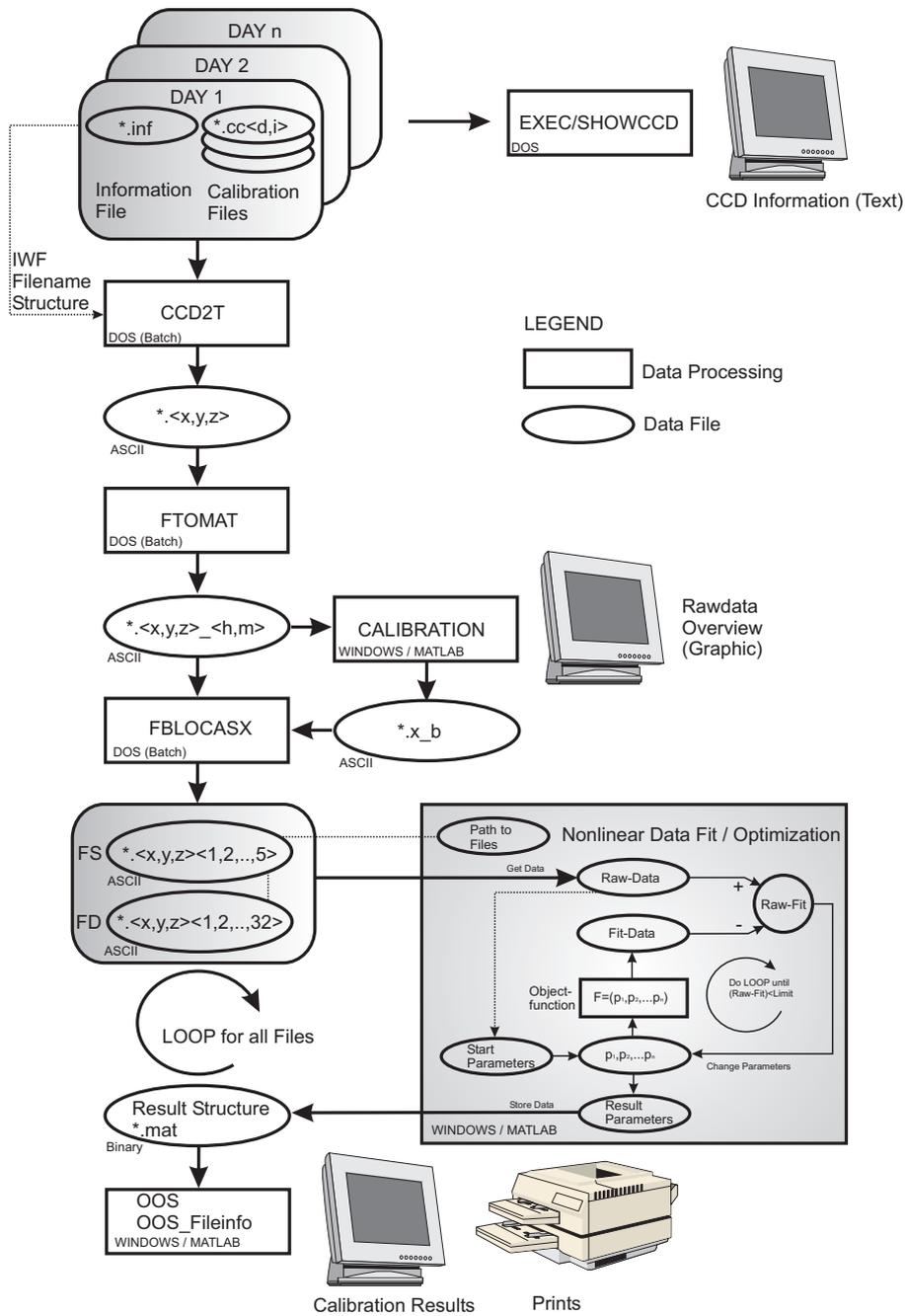
Nr.	Parameter	Einheit	Anmerkung, Beschreibung
1	$A_0$	nT	Offset
2	$A_1$	nT	AC magnetisches Feld, Amplitude Grundschiwingung
3	$f_s$	Hz	Abtaste, zeitliche Auflösung $f_{Ny} = f_s/2$
4	$\phi_1$	rad	AC magnetisches Feld, Phase
5	$A_3$	nT	3. harmonische AC magnetisches Feld, Amplitude
6	$\phi_3$	rad	3. harmonische AC magnetisches Feld, Phase
7	$A_5$	nT	5. harmonische AC magnetisches Feld, Amplitude
8	$\phi_5$	rad	5. harmonische AC magnetisches Feld, Phase
9	$A_{\text{power}}$	nT	Leistungsversorgung Amplitude MRode
10	$f_{\text{power}}$	Hz	Leistungsversorgung Frequenz MRode
11	$\phi_{\text{power}}$	rad	Leistungsversorgung Phase MRode

**Tabelle C.3:** Fitparameter für die digitale Frequenzanalyse und der Bestimmung der Abtaste des Magnetometers. Höhere Harmonische mußten nicht berücksichtigt werden, ein minimales Residuum wird mit dem gegebenen Satz von Parametern erreicht.

in der Berechnung der Gradienten oder Probleme in den polynomialen Interpolations-Routinen auslösen. Um den Preis einer Laufzeiterhöhung oder ungenaueren Lösung kann meist trotzdem Konvergenz erzielt werden. Eine Skalierung kann manchmal die Sensitivität der Optimierung erhöhen. Dimensionsbehaftete Größen sind für numerische Berechnungen nicht geeignet, es können nur dimensionslose Zahlen verarbeitet werden. Es ist somit angebracht und vorteilhaft eine geeignete Zeitskala  $t_0$  und Längenskala  $l_0$ , oder alternativ eine entsprechende Winkelskala  $\phi_0$ , einzuführen. Diese Skalen sollen dem physikalischen Problem angepaßt sein, d. h. der numerische Code muß für nicht zu große und kleine Zahlen korrekte Ergebnisse liefern, immer verglichen mit der numerischen Auflösung der Maschine. Analoge Überlegungen gelten für alle weiteren dimensionsbehafteten Parameter. Es muß somit immer ein Aussteuerbereich bzw. eine dynamische Reserve im Zahlenbereich vorhanden sein. Die nachfolgende Grafik C.1 zeigt das Datenflußdiagramm für die digitale Frequenzanalyse mit gleichzeitiger Bestimmung der Abtaste vom Magnetometer. Die Hauptaufgabe besteht in der Minimierung der Differenz zwischen den Rohdaten und den Fit-Daten. Die Bedingungen für die Minimierung geben die optimalen Kalibrierparameter für den gegebenen Strom an Eingangsdaten. Die Kalibrierung eines einzelnen dreiachsigen Sensors mit ADC-Board und Steuerelektronik erfordert die Bestimmung von mehreren Größen. Die verwendeten Kalibrier-Parameter sind in Tabelle C.3 zusammengefasst. Für jede Messung werden die Ergebnisse grafisch und tabellarisch aufbereitet und die Daten in einer Struktur, wie sie Matlab zur Verfügung stellt, gespeichert. In der Dokumentation zu jeder Einheit findet man die detaillierten Resultate zu den individuellen Meßläufen.

### Fehleranalyse

Es zeigt sich, daß die Resultate der Optimierung aus verschiedensten Gründen nicht immer optimal sind. Das Residuum enthält noch große Werte in der Differenz "Raw-Fit". Solche Ergebnisse – und auch um Ambiguitäten zu vermeiden – werden mit verbesserten Startparametern wiederholt, was meist zum erwünschten Erfolg führt, der Bestimmung der Startwerte kommt somit einige Bedeutung zu. Eine Grafik des Residuums zeigt unmittelbar diese Schwachstelle in den Parametern, eine (wiederholte) Rekalibration mit veränderten Werten löst das Problem. Die optimalen Kalibrierparameter minimieren somit die Differenz zwischen den gemessenen Rohdaten und den analytischen Fitdaten, die Resultate werden im ASCII-Format gespeichert. Ergebnisse einer erfolgreichen früheren Kalibration können in einem weiteren Lauf der Software als Eingangswerte verwendet werden. Ohne einer Verbesserung des Modells, d. h. Berücksichtigung von weiteren Störgrößen, ist nur mit einer – wenn überhaupt – marginalen Verbesserung in den Werten zu rechnen.



**Abbildung C.1:** Cluster FGM ADC Datenflußdiagramm für die digitale Frequenzanalyse. Die Daten der Meßanlage liegen im sogenannten Complete Calibration Data (CCD) Format vor und daraus können bereits erste Informationen zur Messung gewonnen werden, z. B. über den Status der Anlage. Verschiedene Module in einer SW Pipelinestruktur ermöglichen die Extraktion der Magnetfeldwerte ins ASCII-Format, sie bilden die Rohdaten für die Optimierung. Aus den Magnetfeldvektoren werden die Startparameter, z. B. die Offsets sind die Mittelwerte, für die Optimierung entnommen. Mittels der Zielfunktion kommt man zu den Fit-Daten, die Differenz zu den Rohdaten verändert die Parameter was wiederum zu einem Update führt. Diese Schleife wird solange durchlaufen bis das Residuum minimal wird und keine schmalbandigen Frequenzanteile enthält. Eine äußere Schleife versorgt die Optimierungsstufe mit allen Frequenzblöcken der CCD Dateien.

### Analysetechniken

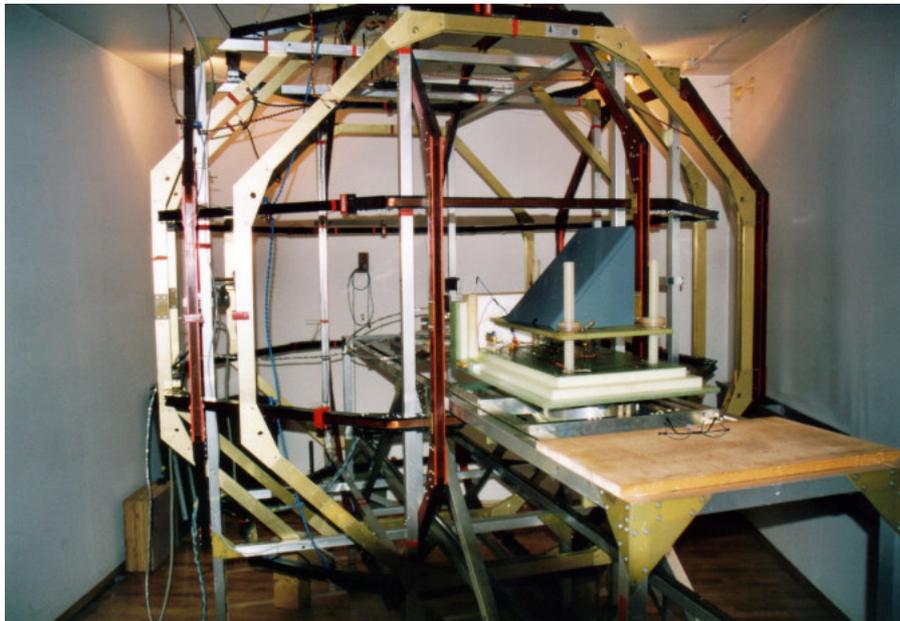
Ein wichtiger Aspekt, der unbedingt betrachtet werden muß, ist die Genauigkeit der erhaltenen Parameter abhängig von potentiellen Fehlerquellen, z. B. (i) systematische Fehler vom Instrument, (ii) Abweichungen von der nominellen Ausrichtungen der Sensoren während der Messung und (iii) die Möglichkeit von fehlerhaften Konfigurationen. Die einzelnen Kriterien sind unterschiedlich für die Datensätze und Analysen, die Kenntnis der Abhängigkeit der Datenwerte von den wichtigsten Fehlerquellen ist eine Voraussetzung um sinnvolle Resultate zu erhalten. Im technischen Sinne sind die abgeleiteten Parameter aus den Magnetfeldmessungen nicht nur von Instrument selbst, sondern auch von externen Faktoren bestimmt, d. h. sie werden durch die Systemgrenzen wie sie im SE vorliegen, siehe Kapitel C.1, mitbestimmt. Dazu zählen ebenfalls die magnetische Reinheit, der zeitlicher Jitter in der Meßkette und die Bedingungen am Ort der Messung (magnetischer Hintergrund).

### Zentraler Grenzwertsatz der Statistik

Um die Fehlerbalken abzuschätzen wird der zentrale Grenzwertsatz verwendet; seine Aussage: *Wenn man eine große Anzahl an unabhängigen Messungen durchführt liefert das Resultat eine Gauß'sche Verteilung, zentriert um den (unbekannten) exakten Wert.* Die Standardabweichung dieser Verteilung wird bei der Hälfte der Fehlerbalken abgelesen. Der erhaltene Wert wird mit  $\pm$  der Standardabweichung der Verteilung angegeben. Die Messungen müssen statistisch unabhängig sein, d. h. die Relaxationszeit der Messung muß ausreichend sein (statistischer Effekt := Stütze auf dem Gesetz der großen Zahlen, siehe ebenfalls Seite 188  $\rightarrow 1/\sqrt{n}$ ). Nach der Meßsequenz werden die erhaltenen Werte in Bins gruppiert, mit einer Breite von zumindest  $\tau$ , vorzugsweise sogar mehrere  $\tau_s$ . Von jedem Bin wird damit der Mittelwert genommen und es sind diese Meßpunkte welche für die Abschätzung des Fehlers  $\sigma$ ,

$$\sigma = ((\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2)/(n - 1))^{1/2} \quad , \quad (\text{C.6})$$

verwendet werden. Die Mittelwerte von  $A$  werden ausgewertet über die  $n$  unabhängigen Datenbins. Wenn die Gleichung C.6 auf korrelierte Daten angewandt wird sind die Fehlerbalken gröblich unterschätzt. Als Resultat der Optimierung mit der verwendeten Zielfunktion, zusammen mit der analytischen Berechnung

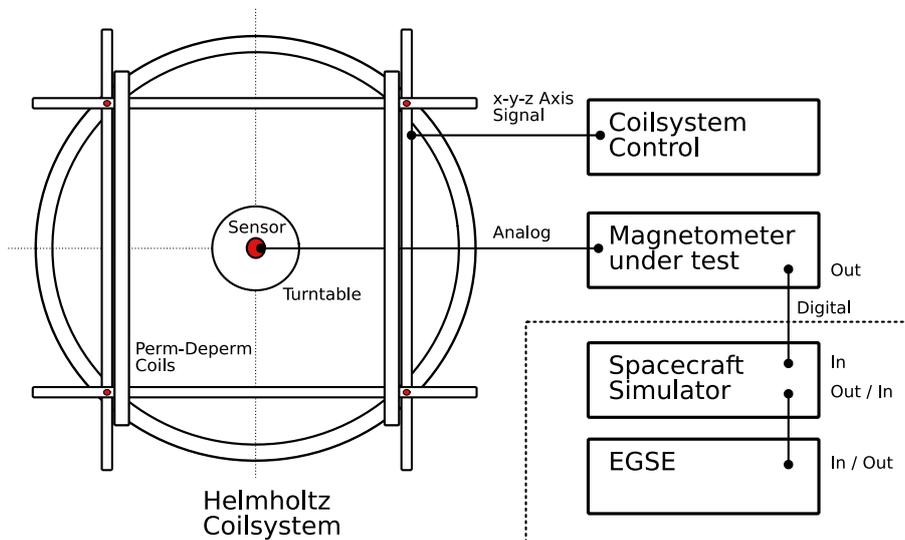


**Abbildung C.2:** Spulensystem für die Bodenkalibration (ground, pre-flight) der Cluster, Rosetta und DoubleStar Fluxgate Magnetometer in Magnetsrode (TU-Braunschweig, Deutschland).

der Gradienten in jedem Iterationsschritt, ergibt sich ein Residuum dessen Spektrum keine schmalbandigen Komponenten enthält, d. h. die Fitparameter approximieren hervorragend die Meßwerte.

### Kalibrationsaufbau

Der Meßaufbau für die digitale Frequenzanalyse im Zuge von Cluster FGM ist in Abbildung C.3 dargestellt. Das Helmholtz Spulensystem, siehe Abb. C.2, befindet sich in Magnetsrode, IGEP, TU-Braunschweig. Die Spulen werden über einen Frequenzgenerator und Verstärker angesteuert, in Amplitude und Frequenz, die Phase ist nicht wählbar. Für die digitale Frequenzanalyse befindet sich der Sensor in diagonaler Position im Zentrum der Spule (center of coil, CoC), nur eine Spule wird mit dem AC-Signal beaufschlagt. Die Bilder aus Abb. C.4 zeigen Aufnahmen vom Spulenhause und der Umgebung der Anlage, dem S/C Simulator im Nebeneraum des Helmholtz-Systems und der Cluster FGM Elektronikbox im Spulenraum.



**Abbildung C.3:** Kalibrations-Setup: Eine Spule des Helmholtz Systems wird mit einem sinusförmigen Signal bekannter Frequenz und Amplitude beaufschlagt. Der 3-achsige Fluxgate Sensor – keine Achse darf in Sättigung sein – befindet sich in der Mitte des Spulensystems (center of coil, CoC) in geneigter, diagonaler Position. Das hat zur Folge, daß jede Achse des Sensors eine annähernd gleiche magnetische AC-Aussteuerung erfährt.



**Abbildung C.4:** Komponenten der Meßanlage in Magnetsrode während der Bodenkalibration für die Magnetometer der Cluster Mission. Im Spulenhause (Bildmitte) befindet sich das Instrument (rechtes Bild) und der Spacecraft Interface Simulator (linkes Bild), die Steuerung erfolgt aus dem Nebengebäude.

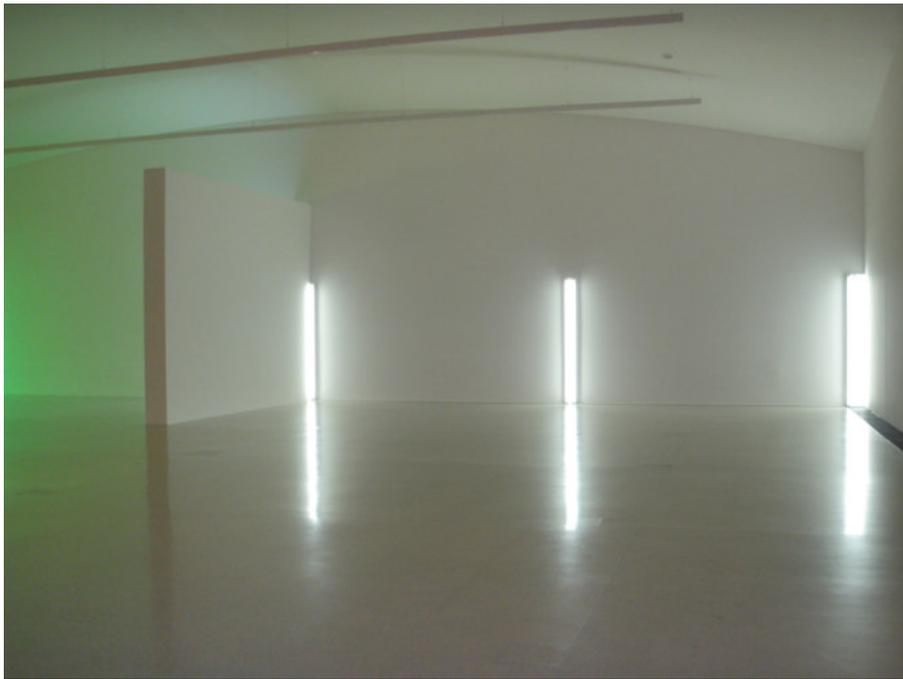
### Zusammenfassende Bemerkungen zur digitalen Daten-Rekonstruktion

Das Ziel der Optimierung ist so nahe als möglich zum ursprünglichen unverfälschten Datensatz zu gelangen, auf einfache Art und Weise. Ein weiterer Bereich ist die notwendige initiale Datenreduktion vor der Anwendung von Rekonstruktions-Algorithmen. Das inkludiert (i) die Korrektur von ungleichförmigen Objektdaten, (ii) Elimination von schlechten Vektoren, (iii) Subtraktion des entsprechenden Hintergrundes und (iv) die Bestimmung des Typs und Levels des statistischen Rauschens in den Daten. Die Meßfehler fallen in zwei Kategorien: (i) Systematische Fehler (eigentlich Unsicherheiten) sind wiederkehrende Fehler verursacht durch fehlerhafte Meßprozesse oder Fehler durch physikalische Effekte welche die Messung modifizieren. Zusätzlich sind (ii) stochastische, nicht reproduzierbare Fehler, welche von Messung zu Messung variieren, vorhanden. Mit dem Datenmodell ist etwas falsch wenn die Residuen systematische Strukturen zeigen oder wenn die statistische Verteilung von der ursprünglichen zugrundeliegenden stark abweicht. Beispiele sind wenn der Mittelwert nicht null ergibt, wenn die Verteilungsfunktion verzerrt ist, oder zu breit oder schmal wird. Nach dem Fit ist es daher zwingend notwendig diagnostische Tests durchzuführen um Probleme, verursacht durch den Fit, auszusortieren. Die entsprechenden mächtigen Werkzeuge dazu sind (i) ein "goodness of fit" Kriterium, (ii) Analyse der statistischen Verteilungen der Residuen und deren Korrelationen, sowie (iii) Abschätzung der Fehler in den Parametern. Datenrekonstruktion ist oftmals ein unterbestimmtes ("ill-posed") Problem. Mathematiker betrachten eine Aufgabe als "well posed" wenn eine Lösung (i) existiert, (ii) einzigartig und (iii) kontinuierlich unter infinitesimalen Änderungen im Ansatz ist. Das Problem ist "ill-posed" wenn es auch nur eine der drei Bedingungen nicht erfüllt, dieses Konzept geht zurück auf den französischen Mathematiker Jacques S. Hadamard (1865 – 1963). Allerdings ist man bei Anwendungen für gewöhnlich weniger befasst mit Fragen der Existenz oder Eindeutigkeit, vielmehr geht es um die Stabilität der Lösung. Der Vorteil von nichtiterativen Methoden liegt primär in der Einfachheit der Implementierung und in kürzeren Rechenzeiten, leider ist eine Verstärkung des Rauschens schwer zu kontrollieren. Die Notwendigkeit einen guten Kompromiss zwischen Auflösung und Artefakten zu finden ist universell für nichtiterative Methoden der Datenrekonstruktion. Es stellt sich die Frage ob bessere Techniken verfügbar sind, d. h. (i) gleichzeitig hohe Auflösung, (ii) minimale Artefakte und (iii) Residuen konsistent mit stochastischem Rauschen liefern. Bei der iterativen Datenrekonstruktion ist Übereinstimmung gegeben durch ein Datenmodell bei dem die Residuen eine statistisch akzeptable Verteilung verglichen mit der zugrundeliegenden Verteilung des Rauschens haben. Drei wesentliche Komponenten sind beim Anpassen der Daten zu beachten: (i) Als erstes benötigt man eine Prozedur um das Modell der Daten zu finden. Das wird erreicht durch Minimierung einer entsprechenden Funktion, oftmals unter Berücksichtigung zusätzlicher Einschränkungen. (ii) Zweitens, es muß die Qualität des Fits bestimmt werden, vorzugsweise durch mehrere unabhängige Tests. Sie legen fest ob die erhaltenen Residuen in Übereinstimmung mit der zugrundeliegenden statistischen Verteilung sind. (iii) Drittens, man möchte die verbleibenden Fehler abschätzen können. Es ist notwendig die Verteilung (Histogramm) der Werte im Residuum mit der zugrundeliegenden Statistik der Daten zu vergleichen ob alles innerhalb der erwarteten statistischen Fluktuationen liegt. Fehlerverdächtig ist mit Sicherheit wenn der Mittelwert des Residuums signifikant von null abweicht, die Verteilung verzerrt ist oder unerwartet starke oder schwache Seitenbänder zeigt. Findet man einen zufriedenstellenden Fit sind die Unsicherheiten in den erhaltenen Parametern abzuschätzen, z. B. die Streuung der Werte die man bei linearer Regression von mehreren unabhängigen Datensätzen finden würde. Die Methode der größten Wahrscheinlichkeit ("Maximum Likelihood") ist in der Statistik dafür bekannt, daß sie die beste Abschätzung für einen breiten Anwendungsbereich bei parametrischen Fits liefert wenn die Anzahl der Parameter wesentlich kleiner als die der Datenpunkte ist. Abgesehen von der hohen Leistungsfähigkeit, d. h. einer hochqualitativen und stabilen Rekonstruktion, sind parametrische Methoden empfindlich eingeschränkt durch die Notwendigkeit von expliziten Funktionen zur Modellierung des Datensatzes. Damit ist aussagekräftiges Vorabwissen von den Meßwerten notwendig. Moderne Minimierungstechniken konvergieren wesentlich rascher wenn die partiellen Ableitungen der Zielfunktion in Bezug auf die Variablen verwendet werden.

### Grundidee und Basis der Optimierung

Die Idee der Suche nach minimaler/optimaler Erklärung von Beobachtungen, Resultaten und Daten geht zurück auf William von Ockham (siehe historische Notizen ab Seite 64), er forderte eine Art Sparsamkeit

von Postulaten, nämlich, *Pluralitas non est ponenda sine necessitate*, übersetzt als *Pluralität sollte nicht ohne Notwendigkeit postuliert werden*. Dieses Ökonomieprinzip (Ockham's razor) wurde zum Eckstein des wissenschaftlichen Ansatzes und kann unmittelbar auf die Methode des parametrischen Ausgleichs angewandt werden: Es werden (i) nur statistisch signifikante Parameter akzeptiert, (ii) deren Anzahl wird auf das notwendige Minimum beschränkt. Für den Fall der digitalen Frequenzanalyse ist der Ansatz in Tab. C.3 gegeben. Abbildung C.5 zeigt eine Arbeit des Künstlers Dan Flavin (1933 – 1996), einem Vertreter des Minimalismus, mit kaltweißen Leuchtstoffröhren aus 1963 (Museum Moderner Kunst Stiftung Ludwig Wien, mumok, 2012) die dem Kleriker aus dem Franziskanerorden William von Ockham gewidmet ist.



**Abbildung C.5:** Arbeit mit 6 kaltweißen Leuchtstoffröhren {links, mitte, rechts}: {1, 2, 3} – "the nominal three (to William of Ockham)" – von Dan Flavin aus 1963; Ausstellung "Dan Flavin Lights", mumok, Wien, 2012.

### C.2.2 Dual Magnetometer Technik – Gradiometermethode

Die genaue in situ Messung von schwachen magnetischen Feldern im interplanetaren Raum, in der Nähe von Planeten, Monden und anderen Objekten des Sonnensystems durch Satelliten wird oftmals bestimmt durch das Streufeld (Störfeld) des Satelliten selbst als durch die Nullpunktstabilität des Instruments oder das Quantisierungsrauschen der A/D Umsetzer (ADC) und limitierten Zahlendarstellungen in der DPU.

Durch die Gradiometermethode erhält man gleichzeitige, simultane Daten von zwei Magnetometern mit Sensoren auf unterschiedlichen Positionen entlang des Booms. Das extern zu messende Feld ist räumlich konstant über die Distanz der Sensorseparation, dies gilt als Voraussetzung. Die Vorteile einer Dual Magnetometer Methode sind vielfältig, darunter verbesserte Resultate sogar bei Vorhandensein von (i) großen und (ii) variablen S/C Feldern, (iii) einsetzbar sowohl bei spin- und RW-stabilisierten Satelliten, d. h. kontinuierliche Abschätzung des S/C Feldes und des unbekanntes zu messenden Feldes. Die Nachteile sind die Limitierung in der (i<sub>1</sub>) Genauigkeit der Annahme über das S/C Feld mit dem (i<sub>2</sub>) Quantisierungsfehler der A/D Umsetzung und (ii) durch die Nullpunktdrift der Sensoren.

Die Entwicklung von magnetisch reinen Satelliten (i) treibt die Kosten in die Höhe und (ii) limitiert die Verwendung von magnetischen oder magnetisierbaren Materialien zusätzlich zu den (iii) Maßnahmen zur Selbstkompensation der Ströme in der Versorgung des Satelliten durch spezielle Verkabelung beginnend

bei den Solarzellen, siehe dazu Kap. 2.4.

Die Größe des Störfeldes des Satelliten wird bestimmt durch (i) Tests während der Entwicklung (pre-flight), (ii) Rollmanöver im Flug, (iii) die Annahme von Symmetrien von IMF Daten gemittelt über eine Rotationsperiode der Sonne von 27 Tagen zur Korrektur des effektiven Nullpunktes der Sensoren. Der effektive Nullpunkt des Magnetometers bezieht sich auf die Kombination von (i) variablem Satellitenstörfeld und (ii) variablem Nullpunkt.

Für Offsetuntersuchungen variiert des magnetische Feld des Satelliten langsam genug um Effekte durch elektromagnetische Induktion vernachlässigen zu können. Das magnetische Feld der S/C kann von einem Skalarpotential  $\psi$ , das die Laplacegleichung erfüllt, abgeleitet werden (siehe ebenfalls Kap. A.1.4). In sphärischen Koordinaten  $r$ ,  $\theta$  und  $\phi$  ergibt sich

$$\psi(r, \theta, \phi; t) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (A_{nm}(t) \sin(m\phi) + B_{nm}(t) \cos(m\phi)) P_n^m(\cos(\theta)) (a/r)^{n+1} \quad (\text{C.7})$$

für  $r \geq a$  mit  $a$  als der Distanz der entferntesten Quelle vom Zentrum der S/C und somit eine Länge charakteristisch zur S/C Größe. Der genaue Ursprung des Koordinatensystems ist unwesentlich, die Übereinstimmung mit dem "magnetischen Zentrum" des Satelliten ist wünschenswert mit dem Gesichtspunkt minimaler Fehler. Das "magnetische Zentrum" des Satelliten kann definiert werden als der Punkt entlang der Boomachse an dem der Nichtdipol-Term in Gleichung C.7 minimal ist. Die zeitlichen Variationen des S/C Feldes sind durch die Koeffizienten  $A_{nm}(t)$  und  $B_{nm}(t)$  gegeben, Effekte von elektromagnetischer Strahlung sind vernachlässigt. Das magnetische Feld der S/C ist dann ableitbar aus dem Gradienten des Potentials  $\vec{B}_{s/c} = -\nabla\psi$ . Angenommen zu jedem Zeitpunkt ist das gemessene Feld eines jeden Magnetometers  $B_i$  dargestellt durch

$$\vec{B}_i = \vec{B}_{amb} + \vec{B}_{s/ci} \quad (\text{C.8})$$

mit  $\vec{B}_{amb}$  als gemessenes Umgebungsfeld,  $\vec{B}_{s/ci}$  das S/C Feld an der Position  $r_i$  und  $r_1, r_2$  sind die innere und äußere Position der Magnetometersensoren. Unter diesen Umständen kann des magnetische Feld des Satelliten an den beiden Positionen  $r_1$  und  $r_2$  mittels einer Kopplungsmatrix  $\alpha_{kl}$

$$\vec{B}_{s/c2k} = \sum_{l=1}^3 \alpha_{kl} (\vec{B}_{s/c1})_l. \quad (\text{C.9})$$

bestimmt werden. Für einen reinen Multipolterm sind die drei Komponenten von  $\alpha_{kk}$  identisch und in Relation mit  $(r_1/r_2)^{n+2}$ , i. A. sind die drei Diagonalelemente nicht ident, der Term  $(r_1/r_2)^{n+2}$  ist gewichtet durch unterschiedliche Funktionen. In der Praxis, ab einer bestimmten Entfernung von der S/C, entspricht das generierte Feld des Satelliten in etwa einem Dipol mit der Lage im Zentrum, es besteht somit ein  $\sim 1/r^3$  Abfall. Zur Bestimmung des Umgebungsfeldes ist es notwendig  $\vec{B}_{s/ci}$  zu bestimmen, basierend auf der Annahme, daß identes  $\vec{B}_{amb}$  (die Quellen dieses Feldes sind weit entfernt) an den Sensoren auftritt:

$$\vec{B}_{s/c2} - \vec{B}_{s/c1} = \vec{B}_2 - \vec{B}_1. \quad (\text{C.10})$$

Durch Verwendung der Gln. C.10 und C.9 erhält man die S/C generierten Felder an den Sensorpositionen

$$\vec{B}_{s/c1} = (1 - \alpha)^{-1} (\vec{B}_1 - \vec{B}_2), \quad (\text{C.11})$$

$$\vec{B}_{s/c2} = \alpha(1 - \alpha)^{-1} (\vec{B}_1 - \vec{B}_2). \quad (\text{C.12})$$

Das Umgebungsfeld wird abgeschätzt von einem der beiden Magnetometer (Gl. C.8) mit

$$\vec{B}_{amb} = \vec{B}_i - \vec{B}_{s/ci}. \quad (\text{C.13})$$

Setzt man Gln. C.11, C.12 in Gleichung C.13 erhält man für die jedes Magnetometer die selben Resultate,

$$\vec{B}_{amb} = (1 - \alpha)^{-1} (\vec{B}_2 - \alpha \vec{B}_1). \quad (\text{C.14})$$

Von den Gln. C.11, C.12 erkennt man, daß keine Variation des S/C Feldes auftritt wenn die Differenz zwischen  $\vec{B}_1$  und  $\vec{B}_2$  konstant bleibt. Es ist weder zielführend noch exakt möglich alle magnetischen Momente

des Satelliten vor dem Start in jedem nur erdenklichen Mode zu erhalten, theoretisch eine Notwendigkeit bei Einzelsensor-Experimenten. Eine umfangreiche Vermessung der einzelnen Instrumente (Boxen) gab es allerdings bei der ursprünglichen Cluster Mission (Kap. A.4). Das Dualsystem erlaubt Abschätzungen mit hoher Zuverlässigkeit ob es sich bei einem magnetischen Event um ein vom Satelliten (oder Instrument) erzeugtes Ereignis oder um eine Variation des Umgebungsfeldes handelt. Während Roll- oder Spinmanöver ist eine exakte Bestimmung der Komponenten des Umgebungsfeldes möglich, unabhängig vom Streufeld des Satelliten und Nullpunktdriften. Sollte ein Flip-Mechanismus an den Sensoren inkludiert sein, d. h. die Möglichkeit der Umkehr der Sensorachse während des Fluges bestehen, läßt sich der Nullpunkt mit hoher Genauigkeit bestimmen. Das eliminiert alle Fehler im Zusammenhang mit Nullpunktdriften.

Im Endergebnis erzielt man bei einem System mit zwei Magnetometern die Separation vom beobachteten magnetischen Feld an den Sensoren in ein abgeschätztes Streufeld des Satelliten und in des gewünschte Umgebungsfeld. Die Multimagnetometer-Methode ist somit eine äußerst effektive Methode zur Trennung zwischen Stör- und Umgebungs-Feldern, speziell bei magnetisch unreinen Satelliten. Ein besonderer Vorteil der dualen Magnetometer Methode liegt (i) in der Möglichkeit einer Echtzeit-Identifikation und Überwachung von zeitlichen Variationen des Störfeldes vom Satelliten und (ii) die beiden Sensoren liefern vollständige Redundanz (siehe speziell Kap. 2.4). Fluxgate Sensoren überstehen hohe Strahlungsdosen im Bereich von einigen Mrad und Temperaturextreme, z. B. bei Rosetta RPC-Mag spezifizierte  $-160(-180) \dots + 120(+150) ^\circ\text{C}$  im operativen(nichtoperativen) Bereich, für die Elektronikeinheit sind die Grenzen gemäß den Bauteilen. Die Entwicklungen konzentrieren sich auf die Minimierung der zeitvariablen Satelliten Störfelder – hervorgerufen durch weichmagnetisches Material – und unkompenzierten Strömen im elektrischen System und bei Solarzellen. Wirkliche statische Felder – sie stehen im Zusammenhang mit hartmagnetischem Material – werden vor dem Start ermittelt (magnetisches Moment) und dementsprechend korrigiert/kompensiert. Magnetische Störungen bei Rosetta RPC-Mag kamen von den Reaction-Wheels, Solar-Arrays ( $< 0.5 \text{ nT}$ ), Solar Array Drive Mechanism (SADM;  $23 \text{ nT}$ ), dem Lander und von den Schubdüsen (sind kompensiert). Experimenteller Erfolg (er ist umfangreicher definiert als nur rein instrumentelle Belange) hängt somit wesentlich vom Systems Engineering ab, siehe Kap. C.1, enge Zusammenarbeit und adäquater Führungsstil zwischen S/C Designern, Technikern und Experimentatoren sind wesentliche Faktoren über Grenzen unterschiedlicher Kulturen hinweg [Schein, 1985].

Die meisten Anwendungen und Forschungsaktivitäten sind nach wie vor im niederen Frequenzbereich  $f \lesssim 128 \text{ Hz}$ , höhere zeitliche Auflösungen sind allerdings wesentlich zur Identifikation von Grenzbereichen zwischen Plasmen, bei Plasmawellen, Turbulenzen, zur Untersuchung von MHD Schocks, Rekonnections-Signaturen (siehe MMS Seite 191) und weiteren kurzzeitigen Phänomenen in planetaren Magnetosphären und im Sonnenwind, für Zielsetzungen bei Cluster siehe Kap. A.4.2. Weiters sind die Methoden von [Belcher, 1973] und [Davis Jr. and Smith, 1968] zur in-flight Bestimmung des S/C Feldes zu erwähnen, speziell aber [Leinweber, 2011] mit neuen Lösungen, umfangreichen Vergleichen und Anwendungen bei mehreren Missionen. Messungen von Fluktuationen im IMF über kurze Zeitspannen zeigen, daß Änderungen primär in der Richtung und nicht in der Amplitude vorhanden sind, d. h. diese mikro-physikalischen Feldvariationen sind nichtkompressibel (inkompressibel  $\equiv$  unendliche Schallgeschwindigkeit) und transversal. Diese quantitativen, statistischen Techniken verwenden die Eigenschaften von mikro-physikalischen Fluktuationen um das effektive (Beiträge von Nullpunkt-Offsets inkludiert) S/C Feld zu bestimmen. Eine wichtige unabhängige Verifikation der Richtigkeit der Abschätzung ist die Bestätigung durch die Spiralkonfiguration des IMF wenn Messungen über längere Zeiträume erfolgen können.

### C.2.3 FGM Kompensationsfilter, Transferfunktion

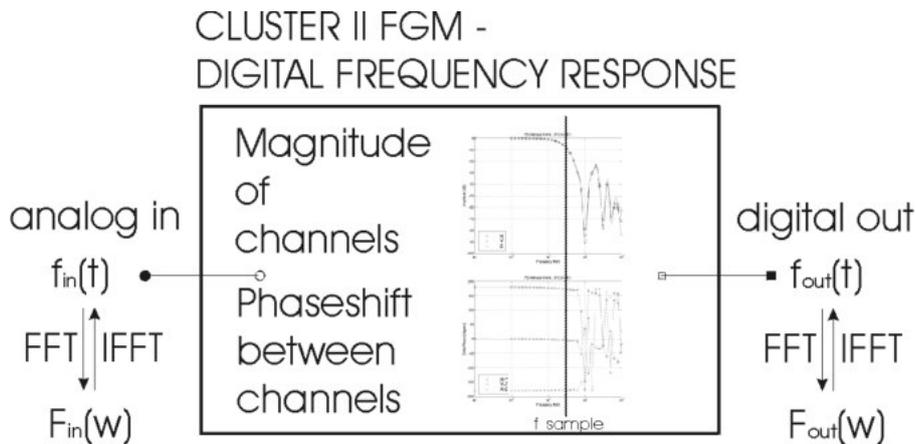
#### Übersicht

Das triaxiale Induktions-Magnetometer STAFF verliert bei tiefen Frequenzen an Sensitivität, siehe den Artikel [Schmidt, 1993] (Seite 41, Abb. 5). Die Kompensation des Frequenzganges von Cluster-FGM ermöglicht eine Erweiterung des Spektrums von DC bis zur Nyquist-Frequenz, d. h. damit wird der obere Frequenzbereich von FGM nutzbar. Das Ziel ist die Kompensation des Amplitudenganges mit einem Softwaremodul wie er für Cluster FGM mit der digitalen Frequenzanalyse aufgenommen wurde. Idealerweise kann man die Software als zusätzliche Stufe in der Verarbeitungspipeline einsetzen. Die Messungen zeigen, daß beide Sensoren des Magnetometers, d. h. sowohl Outboard als auch Inboard, wie zu erwarten, die

gleiche Charakteristik haben. Im 22 Hz Normal Mode ist der  $-3$  dB Punkt bei  $7.6 \pm 0.2$  Hz und die Phasendifferenz zwischen den Achsen muß bis zu einer Frequenz von 5 Hz nicht in Betracht gezogen werden. Im 67 Hz Burst Mode liegt der  $-3$  dB Punkt bei  $18 \pm 0.5$  Hz, die Phasendifferenz zwischen den Kanälen ist wiederum vernachlässigbar, diesmal bei Frequenzen unter 10 Hz. Bei höheren Frequenzen, d. h. je nach Mode bei über 5 Hz bzw. 10 Hz, muß die Transferfunktion von FGM für die Datenauswertung berücksichtigt werden.

### Filterdesign aus den Daten der Frequenzanalyse

Die Grafik in Abbildung C.6 zeigt das typische Frequenzverhalten des Magnetometers. Das Ziel ist die Beschreibung des Verhaltens von der Eingangsstufe, dem Analogteil, bis zum Digitalausgang.



**Abbildung C.6:** Cluster FGM digitale Frequenzanalyse. Beschreibung des analogen Eingangssignals – das gemessene magnetische Feld an den Sensoren – bis zum digitalen Ausgangswert, den Magnetfeldvektoren im Binärformat.

### Z-Transformation

Neben der Fouriertransformation spielt deren Verallgemeinerung, die z-Transformation, eine wichtige Rolle bei der Darstellung und Analyse von zeitdiskreten Signalen. Die z-Transformation von zeitdiskreten Signalen ist das Gegenstück zur Laplace-Transformation bei zeitkontinuierlichen Signalen. Die wichtigste Begründung für die Einführung dieser Verallgemeinerung besteht darin, daß die Fourier Transformierte nicht für alle Folgen konvergiert, die z-Transformation konvergiert für eine größere Klasse von Signalen. Außerdem kann damit die leistungsfähige Funktionentheorie auf Aufgabenstellungen der zeitdiskreten Signale und Systeme angewendet werden. Die Fourier Transformierte  $X(e^{i\omega})$  einer Folge ist definiert als

$$X(e^{i\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-i\omega n}, \quad (\text{C.15})$$

die zweiseitige oder bilaterale z-Transformierte ist

$$X(Z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]z^{-n}, \quad (\text{C.16})$$

wobei  $z$  eine kontinuierliche komplexe Variable ist. Die einseitige oder unilaterale z-Transformation ist definiert durch

$$X(Z) = \sum_{n=0}^{+\infty} x[n]z^{-n}. \quad (\text{C.17})$$

Sie ist besonders geeignet um lineare Differenzgleichungen mit konstanten Koeffizienten bei nicht verschwindenden Randbedingungen zu lösen. Wenn die Fourier Transformierte überhaupt existiert, dann folgt sie direkt aus  $X(z)$  mit  $z = e^{i\omega}$ , d. h.  $|z| = 1$  und die auf dem Einheitskreis berechnete  $z$ -Transformierte stimmt mit der Fourier Transformierten überein. Für die absolute Konvergenz der  $z$ -Transformierten muß gelten  $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|r^{-n} < \infty$ . Die Potenzreihe der  $z$ -Transformierten ist eine Laurent-Reihe. Deshalb kann man mehrere elegante und leistungsfähige Theoreme aus der Funktionentheorie auf die  $z$ -Transformation anwenden. Die  $z$ -Transformation ist besonders gut geeignet, wenn die unendliche Summe in einer geschlossenen Form ausgedrückt werden kann, d. h. wenn sie "aufsummiert" und durch eine einfache mathematische Formel beschrieben werden kann.

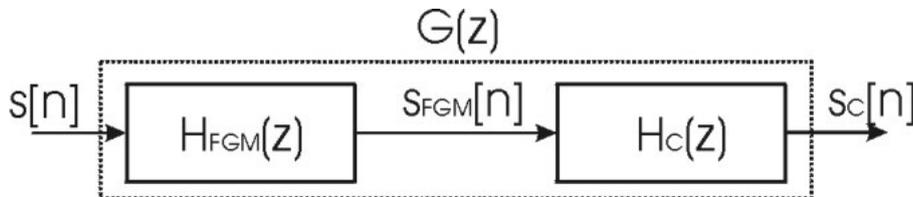
Anzumerken gilt, daß in der Seismik (siehe Ausführungen in Kap. 4.1.4) und bei tomographischen Anwendungen der Radon-Transformation (Johann K. A. Radon, 1887 – 1956) ebenfalls eine bedeutende Rolle zukommt.

### Minimalphasige Systeme

Bei diesen Anordnungen sind die Amplitude und die Phase der Fourier Transformierten nicht unabhängig voneinander, d. h. die Spezifikationen der Amplitude bestimmen ebenso den Phasenverlauf und die Spezifikation der Phase bestimmt, abgesehen von einem Skalierungsfaktor, die Amplitude. Somit besitzt ein lineares zeitinvariantes System, das stabil und kausal ist, genau dann ein stabiles und inverses System, wenn alle Pole und Nullstellen von  $H(z)$  innerhalb des Einheitskreises liegen. Solche Systeme bezeichnet man als minimalphasige Systeme.

### Algorithmus

Ein lineares, zeitinvariantes System (LTI-System) ist stabil und kausal wenn die Pole innerhalb des Einheitskreises liegen. Jede rationale Funktion kann ausgedrückt werden als  $H(z) = H_{\min}(z)H_{\text{ap}}(z)$ , dabei ist  $H_{\min}(z)$  ein System mit minimaler Phase und  $H_{\text{ap}}(z)$  ein Allpass-System [Oppenheim and Schaffer, 1989]. Das Ausgangssignal des Magnetometers soll kompensiert werden, siehe Darstellung in Abb. C.7. Wenn perfekte Kompensation erreicht werden soll dann ist  $s_c[n] = s[n]$ , d. h.  $H_c(z)$  ist die Inverse von  $H_{\text{FGM}}(z)$ . Das FGM System ist stabil und kausal, ebenso die Software zur Kompensation der Übertragungsfunktion. Exakte Kompensation ist nur möglich wenn  $H_{\text{FGM}}(z)$  ein minimalphasiges System ist, d. h. es existiert eine kausale, stabile Inverse. Basierend auf der Annahme, daß  $H_{\text{FGM}}(z)$  von der Cluster Kalibration bekannt ist und als rationale Systemfunktion approximiert werden kann, ist es möglich, ein minimalphasiges System  $H_{\text{FGMmin}}(z)$  durch Spiegelung aller Nullstellen von  $H_{\text{FGM}}(z)$  außerhalb des Einheitskreises der komplexen Ebene zu den konjugiert reziproken Positionen innerhalb des Einheitskreises zu gelangen.  $H_{\text{FGM}}(z)$  und  $H_{\text{FGMmin}}(z)$  haben die gleiche Amplitudenantwort und stehen über ein Allpass System  $H_{\text{ap}}(z)$  in Beziehung, d. h.  $H_{\text{FGM}} = H_{\text{FGMmin}}(z)H_{\text{ap}}(z)$ . Wählt man den Kompensationsfilter mit  $H_c(z) = H_{\text{FGMmin}}(z)^{-1}$  ist die gesamte Übertragungsfunktion  $G(z)$ , die Beziehung zwischen  $s[n]$  und  $s_c[n]$ , gleich  $G(z) = H_{\text{FGM}}(z)H_c(z) = H_{\text{ap}}(z)$ , d. h. sie entspricht einem Allpass-System. Folglich ist die Amplitudenantwort exakt kompensiert, während die Phase mit  $\angle H_{\text{ap}}(e^{i\omega})$  modifiziert wurde.



**Abbildung C.7:** Cluster FGM digitale Frequenzantwort und Blockdiagramm für die Kompensation. Im Idealfall ist das perfekt abgetastete analoge Eingangssignal  $s[n]$  ident mit  $s_c[n]$ , den Magnetfeldwerten in den Files der Datenauswertung.

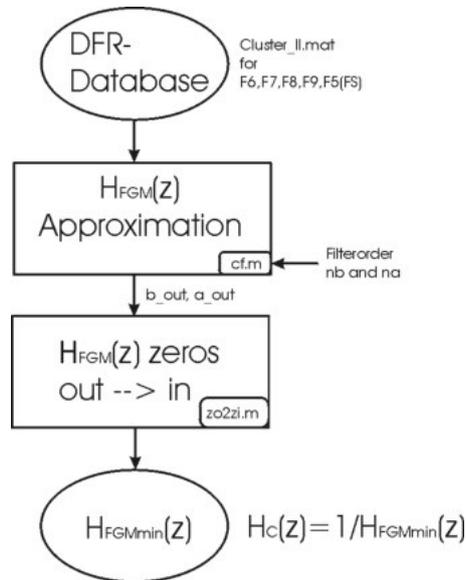
Dateiname - Modell	Größe (MByte)	Datensatz
Cluster_II.mat - FM6	4.409.088	22.02.1999
Cluster_II.mat - FM7	4.174.616	12.03.1999
Cluster_II.mat - FM8	2.840.520	04.08.1999
Cluster_II.mat - FM9	7.468.856	07.10.1999
Cluster_II.mat - FS	2.577.704	23.02.2000

**Tabelle C.4:** Digitale Frequenzantwort, Datenbankeinträge und Bezeichnungen.

### Approximation der Transferfunktion von FGM aus der digitalen Frequenzantwort

Die FGM Übertragungsfunktion wird approximiert mit folgendem Polynom von Gleichung C.18. Sie ist unterschiedlich für die einzelnen Modi und die Resultate für Normal- und Burst-Mode sind wiedergegeben in Abb. C.9.

$$H_{FGM}(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(nb + 1)z^{-nb}}{a(1) + a(2)z^{-1} + \dots + a(na + 1)z^{-na}} \quad (\text{C.18})$$



**Abbildung C.8:** Datenflußdiagramm zur Rekonstruktion der Filter und Kompensation der Übertragungsstrecke.

### Datenbank

Der Ausgangspunkt ist die Approximation der gemessenen Transferfunktion mit Polynomen und die Berechnung eines minimalphasigen Systems. Die Datenbankeinträge dienen als Basis dazu, Abbildung C.8 zeigt die Vorgangsweise bis zur Bestimmung der Koeffizienten des Kompensationsfilters. In Tabelle C.4 sind die Dateien der Analyse aufgelistet.

### Resultate der Approximation der digitalen Frequenzantwort

Die Resultate für typisches Burst Mode – 5FD5I1B1 – und Normal Mode Verhalten – 5FD5I1N1 – sind in den Grafiken C.9 dargestellt. Die roten Kurven – real – sind Resultate der Bodenkalkulation in Magnetsrode, die Blauen – approximation – sind die Übertragungsfunktionen  $H_{FGM}(z)$ .

Im 22 Hz Normal Mode liegt der  $-3$  dB Punkt bei  $7.5 \pm 0.2$  Hz und die Phasendifferenz zwischen den Kanälen kann vernachlässigt werden bis Frequenzen von etwa 5 Hz. Im 67 Hz Burst Mode liegt der  $-3$  dB Punkt bei  $18 \pm 0.5$  Hz und der Phasenunterschied zwischen den Kanälen ist vernachlässigbar bis zu Frequenzen von 10 Hz. Im oberen Bereich, über 5 Hz bzw. 10 Hz, muß die exakte Transferfunktion in der Datenanalyse verwendet werden. Das Kompensationsfilter liefert diese Korrektur, ist stabil und kausal und der Amplitudengang der Gesamtstrecke verhält sich wie ein Allpaß, siehe Tabelle C.5.

### Validierung des Kompensationsfilters

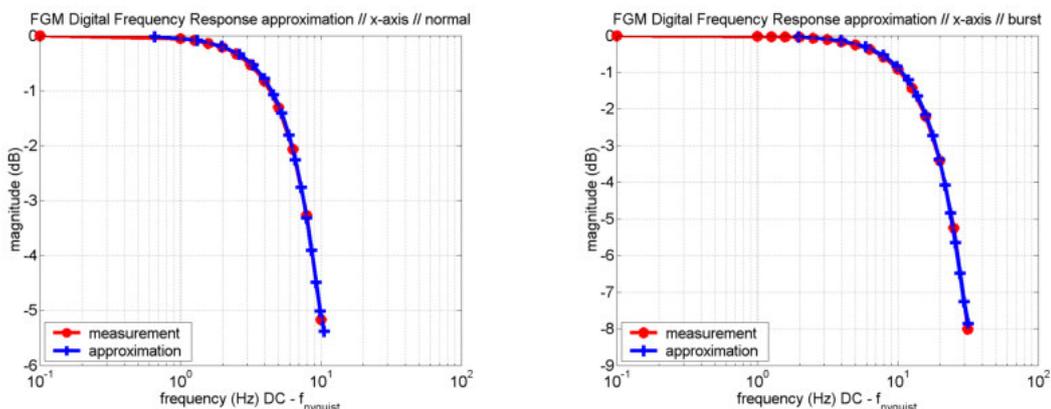
Die Matlab Software modelliert den Filter abhängig vom Mode des Instrumentes. Das bedeutet, daß ungemittelte, digitale Ausgangssignale nach den Stufen der herkömmlichen Verarbeitungssoftware ist Eingangssignale für den Kompensationsfilter. Der erste Parameter der Funktion ist der Filename gemäß dem Data Processing Handbook [Fornaçon et al., 2000], der Zweite ist ein String, entweder "B" für Burst Mode mit zeitlicher Auflösung von  $f_s = 67.2643$  Hz, oder "N" für Normal Mode, Abtastrate  $f_s = 22.4214$  Hz (exakt  $1/3$  von "B"). In Abbildung C.7 ist  $S_{FGM}[n]$  das Eingangs- und  $S_C[n]$  das Ausgangssignal der Filterstufe.

### Testsignale für Normal- und Burst-Mode

Abbildung C.10 zeigt Testsignale für verschiedene Eingangsfrequenzen  $\{1, 5, 10\}$  Hz, Abb. C.11 die Anwendung des Filters für reale Cluster FGM Daten im Burst-Mode, z. B. ergibt sich folgende Programmsequenz bei Magnetfeldvektoren für den 31. Dezember 2001:

```
% begin of MATLAB sequence
;
[t,in_vec,out_vec]=hc_file('C1_20011231_GSE.igm','N');
% Correction of Cluster-II FGM magnetic field values X(nT), Y(nT) and Z(nT); 31-12-2000
% the (default) filename from FGM data processing is 'C1_20001231_GSE.igm' → first parameter
% the data are normal mode → 'N' ist the second parameter
% the output file is 'C1_20001231_GSE_hc.igm' // <<name>>.igm results in <<name>>.hc.igm
% only the magnetic field values are modified
;
% end of MATLAB sequence

read binary data from C1_2001231_GSE.igm // finished // 3.224 s
calculate correction // finished // 7.11 s
write binary data to C1_2001231_GSE_hc.igm // finished // 4.406 s
```



**Abbildung C.9:** Gemessener und nachgebildeter Amplitudengang der x-Achse für Outboard Normal- und Burst-Mode, F8 (links Normal, rechts Burst). Für die y- und z-Achse ergeben sich praktisch idente Werte.

Filter	Achse	Burst Mode			Normal Mode		
		1	2	3	1	2	3
$H_c$	$X_{zeros}$	-11.17111	-0.44040	0.02567	-7.09303	-0.32435	0.02052
$H_c$	$X_{poles}$	-0.30349	-0.52975	-0.09990	-0.28883	-0.41488	-0.03694
$H_c$	$X_{amp}$	-0.00054			-0.00076		
$H_c$	$Y_{zeros}$	-10.92453	-0.44806	0.02184	-7.08430	-0.32712	0.01758
$H_c$	$Y_{poles}$	-0.30266	-0.53491	-0.10358	-0.28851	-0.41635	-0.04070
$H_c$	$Y_{amp}$	-0.00059			-0.00081		
$H_c$	$Z_{zeros}$	-11.00705	-0.45980	0.01754	-7.06958	-0.32187	0.02291
$H_c$	$Z_{poles}$	-0.30160	-0.54308	-0.11126	-0.28882	-0.41314	-0.03332
$H_c$	$Z_{amp}$	-0.00057			-0.00079		
$H_{fgm}$	$X_{zeros}$	-3.29506	-0.52975	-0.09990	-3.46222	-0.41488	-0.03694
$H_{fgm}$	$X_{poles}$	-11.17111	-0.44040	0.02567	-7.09303	-0.32435	0.02052
$H_{fgm}$	$X_{amp}$	562.03410			381.44495		
$H_{fgm}$	$Y_{zeros}$	-3.30402	-0.53491	-0.10358	-3.46607	-0.41635	-0.04070
$H_{fgm}$	$Y_{poles}$	-10.92453	-0.44806	0.02184	-7.08430	-0.32712	0.01758
$H_{fgm}$	$Y_{amp}$	513.52285			355.01261		
$H_{fgm}$	$Z_{zeros}$	-3.31563	-0.54308	-0.11126	-3.46233	-0.41314	-0.03332
$H_{fgm}$	$Z_{poles}$	-11.00705	-0.45980	0.01754	-7.06958	-0.32187	0.02291
$H_{fgm}$	$Z_{amp}$	529.16697			363.88387		

**Tabelle C.5:** Frequenzgang  $H_{fgm}(z)$  Approximation und Korrektur mit IIR-Filter 3. Ordnung, IB Sensor Burst- / Normal-Mode, File 5FD511B1 / 5FD511N1.

Filename	Beschreibung, Anmerkung
Hc_file.dll	FGM Kompensationsfilter
"name".h, "name".c	Header Files, C Files
hc_plot_file.m	FGM Kompensationsfilter Plot, Visualisierung
hc_plot_file_res.m	FGM Kompensationsfilter Plot, Visualisierung

**Tabelle C.6:** Files für die Software zur Rekonstruktion des digitalen Frequenzganges der Cluster FGM Magnetometer.

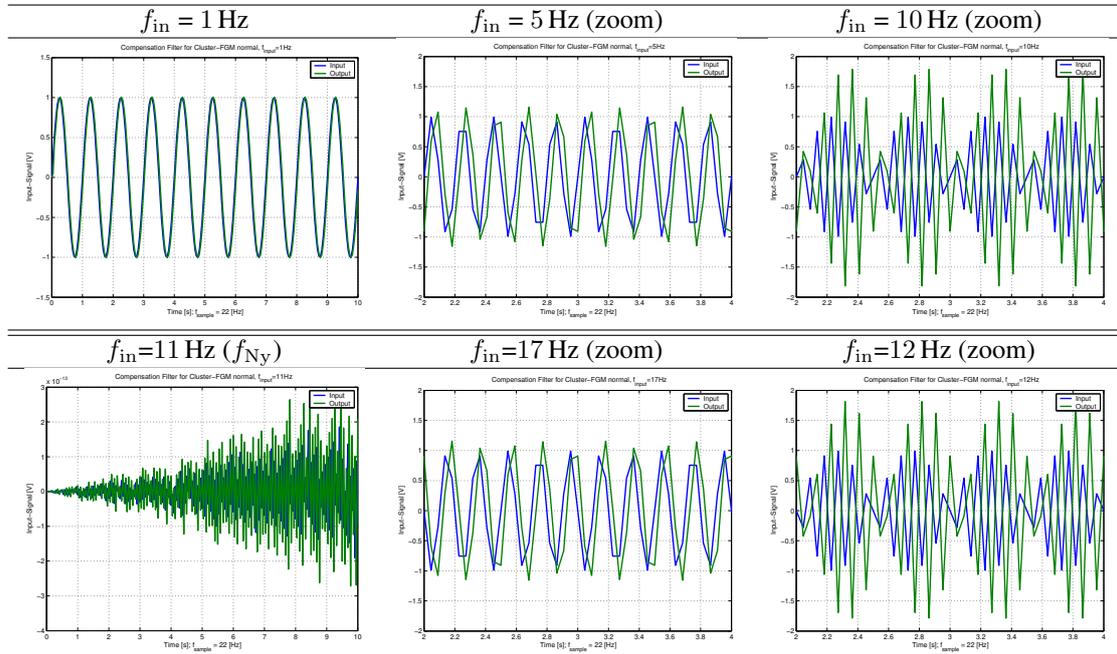


Abbildung C.10: Testsignale für den Filter, Eingangs- und Ausgangssignale, Normal Mode, Cluster FGM.

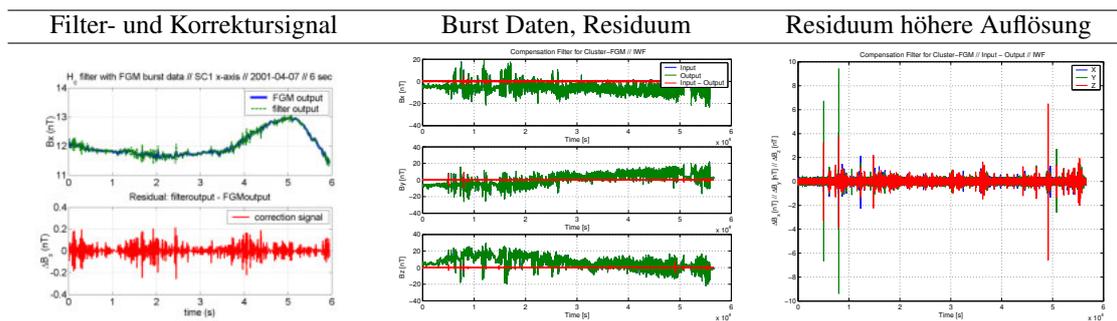


Abbildung C.11: Filter Eingangs- und Ausgangssignale im Burst Mode für Cluster FGM bei realen Daten und Residuum.

### C.2.4 Störspannungen im dynamischen Spektrum – Orbit

Betrachtet man hochaufgelöste Magnetfeldwerte im dynamischen Spektrum erkennt man schmalbandige Störungen deren Frequenzen sich kontinuierlich ändern, siehe Abbildung C.12. Dabei handelt es sich um ein typisches EMV Problem (Kap. B.1) am Satelliten. AC Störungen werden in den Frequenzbereich  $0 - f_{Ny}$  hineingespiegelt.

### C.2.5 Kalibration für spezielle Events und kurze Zeiträume

Die herkömmliche Kalibration – ein guter Kompromiss zwischen Arbeitsaufwand und Datenqualität – basiert auf den täglichen Kalibrierfiles. Im Gegensatz dazu kommt die Kalibration für hochaufgelöste Daten bei Eventstudien zum Einsatz, d. h. im Falle von Cluster FGM für eine Zeitspanne von wenigen Minuten bis maximal  $\sim 1$  h. Für gewöhnlich ist die zeitliche Auflösung 22 Hz im Normal- oder eben 67 Hz im Burst-Mode, abgeleitet von den dreifach höheren 201 Hz Daten des Instrumentes, Kap. C.1. Es gibt keine Mittelung wie im Falle von SP oder PP Datenprodukten. Abbildung C.13 zeigt Kalibrier-Resultate für einen Zeitraum von 3 Stunden (dargestellt 10 Minuten) am 01-Okt-2005.

Die Kalibration bei Eventstudien stützt sich auf die täglichen Kalibrierdaten. Der (i) Spinwinkel wird gefittet um das Signal in der Spinachse zu minimieren, danach erfolgt (ii) eine Minimierung der Leistung in der Spinfrequenz, etwa 1/4 Hz für Cluster, durch (ii<sub>1</sub>) Offsetfits der Komponenten in der Spinebene und (ii<sub>2</sub>) Minimierung der zweiten Harmonischen der Spinfrequenz durch Veränderung vom Empfindlichkeits-Verhältnisses der Komponenten in der Spinebene und Winkeländerung zur Spinachse.

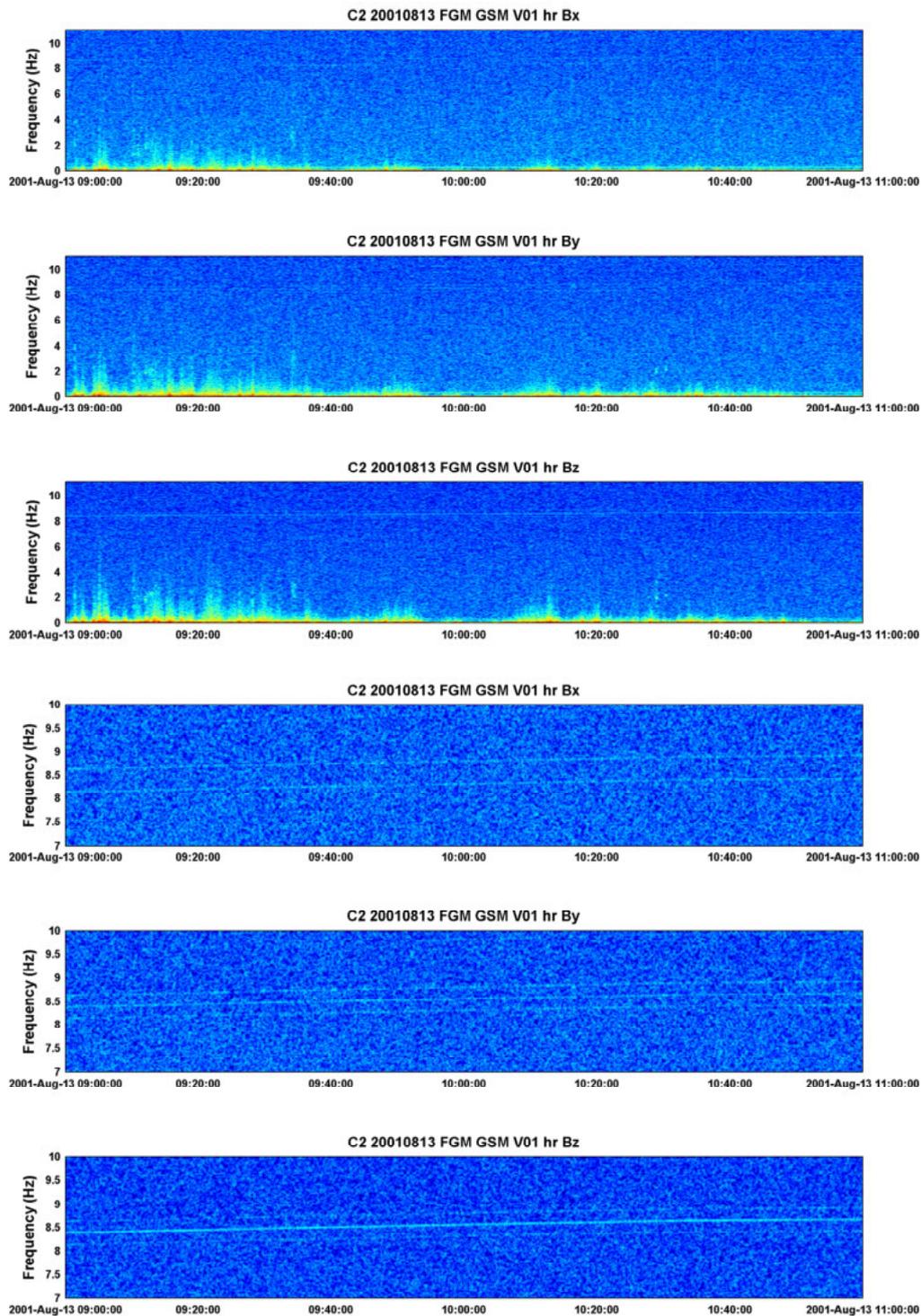
Im Allgemeinen zeigt das dynamische Spektrum der Datenreihe – kalibriert mit dem täglichen Kalibrierfile – und die Datenreihe nach der speziellen Kalibrierung – mit den Files für den Event – den Erfolg der Methode. Trotzdem ist es u. U. möglich mit einem leicht unterschiedlichen Datensatz (kürzere oder längere Periode um den Event) die Qualität noch weiter zu verbessern, d. h. den Spinton weiter zu minimieren.

Zusätzlich zu dieser ereignisorientierten Kalibration muß das Frequenzverhalten des Fluxgate Magnetometers bei höheren Frequenzen berücksichtigt werden, d. h. der Frequenzgang des Instruments muß kompensiert werden. Danach verhält sich die Kette von Sensor, Analogelektronik, ADC, Digitalelektronik bis zu den Ausgangswerten wie ein Allpass in der Signalverarbeitung. Dies ist speziell wichtig für Untersuchungen von Wellen im Plasma um die korrekte Amplitude und Phase vom Magnetfeld zu erhalten, siehe A.4.2. Ein weiterer Punkt ist die Kalibration zwischen den Instrumenten am Satelliten, siehe [Teubenbacher et al., 2013] für Gradientenberechnungen abgeleitet von Cluster FGM und EDI Daten.

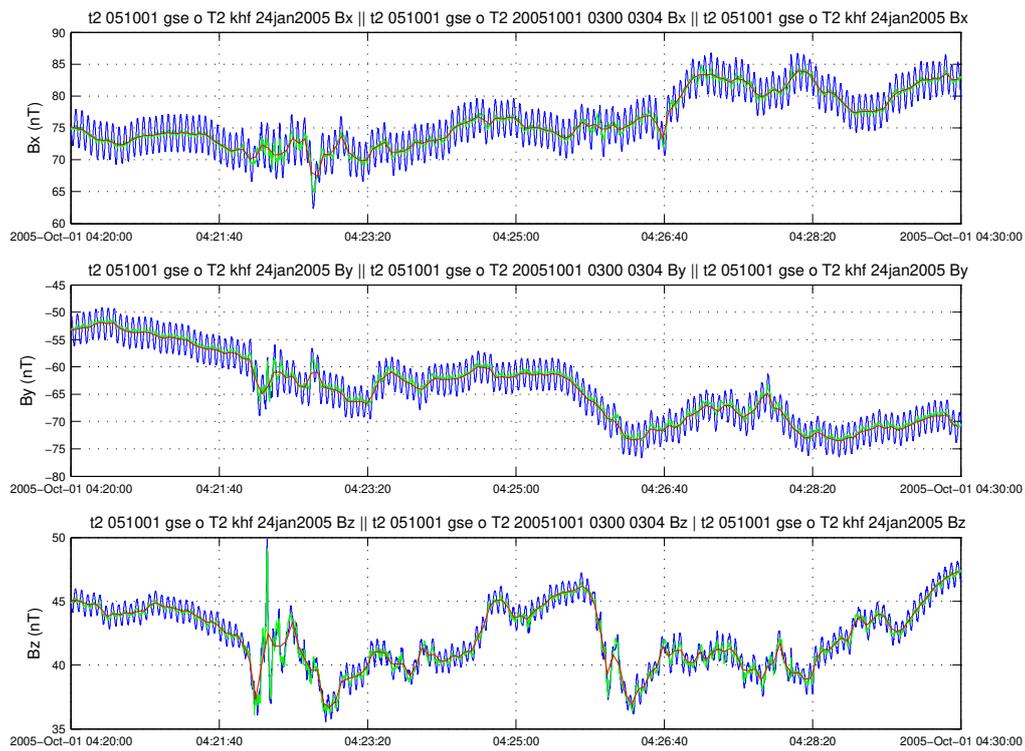
## C.3 Datenverarbeitung und Datenauswertung

### C.3.1 Rohdatenauswertung

Die Rohdaten mit geeignetem Level stammen vom Datenzentrum, siehe Kapitel A.4.6. Die erste Stufe der Rohdatenauswertung basiert auf C-Programmen unter dem Betriebssystem Linux, [Fornaçon et al., 2000]. Um das notwendige Ausgangsformat – in der Regel bereits kalibrierte Daten – zu erhalten, sind diese Module in einer SW Pipeline anzuwenden. Die Auswertung in den Cluster Datenzentren erfolgt mit der selben Software, allerdings ist die zeitliche Auflösung auf Spin-Mittelwerte (Prime-Parameter, PP) und Minuten-Mittelwerte (Summary-Parameter, SP) beschränkt. Nach diesen Programmen erfolgt die Weiterverarbeitung und wissenschaftliche Datenauswertung in kommerziellen Programmpaketen und speziellen optimierten Toolboxen, z. B. der IMF-Toolbox [Schwarzl, 2001].



**Abbildung C.12:** Obere Grafik: Dynamische Spektren mit schmalbandigen Störungen in allen drei Achsen im Normal Mode; 13-Aug-2001, GSE Koordinatensystem, 22 Hz Auflösung. Untere Grafik: Schmalbandige Störung im höherfrequenten Bereich für  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse (Spinachse) in GSE, 13-Aug-2001, 22 Hz Auflösung. Der Abstand der Linien in der Spinebene (gebildet von der  $x$ - und  $y$ -Achse) beträgt die doppelte Spinfrequenz,  $2f_{\text{Spin}} \approx 0.5$  Hz.



**Abbildung C.13:** DoubleStar TC2 Event Kalibration: (i) Hochaufgelöste 22 Hz Daten mit herkömmlicher Standardkalibration (blau), (ii) highres Daten mit Event-Kalibration (grün) und (iii) spingemittelte Daten ( $\sim 0.25$  Hz) mit Standardkalibration (rot). Man erkennt die merkliche Verbesserung in den 22 Hz Daten, der verbleibende Spinton für diesen Zeitraum ist minimal.

### Datenbankstatistik, Flußdiagramm und Verarbeitung

Als zentraler Server zur Datenverarbeitung für die Cluster und DoubleStar FGM Daten dient ein Rechner unter dem Betriebssystem Linux. Die relevanten Verzeichnisse und deren Unterverzeichnisse, sind:

"/data/	{ dsp/FGM/ql/ cluster/FGM/ql"	{ tc1" tc2" ... }	Resultate TC1, Resultate TC2, ...	DoubleStar Auswertung, Cluster Auswertung,
"/home/cluster/	{ fgm/ cluster[1..4]" TC1_clean"	{ bin" cal" }	Binärfiles, Kalibrierfiles,	Prozessierungssoftware, Link zu Rohdaten und HK-Files, DoubleStar TC1 Routinen.

Durch die Online-Verfügbarkeit können statistische Untersuchungen, d. h. das durchforsten großer Datenmengen (Datamining), leicht durchgeführt werden. Für eventbasierte Studien reichen die Tages-CDs (bis Ende 2005, danach nur mehr Onlinezugriff auf den Datenbestand übers Web), auf ihnen sind sämtliche Daten aller Instrumente der vier Satelliten, Housekeeping-Werte und relevante Dokumentationen enthalten.

Das Datenflußdiagramm zeigt die Folge der Einzelschritte um von den Rohdaten zu wissenschaftlichen Daten zu gelangen. In [Fornaçon et al., 2000] sind u. a. die Module der Datenverarbeitungs-Software beschrieben. Beginnend mit den Rohdaten (CD oder Server) sind folgende Blöcke notwendig bzw. optional:

- CD Rohdaten für einzelne Tage oder die kompletten Missionsdaten vom Server (Standard ab 2006),
- FGM Software und Kalibrierfiles,
- Module in sequentieller Pipeline-Struktur zur Verarbeitung der kalibrierten FGM Daten mit Matlab unter Linux und MS-Windows,
  - Abgleich auf einheitliche Zeitbasis,
  - Kompensationsfilter-SW zur Korrektur des Amplitudenganges für hochaufgelöste Daten,
  - SW-Algorithmen zur Curlometer-Technik, dB-Files, siehe Kapitel [C.3.3](#),
  - SW-Algorithmen zur Diskontinuitäts-Analyse.
- Änderung des Datenformates,
- SW zur Visualisierung und Präsentation der Daten im Internet und Intranet,
  - html, CSS und PHP Module,
  - MySQL Datenbank,
- Skripte zur Batch-Prozessierung und statistischen Analyse unter MS-Office.

Als Betriebssystem zur Software kann in den meisten Fällen sowohl Linux als auch Windows verwendet werden. Die statistischen Erhebungen basieren aus Abfragen der MySQL Datenbank. Die Eintragungen enthalten Informationen zu sämtlichen Rohdaten-CDs der Cluster Mission (bis Ende 2005), danach ist die Online-Verfügbarkeit gegeben, Verweise auf Daten und Grafiken zu anderen Missionen (DoubleStar, Geotail, Wind, UVI, geosynchrone Daten, etc.) und zum CSDSweb auf Tagesbasis. Als Grundsatz gilt Flexibilität bezüglich HW und SW, im Detail sind folgende Informationen vorhanden:

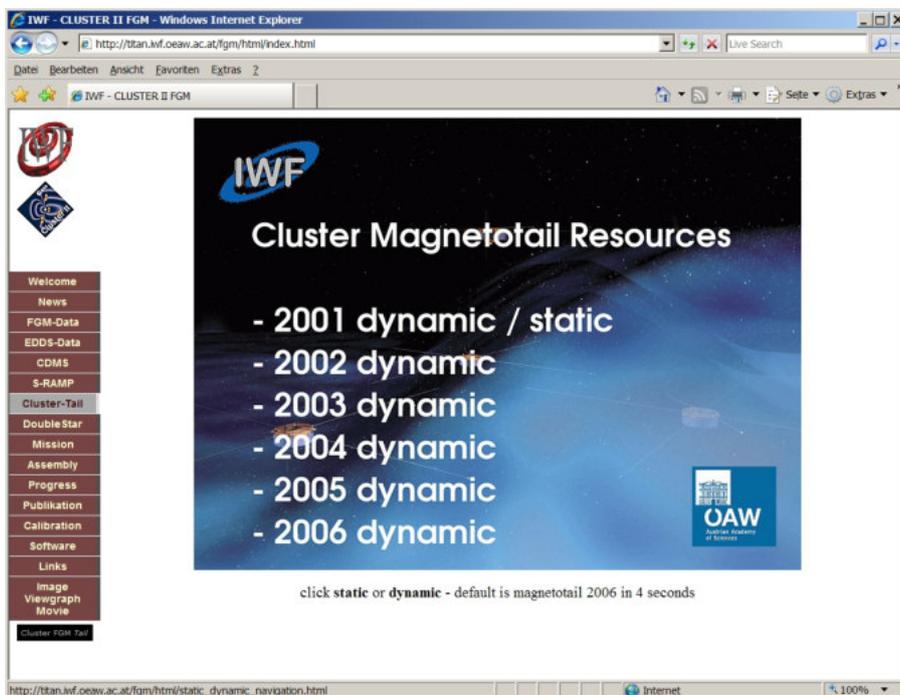
- Spalten: Datum, Orbit mit Satellite Situation Center (SSC) Web, Daten anderer relevanter Missionen, Rohdaten, Kalibrierdateien,
- Zeitbereich: {01.07. bis 06.11.} jeweils für {2001 bis 2009+} der Cluster Mission.

### C.3.2 Visualisierung, Präsentation über Webinterface

Grundsätzlich gilt, daß Wissenstransfer zwischen Personen nur passieren kann wenn ein ähnlicher Erfahrungskontext existiert – das Wissen ist in den Köpfen – d. h. im Gegensatz zur Information ist (strukturiertes) Wissen an Personen gebunden, siehe [Stachel, 2005] für eine industrielle Anwendung und Umsetzung dieser Ideen.

Modernes und effizientes Datenhandling, um eben nicht nur Information zu transportieren sondern auch um Wissen zu generieren, läßt sich ab einer gewissen Größe nur mehr mit verteilten Client-Server Konfigurationen effizient durchführen. Die Server, z. B. Webserver oder Datenbanken, sind über das Internet weltweit vernetzt. Damit verbunden ist eine kostengünstige Skalierung aller Komponenten, hohe Redundanz und geringe Ausfallwahrscheinlichkeit wird erzielt. Neuere Entwicklungen in Verbindung mit Verlässlichkeit (Dependability), siehe Kap. B.3, sind dargestellt in [Prattes et al., 2009]. Bei den "Cluster-Magnetotail Resources", siehe Startseite Grafik C.14, handelt es sich um eine Bereitstellung von Daten der Mission optimiert für den Zeitbereich Juli bis November jeden Jahres. Neben dem Hauptbestand an Cluster-Daten werden relevante bodenbasierte Informationen und Datenbestände anderer Missionen (Polar, DoubleStar TC1 und TC2, teilweise Themis) miteinbezogen. Ziel ist es, ein frei zugänglicher Anlaufpunkt bei wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen im Zusammenhang mit Cluster FGM zu sein. Sollten die Cluster Daten zukünftig in (quasi) Echtzeit zur Verfügung stehen, ist ein Ausbau in Richtung Space-Weather Vorhersage, wie das Konzept dargestellt in Kap. A.2.5, zusammen mit ACE, SOHO und anderen Missionen, möglich.

Die Datenpräsentation erfolgt über ein Intranet mit dem Webserver Apache, der Datenbank MySQL und der Skriptsprache PHP. Dabei handelt es sich primär um sogenannte Quicklook-Daten. Sie ermöglichen meist bereits eine qualitative Analyse von Events in der Magnetosphäre in nahezu Echtzeit, die exakten quantitativen Größen erfordern spezielle Kalibrierfiles und sind für Publikationen in Journalen unerlässlich. Es ist ratsam, für jeden Event ein eigene Kalibrierung zu erstellen, um damit eine Fehlerminimierung zu ermöglichen. Die Daten der Website wurden mit Kalibrierfiles auf Tagesbasis (Daily-Calfiles) erstellt und sind für Untersuchungen im Magnetschweif bereits durchaus zu verwenden.



**Abbildung C.14:** Cluster FGM Tail Homepage, Startseite und Navigationsmenü zu relevanten technischen und wissenschaftlichen Ressourcen, SW-Paketen und Dokumentationen, siehe [Eichelberger, 2007a].

Die interaktive Struktur des Intranets erlaubt eine übersichtliche Darstellung in Tabellenform mit Links zu relevanten Grafiken für jeden Tag. Neben Cluster sind Informationen der Satellitenmissionen Geotail, Polar und Wind vorhanden.

Die Satellitenmission Doublestar (Doublestar Project, DSP) – eine Zusammenarbeit zwischen China und der ESA – besteht aus einem äquatorialen und einem polaren Satelliten in einer maximalen Entfernung von etwa 13 Erdradien, siehe Kap. 2.4. Beide sind eine sinnvolle Ergänzung zu den vier Cluster Satelliten und ermöglichen zu gewissen Zeiten Konstellationen um spezielle Phänomene, z. B. das zeitliche Verhalten von magnetischen Teilstürmen in der Magnetosphäre, eingehender zu untersuchen. Mit Cluster, Doublestar und Beobachtungen auf der Erde sollte es möglich sein, Fragestellungen der NASA Mission Themis (Seite 191), z. B. Substorm-Timing, bereits vor dessen Start zumindest teilweise zu beantworten. Nach dem Start von Themis im Jahr 2007 stehen dafür weitere fünf Satelliten zur Verfügung. Ähnliches gilt für MMS im Bereich Rekonnektion, siehe Seite 191.

Der Datenvorbereitung und Vorverarbeitung, und der damit zwangsläufig verbundenen raschen Visualisierung von Space-Science Daten mehrerer Experimente von zum Teil unterschiedlichen Satelliten, kommt daher in Zukunft eine wichtige Aufgabe zu – eine Art "virtueller Satellit". Aus den Rohdaten werden dynamisch, d. h. erst auf Anfrage (on demand) eines Benutzers (Client), wissenschaftliche Daten mit bestmöglicher Kalibrierung erzeugt und visualisiert. Um Interaktivität zwischen Benutzer und Server zu gewährleisten ist dazu entsprechende Rechenleistung und Kapazität der Datennetze notwendig. Die Seiten entsprechen dem aktuellen HTML Webstandard bzw. dessen XML-Umformulierung XHTML mit Cascading Style Sheets (CSS). Damit ist eine konsequente Trennung von Struktur (HTML), Design (CSS), Inhalt (Texte und Bilder) und Funktion (PHP, MySQL) gegeben und ein Übergang auf ein Content Management System (CMS) leicht möglich.

Erinnert sei hier an Curt Herzstark (1902 – 1988), er entwickelt, baut und vervollkommnet eine mechanische Rechenmaschine, eine handgroße "Pfeffermühle" mit Namen Curta, praktisch der Vorgänger des elektronischen Taschenrechners.

### C.3.3 Wissenschaftliche Datenauswertung – Mehrpunktalgorithmen

#### Koordinatensysteme

Für eine praxiserichte, weltraumfokussierte Darstellung von Koordinatensystemen und deren Definitionen mittels "Franck" Vorlagen (um alle notwendigen und relevanten Punkte abzudecken) im Zuge des SE mit einem Anhang zu Zeit, Ephemeriden und Referenzsystemen siehe [ECSS, 2008b]. Allgemein besteht jede Transformation aus Translation  $\vec{T}_{1,2}$ , Rotation  $R_{1,2}$  und Skalierung  $\lambda_{1,2}$ . Es ergibt sich  $\vec{x}_2 = \vec{T}_{1,2} + \lambda_{1,2} R_{1,2} \vec{x}_1$ . Typische Koordinatensysteme – einige davon zeitabhängig – sind: (i) Inertiale, (ii) Orbitssysteme, (iii) Satellitenfixierte, (iv) Launchersysteme, (v) objektfixierte Rotationen (planetare), (vi) Topozentrische, (vii) Systeme für Testzwecke, (viii) Simulationssysteme oder (ix) Prozessierungs / Produkt Systeme (Instrumenten post-Prozessierung). Ganz allgemein gilt, daß die Meßwerte in einem physikalischen Koordinatensystem zu Forschungszwecken angegeben sein müssen. Dieses System ist unterschiedlich verglichen mit dem Sensorsystem. Eine vereinfachte allgemeine Transformation für die Komponenten des Magnetfeldes im Referenzsystem, siehe [Fornaçon et al., 2000] und [Hapgood, 1992], beginnend mit den Ausgangsspannungen der drei Kanäle des Instrumentes  $[\vec{V}]$  ergibt sich in der Form  $\vec{B} = [\vec{k}][\vec{V} - \vec{Z}][M_{\text{sensor}}][M_{\text{boom}}][M_{\text{s/cinert}}]$ , mit  $\vec{B}$  als das gemessene Magnetfeld im gewünschten Koordinatensystem,  $\vec{Z}$  dem effektiven Nullpunkt des Magnetometers, inkludiert den Nullwerten der A/D Konverter und den S/C Beiträgen,  $\vec{k}$  ist der Skalenfaktor und A/D Konverter Faktor für jede Achse,  $M_{\text{sensor}}$  ist eine nicht-orthogonale Matrix zur Transformation der Messungen vom physikalischen System in ein orthogonales Sensorsystem,  $M_{\text{boom}}$  ist eine orthogonale Matrix zur Transformation vom Sensor System zum S/C System und  $M_{\text{s/cinert}}$  ist eine orthogonale Matrix zur Transformation des S/C Systems in das erwünschte Koordinatensystem. Skalare Magnetometer sind von solchen Transformationen nicht betroffen, eine Beeinflussung ist nur über die magnetische Kontamination des Satelliten gegeben (Seite 130). Die Auswertung der Cluster Daten erfolgt vorwiegend in GSE und GSM Koordinatensystemen und hängt von der wissenschaftlichen Fragestellung ab. Für einige Untersuchungen sind allerdings Lokale- oder

Koordinatensystem Bezeichnung	Akronym	Art des Systems, Ursprung
Geocentric Solar Ecliptic	GSE	global Geozentrisch
Geocentric Solar Magnetospheric	GSM	global Geozentrisch
Geocentric Equatorial Inertial	GEI	global Geozentrisch
Geographic	GEO	global Geozentrisch
Geomagnetic Dipole	MAG	global Geozentrisch
Solar Magnetic	SM	global Geozentrisch
Heliocentric Aries Ecliptic	HAE	global Heliozentrisch
Heliocentric Earth Ecliptic	HEE	global Heliozentrisch
Heliocentric Earth Equatorial	HEEQ	global Heliozentrisch
Boundary Normal	LMN	lokal
Field Aligned Current	FAC	lokal
Radial Tangential Normal	RTN	lokal
Spacecraft Sun	SCS	lokal S/C Zentrum
FGM Spin Reference	FSR	lokal S/C Zentrum
FGM Sensor	FS	lokal S/C Zentrum
Body Build	BB	lokal S/C Zentrum
Orthogonalized Sensor	OS	lokal S/C Zentrum
Spin Reference	SR	lokal S/C Zentrum

**Tabelle C.7:** Übersicht von häufig verwendeten globalen geo- und heliozentrischen, lokalen und S/C Koordinatensystemen für Weltraum-Missionen.

Spacecraft-Koordinatensysteme (SCS) besser geeignet. Speziell für die Bestimmung der Kalibrierparameter im Flug wird FSR benötigt. Tabelle C.7 zeigt einen Überblick von verwendeten Koordinatensystemen. Das RTN System ist ein lokales S/C zentriertes kartesisches System mit Einheitsvektor  $\vec{R}$  radial von der Sonne zum Satelliten,  $\vec{T}$  ist die Richtung der planetaren Bewegung und  $\vec{N} = \vec{R} \times \vec{T}$  vervollständigt das Dreibein. Weitere Bezugssysteme sind Realisierungen der Spezifikationen des International Terrestrial Reference Systems (ITRS) vom Central Bureau of the International Earth Rotation Service (IERS), nämlich (i) ITRF (abgeleitet aus VLBI, LLR, SLR, GPS und DORIS), weiters (ii) WGS84 von GPS (praktisch eine Realisierung von ITRS mittels GPS Kontrollstationen) und (iii) Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF) von Galileo. Als Zeitreferenz sind GPS system time und Galileo system time (GST) an der International Atomic Time (TAI) orientiert. Bezugssystem in der Astronomie ist das International Celestial Reference System (ICRS), realisiert im International Celestial Reference Frame (ICRF) mittels der Position von 295 (aktuell ICRF2) kompakten extragalaktischen Radioquellen (8.4 GHz) und einer Genauigkeit von  $\sim 40 \mu\text{as}$ . Weiters ergibt sich im Hipparcos Katalog ein globales Referenzsystem bei optischen Wellenlängen und das Fundamentalsystem der Astronomie mit den Fundamental Katalogen (in Verbindung mit den Arbeiten von Johann Palisa, 1848 – 1925), momentan in Version 6 (FK6) mit der Standard-Epoche J2000.0 steht für das Conventional Celestial Reference System (CCRS). ICRS, realisiert im ICRF, ersetzt das traditionelle optische fundamentale Referenzsystem realisiert durch die Fundamentalkataloge. Das ICRS steht mit den IERS Earth Orientation Parametern (EOP) mit dem ITRS in Verbindung.

### Curlometer Technik

Die Kombination von Daten mehrerer Satelliten macht nur Sinn wenn jeder einzelne Satellit für sich – im Sinne einer Interkalibrierung – optimal kalibriert ist. Erst danach ist bei Korrelationen das bestmögliche Resultat erzielbar. In der Literatur [Balogh et al., 1997] sind drei unterschiedliche Techniken, gegliedert nach räumlicher Skalenslänge, angegeben: Curlometer, Diskontinuitäts Analysator und Wellenteleskop, siehe Tab. C.8. Die Umsetzung der Curlometer Technik erfolgt mit Software Paketen, als Ergebnis stehen die Database Files (dB-Files) zur Verfügung. Sie enthalten in der ersten Spalte Datum und Zeit, in den weiteren Spalten die berechneten Werte für die wissenschaftliche Datenauswertung, siehe Tabelle C.9. Die

Skalen	Analysetechnik	maßgebliche Relation im Skalenbereich
$L > \vec{R}_{ij}$	Curlometer	$\mu_0 \vec{J} \cdot (\Delta \vec{R}_i \times \Delta \vec{R}_j) = \Delta \vec{B}_i \cdot \Delta \vec{R}_j - \Delta \vec{B}_j \cdot \Delta \vec{R}_i, \langle \nabla \cdot \vec{B} \rangle = 0$
$L \approx \vec{R}_{ij}$	Wellenteleskop	$\Phi_i = \vec{k} \cdot \Delta \vec{R}_i - \omega \Delta t_{ij}, \vec{k} = \vec{k}_0 + \vec{G}$
$L < \vec{R}_{ij}$	Disk. Analysator	$\langle n \rangle, n_j, v_{\parallel}, v_{\perp}$

**Tabelle C.8:** Anwendungsbereich der Curlometer-, Diskontinuitäts- und Wellenteleskop Technik für Cluster bei unterschiedlichen Skalenlängen  $L$ .

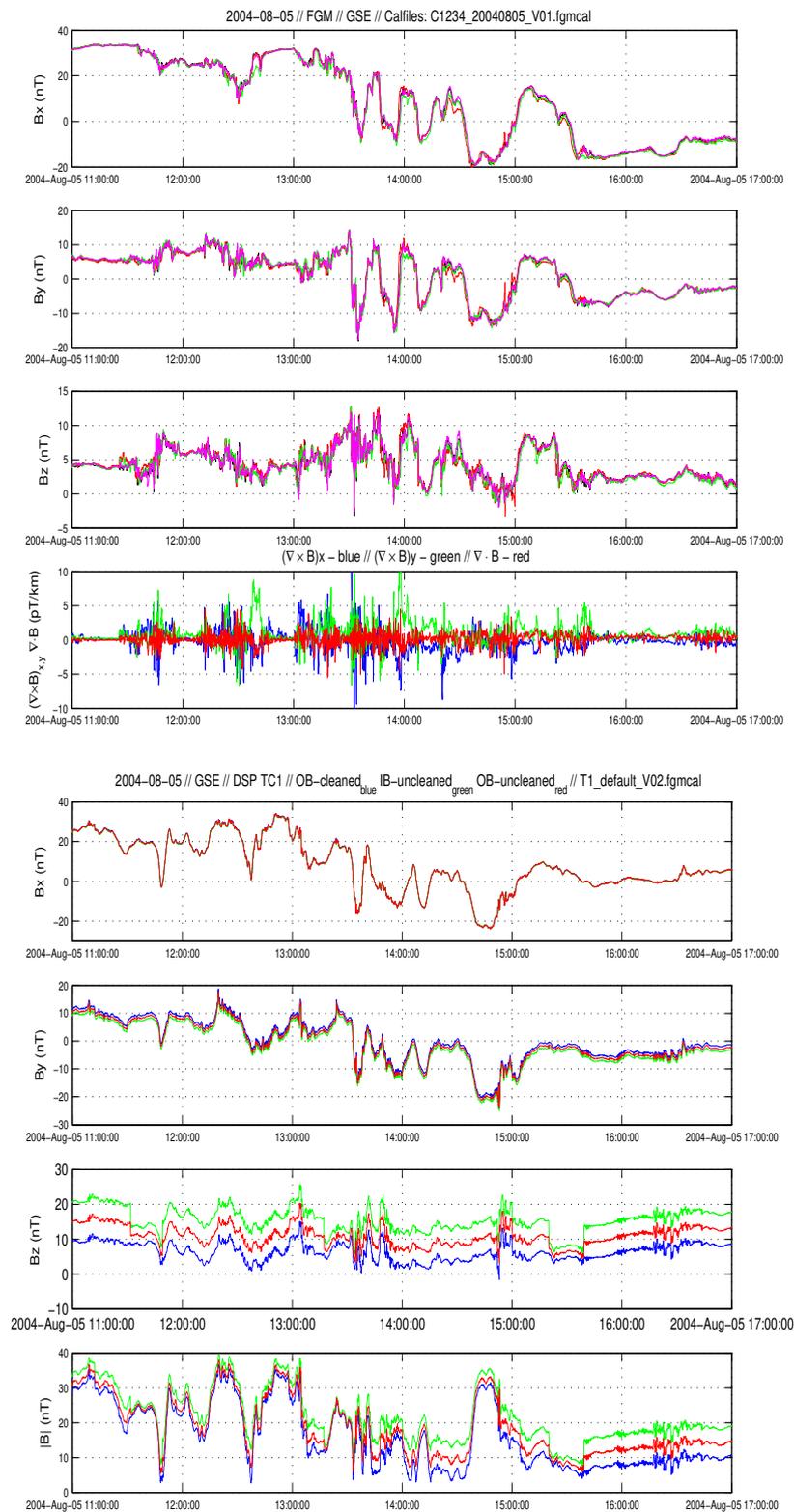
Spalte Nr.	Bezeichnung, Einheit	Berechnung, Anmerkung
	Koordinaten, z. B. GSM	$\vec{r}_{\alpha} = (x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha})$
	Koordinaten Differenz	$\vec{r}_{\alpha\beta} = \vec{r}_{\beta} - \vec{r}_{\alpha}$
	Satellit	$(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = \text{SC } 1, 2, 3, 4$
1	Datum, Zeit	CCSDS Format
2, 3, 4	Mittelwerte (nT)	$\langle B_{(x,y,z)} \rangle = \sum_{\alpha=0}^3 B_{(x,y,z)\alpha} / 4$
5	Delta Bx (nT)	$\Delta B_x = \sum_{\alpha, \beta=0; \alpha \neq \beta}^3  B_{x\beta} - B_{x\alpha}  / 6$
6, 7	Max, Min Delta Bx (nT)	$\max\{\Delta B_x\}, \min\{\Delta B_x\}$
8	Divergenz (pT/km)	$\nabla \cdot \vec{B} = \sum_{\alpha=0}^3 \vec{k}_{\alpha} \cdot \vec{B}_{\alpha}$
	reziproke Tetraedervektoren (1/km)	$\vec{k}_{\alpha} = \vec{r}_{\beta\gamma} \times \vec{r}_{\beta\delta} / (\vec{r}_{\beta\alpha} \cdot (\vec{r}_{\beta\gamma} \times \vec{r}_{\beta\delta}))$
9, 10, 11	Gradient (pT/km)	$\nabla B = \sum_{\alpha=0}^3 \vec{k}_{\alpha} B_{\alpha}$
	Norm (nT)	$B_{\alpha} = (B_{\alpha x}^2 + B_{\alpha y}^2 + B_{\alpha z}^2)^{1/2}$
12, 13, 14	Wirbel (pT/km <sup>2</sup> ) $\rightarrow 10/4\pi \times (\text{nA/m}^2)$	$\nabla \times \vec{B} = \sum_{\alpha=0}^3 \vec{k}_{\alpha} \times \vec{B}_{\alpha}$
	Schwerpunkt (km)	$\vec{r}_b = \sum_{\alpha=0}^3 \vec{r}_{\alpha} / 4$
	Schwerpunkts-Koordinaten	$\mu_{\alpha}(\vec{r}_b) = 1 + \vec{k}_{\alpha} \cdot (\vec{r}_b - \vec{r}_{\alpha})$
	Schwerpunkts-Feld (nT)	$\vec{B}_b \equiv \vec{B}(\vec{r}_b) = \sum_{\alpha=0}^3 \vec{B}_{\alpha} (1 + \vec{k}_{\alpha} \cdot (\vec{r}_b - \vec{r}_{\alpha}))$
15, 16, 17	Sp.-Krümmung (1/km) $\times 10^6$	$(\vec{b}_b \cdot \nabla) \vec{b}_b$
	Normierung	$\vec{b}_b = \vec{B}_b /  \vec{B}_b $
18, 19, 20	Krümmung (1/km) $\times 10^6$	$(\vec{b}_b \cdot \nabla) \vec{b}_i = \sum_{\alpha=0}^3 (\vec{b}_b \cdot \vec{k}_{\alpha}) B_{\alpha i} / B_{\alpha}$

**Tabelle C.9:** Curlometer-Technik; Berechnung der Cluster FGM db-Files, sämtliche Magnetfeldwerte befinden sich am selben Zeitraster, für gewöhnlich mit 4 sec zeitlicher Auflösung.

Software wurde unter Matlab geschrieben. Die Vorteile sind die rasche Entwicklung von Algorithmen, es ist unter vielen Betriebssystemen einsetzbar, stand-alone Applikationen sind unter Windows möglich und es ist auf Universitäten und Forschungseinrichtungen weit verbreitet. Als Nachteile sind die hohen Kosten und teure Toolboxen zu erwähnen.

Die Daten der Berechnungen werden im ASCII-Format gespeichert, sie sind damit auch für herkömmliche Software leicht lesbar. Zur Archivierung werden die Files gezippt. Als Zeitformat werden die Time-Code-Formats des Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) verwendet.

Die Grafiken in Abb. C.15 zeigen eine Verbindung zwischen Cluster und DoubleStar Daten während eines Durchfluges des Erdmagnetschweifs. Damit ist eine wissenschaftlich wertvolle Erweiterung des Multi-S/C-Konzeptes ausgehend von Cluster auf andere S/C demonstriert. Die Anordnung der nunmehr sechs Satelliten ermöglicht die zeitliche und räumliche Abfolge von magnetischen Teilstürmen (Substorms) und großräumigen Bewegungen zu untersuchen, siehe dazu [Zhang et al., 2005b], [Nakamura et al., 2005b] und [Volwerk et al., 2005b].



**Abbildung C.15:** Beispiel von gemeinsamen Cluster- und DoubleStar Magnetfeld-Daten für einen Durchflug vom Magnetschweif der Erde am 05-Aug-2004. Deutlich zu erkennen ist die Korrelation zwischen den  $B_x$ -Komponenten der Cluster Satelliten und DoubleStar, GSE Koordinatensystem.

# Zertifikate



Abbildung C.16: Zertifikate von unterschiedlichen Missionen und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft / Agentur für Luft- und Raumfahrt FFG ALR : ESA Cluster, ESA Rosetta, ESA Venus Express, ESA/FFG Sommerschule Alpbach 2005.

# Nachschlagwerke, Physikalische Konstanten

Häufige Nachschlagwerke und Basiswerke die in dieser Arbeit verwendet wurden waren für Elektrodynamik [Jackson, 1998], [Simonyi, 1989], in der Plasmaphysik [Baumjohann and Treumann, 1996], in ionosphärischen Belangen [Friedrich, 2016], in der Astronomie/Astrophysik [Schneider, 2006] und das Buch [Voigt, 1988], Preprints von [arXiv, 2017] und bei Artikeln bezüglich Relativität und Sonnenphysik [Living Reviews, 2017]. In den Tabellen C.10 und A.7 sind Definitionen von physikalischen und technischen Konstanten zusammengefasst, inklusive einiger Plasmaparameter (Tab. A.7), wie sie in verschiedenen Kapiteln dieser Arbeit auftreten. Zahlen in Klammern geben die Standardabweichung in der Unsicherheit der letzten Nachkommastelle an. Abkürzungen und Begriffserklärungen sind im Index zusammengestellt. Umfangreichere und vor allem aktuelle Datensätze stehen bei der Particle Data Group (PDG) und dem Committee on Data for Science and Technology (CODATA), siehe dazu [Mohr et al., 2016], zur Verfügung. Für Plasma-Formeln siehe die Naval Research Laboratory (NRL) Plasma Formulary. Ein Klassifikation von Arbeiten zur Einordnung in ein Fachgebiet ist durch das Physics and Astronomy Classification Scheme (PACS) gegeben.

Bezeichnung	Akronym	Wert
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c$	$2.99792458 \times 10^8$ m/s
Planck'sche Konstante	$h$	$6.6262 \times 10^{-34}$ Js
Planck Masse	$m_{Pl}$	$1.221 \times 10^{19}$ GeV/c <sup>2</sup> = $1.094 \times 10^{-38}$ $M_{\odot}$
Feinstrukturkonstante	$\alpha$	1/137.03599976(50)
Elementarladung	$e$	$1.6022 \times 10^{-19}$ C
Rydberg Konstante	$R_{\infty}$	$2\pi^2 m_e^4 / h^3 = 10973731.568539$ m <sup>-1</sup>
Bohr'sches Magneton	$\mu$	$e\hbar/2m_e = 9.27400968 \times 10^{-24}$ J/T
Permittivität des Vakuums	$\epsilon_0$	$8.8541878 \times 10^{-12}$ C <sup>2</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>
Permeabilität des Vakuums	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ Ns <sup>2</sup> C <sup>-2</sup>
Feldwellenwiderstand	$(\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$	376.730313461 $\sim 120\pi$ $\Omega$
Proton Ruhemasse	$m_p$	$1.6726 \times 10^{-27}$ kg
Elektron Ruhemasse	$m_e$	$9.1095 \times 10^{-31}$ kg
Elektron g-Faktor	$g_e$	-2.00231930436182(52)
Proton/Elektron Massenverhältnis	$m_p/m_e$	1836
Klassischer Elektronenradius	$r_e$	$2.818 \times 10^{-15}$ m
Thomson Streuquerschnitt	$\sigma_T$	$8\pi\alpha^2\hbar^2/3m_e^2c^2 = 6.652 \times 10^{-29}$ m <sup>-2</sup>
Elektronvolt	$eV$	$1.602 \times 10^{-19}$ J
Temperaturäquivalent zu 1 eV		$1.160 \times 10^4$ K
Ionisationspotential Wasserstoff		$2.180 \times 10^{-18}$ J
von Klitzing Konstante	$R_K$	$h/e^2 = \mu_0 c / 2\alpha = 25812.807$ $\Omega$
Josephson Konstante	$K_J$	$2e/h = 483597.9$ GHz/V
Gravitationskonstante	$G$	$6.672 \times 10^{-11}$ Nm <sup>2</sup> kg <sup>-2</sup>
Radius der Erde	$R_E$	6370 km
Radius der Sonne	$R_{\odot}$	$6.96 \times 10^5$ km, $R_{\odot} = 109 R_E$
Masse der Sonne	$M_{\odot}$	$1.989 \times 10^{30}$ kg = $1.116 \times 10^{57}$ GeV/c <sup>2</sup>

Bezeichnung	Akronym	Wert
Mittlere spezifische Masse	$\rho$	$1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Spezifische Masse Sonnenzentrum	$\rho_c$	$10^5 \text{ kg/m}^3$
Oberflächentemperatur	$T_s$	6000 K
Temperatur im Zentrum der Sonne	$T_c$	$1.5 \times 10^7 \text{ K}$
Bolometrische Leuchtkraft	$L_\odot$	$3.846 \times 10^{33} \text{ erg/s}$
Spektrale Flußdichte, Jansky	$Jy$	$10^{-26} \text{ J/(sm}^2\text{Hz)}$
Erdbeschleunigung	$g$	$9.807 \text{ ms}^{-2}$
Astronomische Einheit	$AU$	$1.495978707 \times 10^8 \text{ km}$ , $1 \text{ AU} = 215 R_\odot$
Ångström	$\text{Å}$	$10^{-10} \text{ m}$
Lichtjahr	$Lj$	$9.45 \times 10^{15} \text{ m}$
Parallaxen-Sekunde, Parsec	$pc$	$3.086 \times 10^{18} \text{ cm}$
Gauss	$Ga, G$	$79.6 \text{ A/m}$
Loschmidt'sche (Avogadro) Zahl	$N$	$6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Ideale Gaskonstante	$R$	$8.31 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$
Boltzmann Konstante	$k_B$	$R/N = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Gamma	$\gamma$	$7.96 \times 10^{-4} \text{ A/m}$ , $1 \gamma = 10^{-5} \text{ Ga}$
Dichte eines idealen Gases	$n$	$2.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ bei Std. Temp. und Druck
CMB Energiedichte	$\rho_\gamma$	$\pi^2 k_B^4 T^4 / 15 (\hbar c)^3$ $2.47 \times 10^{-5} h^{-2} (T/T_0)^4 \rho_{cr}$
Kritische Dichte	$\rho_{cr}$	$1.879 h^2 \times 10^{-29} \text{ gcm}^{-3}$ $2.775 h^2 \times 10^{11} M_\odot \text{ Mpc}^{-3}$ $8.098 h^2 \times 10^{-11} \text{ eV}^4 / (\hbar c)^3$
CMB Temperatur	$T_0$	$2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$ , $2.348 \times 10^{-4} \text{ eV}/k_B$
Hubble Konstante	$H_0$	$100 h \text{ kmsec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ $2.133 h \times 10^{-42} \text{ GeV}/\hbar$ $1.023 h \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$
Sverdrup	$Sv$	$10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

**Tabelle C.10:** Physikalische Konstanten: Bezeichnung, Akronyme, Werte und Relationen.

Erwähnt sie hier, daß die Allgemeine Relativitätstheorie (siehe Seite 140 ff.) und ihre Verallgemeinerungen, z. B. Kaluza-Klein- oder String-Theorien, absolute (a priori) Strukturen durch dynamische Größen ersetzen, das Äquivalenzprinzip als Kernstück der ART bis dato allerdings absolute Größen der dimensionslosen Kopplungs-Konstanten ( $\alpha$ ,  $m_p/m_e$ ,  $Gm_em_p/(\hbar c)$ ) beinhaltet. Die Tendenz geht dahin, die Kopplungs-Konstanten durch variierende Felder in der Raumzeit zu ersetzen, um somit eine dynamische Interpretation des Äquivalenzprinzips zu erzielen. Meßtechnisch konnte eine Abweichungen vom Äquivalenzprinzips noch nicht nachgewiesen werden.

# Index

- ΛCDM, Kalte Dunkle Materie mit Kosmologischer Konstante, 64
- Abell, George Ogden Abell, 92
- ACE, Advanced Composition Explorer, 176
- ACR, Anomale Kosmische Strahlung, 170–172
- ACU, Acoustic Sensor Package, 56, 58, 61, 62
- ADC, Analog Digital Konverter, 1, 5–12, 14, 18, 56, 219–221, 226, 231
- Admont, Engelbert von Admont, 68
- AGN, Aktiver Galaktischer Kern, 91, 108, 110, 120, 166, 180
- AGW, Atmospheric Gravity Wave, 46
- AKR, Auroral Kilometric Radiation, 181, 182
- al-Chwarizmi, Abu Dscha'far Muhammad ibn Musa al-Chwarizmi, 65
- ALDIS, Austrian Lightning Detection and Information System, 212
- Alfvén, Hannes Olof Gösta Alfvén, 110, 147
- Alhazen, Abu Ali al-Hasan ibn al-Haitham, Alhazen, 67
- AMC, Atlantische Multidekaden Oszillation, 153
- AMOC, Atlantic Meridional Overturning Circulation, 153
- Ampère, André Marie Ampère, 136
- AMS, Accelerator Mass Spectrometry, 159
- ANC, Adaptive Noise Cancellation, 56
- Anich, Peter Anich, 105
- Apollonios, Apollonios von Perge, 67
- Aquin, Thomas von Aquin, 68
- Archimedes, Archimedes von Syrakus, 214
- Aristarch, Aristarch von Samos, 67
- Aristoteles, Aristoteles, 67, 68, 104
- Arrhenius, Svante August Arrhenius, 219
- ART, Allgemeine Relativitätstheorie, 71, 74, 75, 78, 80, 82, 140, 148, 151, 252
- Artemis, Acceleration, Reconnection, Turbulence, and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun, 191
- ASCII, American Standard Code for Information Interchange, 14, 226, 227, 248
- ASIC, integrierter anwendungsspezifischer Baustein, 6
- ASPOC, Active Spacecraft Potential Control experiment, 1, 24, 30, 61, 192, 195, 197, 206
- Avercamp, Hendrik Avercamp, 152
- Averroës, Ibn Rushd, 68
- AWFT, Arbeitsgemeinschaft für Weltraumforschung und Technologie, 189
- Babcock, Horace Welcome Babcock, 110, 112, 159
- Bauer, Siegfried J. Bauer, 190
- BB, Body Build Koordinatensystem, 246
- BBN, Big Bang Nucleosynthesis, 94, 107, 115, 116
- Behaim, Martin Behaim, 105
- Benndorf, Hans Benndorf, 153
- BER, Bitfehlerrate, 56
- Bethe, Hans Albrecht Bethe, 147
- Beuttler, Clemens Beuttler, 105
- BH, Black Hole, 71, 72, 166, 180
- Biela, Wilhelm Freiherr von Biela, 130
- Birkeland, Kristian Olaf Bernhard Birkeland, 103
- Blau, Marietta Blau, 184
- Bošković, Ruđer Josip Bošković, Roger Joseph Boscovich, 190, 225
- Boltzmann, Ludwig Boltzmann, 56, 65, 71, 73, 83, 135
- Bolyai, János Bolyai, 140
- Bondi, Hermann Bondi, 164
- Boskovsky, Willi Boskovsky, 179
- BP, Before Present, 156
- Brahe, Tycho Brahe, 69
- BRITE, Bright star target explorer, 191
- Bruno, Giordano Bruno, 69
- Burgklechner, Matthias Burgklechner, 105
- CAA, Cluster Active Archive, 199
- CCD, charge coupled device, 77, 78
- CCD, Complete Calibration Data, 224
- CCRS, Conventional Celestial Reference System, 246
- CCSDS, Consultative Committee for Space Data Systems, 248
- CD, Contact Discontinuity, 147
- CDM, Kalte Dunkle Materie, 88
- CDMA, Code Division Multiple Access, 104
- CDSM, Coupled Dark State Magnetometer, 33, 49, 130
- CERN, Conseil Européene pour la Recherche Nucléaire, Europäisches Kernforschungszentrum, 133, 134, 140, 185

- CEST, Central European Summer Time, 18, 53  
 CET, Central European Time, 18, 192  
 CFL, Courant Friedrichs Lewy Bedingung, 118  
 CH, Coronal Holes, 149, 167  
 CHAMP, CHALLENGING Minisatellite Payload, 22  
 Chimag, Chinese Magnetometer, 41, 61, 181, 200  
 Church, Frederic Edwin Church, 182  
 CIS, Cluster Ion Spectrometry experiment, 197  
 Clemens VII., Papst, Giulio de' Medici, 69  
 Clobucciarich, Johannes Clobucciarich, 104  
 CMB, Core Mantle Boundary, 121, 126  
 CMB, Kosmische Mikrowellen Hintergrundstrahlung, 64, 71–73, 82, 85, 88, 89, 91, 93, 94, 99, 102, 107, 115, 116, 186  
 CMB, Kosmische Mikrowellen Hintergrundstrahlung, 179  
 CME, koronaler Massenauswurf, 149, 151, 154, 167–169, 178, 187, 190  
 CMS, Content Management System, 245  
 CNM, Cold Neutral Medium, 112  
 CNO, Kohlenstoff Stickstoff Sauerstoff Zyklus, 148  
 COBE, Cosmic Background Explorer, 116  
 CoC, Center of Coil, 229  
 CODATA, Committee on Data for Science and Technology, 251  
 Conrad, Victor Conrad, 153  
 Cook, James Cook, 103  
 COSPAR, Committee on Space Research, 173, 178  
 Coulomb, Charles Augustin de Coulomb, 136  
 CRAND, Cosmic Ray Albedo Neutron Decay, 186, 187  
 CS, Cross-Scale, 192  
 CSA, Cluster Science Archive, 199  
 CSDS, Cluster Science Data System, 199  
 CSES, China Seismo Electromagnetic Satellite, 33, 47, 49  
 CSSAR, Center for Space Sciences and Applied Research, China, 200  
 CTBTO, Preparation Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, 180  
 dB-Files, Database Files, 246  
 DD, Directional Discontinuity, 147  
 DD, Displacement Damage, 213  
 DD, Doppeldifferenzen, 189  
 DE, Dunkle Energie, 60, 72, 73  
 Defant, Albert Joseph Maria Defant, 129  
 DGL, Differentialgleichung, 143  
 Diviš, Prokop Diviš, Prokop Diwisch, 208  
 DLL, Delay Lock Loop, 188  
 DM, Dunkle Materie, 60, 72  
 DNA, deoxyribonucleic acid, Desoxyribonukleinsäure  
 DNS, 153  
 DNL, Differential Nonlinearity, 219, 221  
 DOA, Direction Of Arrival, 54, 56  
 DOR, differential one-way ranging, 56  
 DPU, Datenverarbeitungs-Einheit, 1, 5, 231  
 DSCOVR, Deep Space Climate Observatory, 176  
 DSN, Deep Space Network, 198  
 Dst, Index der geomagnetischen Aktivität, 181, 183  
 DtE, Direct-to-Earth, 54, 61  
 DWP, Digital Wave Processing experiment, 197  
 E-ELT, European Extremely Large Telescope, 71  
 ECC, Error Correction Code, 212, 217  
 ECSS, European Cooperation for Space Standardization, 212, 214  
 EDI, Electron Drift Instrument, 192, 197  
 EDRS, European Data Relay Satellite System, 54  
 EFW, Electric Field and Wave experiment, 197, 201  
 EGNOS, European Geostationary Navigation Overlay Service, 189  
 Ehrenfest, Paul Ehrenfest, 132, 140  
 Eichhorn, Heinrich Karl Eichhorn, 78  
 Einstein, Albert Einstein, 72, 74, 140  
 EIRP, Emitted Isotropic Radiated Power, effektive isotrope Strahlungsleistung, 56  
 ELF, Extremely Low Frequency, 51  
 EMIC, Electromagnetic Ion Cyclotron waves, 188  
 EMSC, European-Mediterranean Seismological Centre, 46  
 EMV, elektromagnetische Verträglichkeit, 1, 27–30, 204–207  
 EMVV, Elektromagnetische Verträglichkeitsverordnung, 206  
 ENA, Energetic Neutral Atoms, 172  
 Endlicher, Stephan Ladislaus Endlicher, 158  
 ENIGMA, Hellenig Geomagnetic Array, 41  
 ENOB, Effective Number of Bits, 220  
 ENSO, El Niño / Southern Oscillation, 123, 153  
 EO, Earth Observation, 180  
 EOL, End-of-Life, 216  
 EOP, Earth Orientation Parameters, 246  
 EPICA, European Project for Ice Coring in Antarctic, 152  
 Ernst der Eiserne, Herzog Ernst von Österreich und Steiermark, 69  
 ESA, Europäische Weltraumorganisation, 60  
 ESD, Electrostatic Discharge, 208  
 ESD, Equivalent Source Dipole, 106  
 ESO, European Southern Observatory, 74, 75  
 ESOC, European Space Operations Centre, 189, 190, 198  
 ESTEC, European Space Research and Technology Centre, 24  
 Eudoxos, Eudoxos von Knidos, 67  
 EUV, Extrem Ultraviolet, 163

- Evershed, John Evershed, 160–162
- Fabricius, Johann Fabricius, 154
- Fabricius, Paulus Fabricius, 104
- FAC, Field Aligned Current Koordinatensystem, 246
- FDIR, Failure Detection Isolation and Recovery, 217, 218
- Fermi, Enrico Fermi, 110
- Fernberger, Christoph Carl Fernberger, 124
- FET, Feldeffekttransistor, 213
- FFG ALR, Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, Agentur für Luft- und Raumfahrt, iii
- FFG ALR, Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, Agentur für Luft- und Raumfahrt, 250
- FFS, Fast Forward Shock, 147
- FFT, Fast Fourier Transformation, 10, 225
- FGM, Fluxgate Magnetometer, 1, 4–6, 10, 13, 18, 20, 61, 62, 130, 197, 198, 201, 206, 223, 229, 233–236, 240, 243, 244, 247
- Ficker, Heinrich von Ficker, 153
- FIP, First Ionization Potential, 167
- FIR, Far Infrared, 111, 114, 120
- FIRI, Faraday International Reference Ionosphere, 173
- FIT, Failures per unit time, 212, 219
- FK6, 6ter Fundamental Katalog, 246
- Flamm, Ludwig Flamm, 83
- Flavin, Dan Flavin, 231
- Fligely, August von Fligely, 124
- FLRW, Friedmann Lemaître Robertson Walker, 72, 82
- FM, Flugmodell, 20
- FMEA, Failure Modes and Effects Analysis, 218
- FMECA, Failure Modes Effects and Criticality Analysis, 218
- FOC, Fluid Outer Core, 121, 126
- Forbush, Scott Ellsworth Forbush, 159
- FPBW, Full Power Bandwidth, 220
- FPGA, Field Programmable Gate Array, 56, 215
- Frank, Philipp Frank, 83
- Franklin, Benjamin Franklin, 208
- FRB, Fast Radio Burst, 74
- Friedel, Ehrenbert Xaver Friedel, 105
- Friedmann, Alexander Alexandrowitsch Friedmann, 81
- Friedrich III. (HRR), Friedrich III. (HRR) von Habsburg, 69
- Frisch, Otto Frisch, 147
- Frisius, Gemma Frisius, 104
- Fritz, Hermann Fritz, 103
- FRS, Fast Reverse Shock, 147
- FS, Fast Shock, 147
- FS, FGM Sensor Koordinatensystem, 246
- FS, Flugersatz-Modell, 20
- FSO, Free Space Optics, 54
- FSR, FGM Spin Reference Koordinatensystem, 246
- FTA, Fault Tree Analysis, 218
- FTE, Flux Transfer Event, 191
- Gödel, Kurt Friedrich Gödel, 141
- Gabriel, Alfons Gabriel, 124
- Gabriel-Kummer, Agnes Gabriel-Kummer, 124
- Galilei, Galileo Galilei, 69, 140
- Gauß, Carl Friedrich Gauß, 103, 122
- GCR, galaktische kosmische Strahlung, 154, 156, 157, 159, 170, 171, 186
- GEC, Global atmospheric Electrical Circuit, 46, 50
- GEI, Geocentric Equatorial Inertial Koordinatensystem, 246
- Gellibrand, Henry Gellibrand, 103
- GEO, Geographic Koordinatensystem, 246
- Gilbert, William Gilbert, 69, 103
- GIS, Geographische Informationssysteme, 104
- GISP, Greenland Ice Sheet Project, 153
- Gleißberg, Wolfgang Gleißberg, 155
- GMES, Global Monitoring for Environment and Security, 180
- Gmunden, Johann von Gmunden, 68
- GNSS, Global Navigation Satellite Systems, 104
- GOCE, Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, 22, 180
- GOES, Geostationary Operational Environmental Satellite, 44
- Gogh, Vincent Willem van Gogh, 62
- Gold, Thomas Gold, 64, 172, 181
- GONG, Global Oscillation Network Group, 148
- Gottfried, Kurt Gottfried, 134
- GPIB, General Purpose Interface Bus, 7–9
- GPS, Global Positioning System, 31, 34, 35, 38, 104, 189
- GPTS, Geomagnetic Polarity Time Scale, 123, 129, 156
- GRACE, Gravity Recovery and Climate Experiment, 22
- GRB, Gamma Ray Burst, 166, 180
- Grienberger, Christoph Grienberger, 154
- GRIP, Greenland Ice Core Project, 153, 156, 158
- Grosseteste, Robert Grosseteste, 68
- Grueber, Johannes Grueber, 104
- GSE, Geocentric Solar Ecliptic Koordinatensystem, 246
- GSM, Geocentric Solar Magnetospheric Koordinatensystem, 246
- GSPN, Generalized Stochastic Petri Nets, 219
- GST, Galileo System Time, 246
- GTO, Geostationärer Transfer Orbit, 194

- GTRF, Galileo Terrestrial Reference Frame, 246  
 GW, Gravitationswellen, 72
- Haas, Conrad Haas, 203  
 Hadamard, Jacques Salomon Hadamard, 230  
 HAE, Heliocentric Aries Ecliptic Koordinatensystem, 246  
 Hale, George Ellery Hale, 109, 159  
 Hallerstein, Augustin Hallerstein, 105  
 Halley, Edmond Halley, 103, 190  
 Hammer-Purgstall, Joseph Freiherr von Hammer-Purgstall, 158  
 Hanel, Rudolf A. Hanel, 172, 190  
 Hann, Julius von Hann, 153  
 Harriot, Thomas Harriot, 154  
 Harrison, John Harrison, 104  
 Hartmann, Sigismund Ferdinand Hartmann, 130  
 Hasenöhrl, Friedrich Hasenöhrl, 82  
 Haydn, Franz Joseph Haydn, 2, 194  
 HDM, Heiße Dunkle Materie, 88  
 Heaviside, Oliver Heaviside, 136  
 HEE, Heliocentric Earth Ecliptic Koordinatensystem, 246  
 HEEQ, Heliocentric Earth Equatorial Koordinatensystem, 246  
 Heftman, Kurt Heftman, 190  
 Hell, Maximilian Hell, 163, 182  
 Heraklit, Heraklit von Ephesos, 67  
 Herberstein, Sigismund von Herberstein, 104  
 Hertz, Heinrich Rudolf Hertz, 136  
 Herzfeld, Karl Ferdinand Herzfeld, 83  
 Herzstark, Curt Herzstark, 245  
 Hess, Viktor Franz Hess, 184  
 HFA, Hot Flow Anomaly, 147  
 HGA, High-Gain Antenne, 22, 216  
 Hochstetter, Ferdinand von Hochstetter, 123  
 Horrebow, Christian Pedersen Horrebow, 159  
 Hoyle, Fred Hoyle, 118  
 HSIA, Hardware-Software Interaction Analysis, 218  
 HSS, Schneller Sonnenwind, 167  
 Hubble, Edwin Powell Hubble, 86  
 Hueber, Blasius Hueber, 105  
 Humboldt, Alexander von Humboldt, 103, 155
- IACG, Inter Agency Consultative Group, 194  
 IADC, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 178  
 IAGA, International Association of Geomagnetism & Aeronomy, 122  
 IB, Inboard Sensor, 4  
 IBEX, Interstellar Boundary Explorer, 172  
 ICB, Inner Core Boundary, 121, 126  
 ICE, International Cometary Explorer, 190  
 ICL, Imperial College London, 6
- ICM, Intracluster Medium, 93, 94, 99, 100, 102, 107  
 ICME, Interplanetary counterpart of CME, 169  
 ICRF, International Celestial Reference Frame, 246  
 ICRS, International Celestial Reference System, 246  
 ICS9, 9th International Conference on Substorms, 199  
 IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 54  
 IERS, International Earth Rotation Service, 246  
 IGEP, Institut für Geophysik TU-Braunschweig, 229  
 IGM, Intergalaktische Medium, 99  
 IGRF, Internationales Geomagnetisches Referenzfeld, 122  
 IMD, Intermodulation Distortion, 220  
 IMF, Initial Mass Function, 107  
 IMF, Interplanetares Magnetfeld, 130, 131, 147, 154, 165, 166, 177, 178, 232, 233, 240  
 IMS, International Monitoring System, 180  
 INFREP, International Network for Frontier Research on Earthquake Precursors, 41, 46  
 INL, Integral Nonlinearity, 220, 221  
 INW, Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, 9  
 IPP, Ionospheric Pierce Point, 48  
 IRI, International Reference Ionosphere, 173  
 IRIS, Infrared Interferometer Spectrometer, 172  
 IS, Intermediate Shock, 147  
 ISAS, Institute of Space and Astronautical Science, Japan, 192  
 ISEE, International Sun Earth Explorer, 190, 191  
 ISM, Interstellares Medium, 107, 113, 118–120  
 ISRO, Indian Space Research Organization, 191  
 ISS, International Space Station, 180  
 ISSI, International Space Science Institute, 199  
 ISTP, International Solar Terrestrial Physics, 194  
 ITOS, Improved TIROS Operational Satellite, 190  
 ITRS, International Terrestrial Reference System, 246  
 IUGG, Internationale Union für Geodäsie und Geophysik, 122  
 IWF, Institut für Weltraumforschung, 1, 6, 20, 24, 25, 28, 30, 32, 38, 42, 200, 204, 205
- Joyce, James Joyce, 102  
 JSOC, Joint Science Operations Centre, 198
- Köppen, Wladimir Peter Köppen, 153  
 Kafka, Franz Kafka, 190  
 Karlik, Berta Karlik, 184  
 Kepler, Johannes Kepler, 69, 70, 105  
 Kindermann, Joseph Karl Kindermann, 105  
 Kircher, Athanasius Kircher, 156  
 Koch, Joseph Anton Koch, 152  
 Kogelnik, Herwig Kogelnik, 54  
 Kolumbus, Christoph Kolumbus, 105, 190

- Kompfner, Rudolf Kompfner, 54  
 Kopernikus, Nikolaus Kopernikus, 68  
 Kordes, Karl Kordes, 190  
 Kottler, Friedrich Kottler, 83  
 Kreil, Karl Kreil, 123, 153  
 Kues, Nikolaus von Kues, 69
- LAE, Lyman Alpha Emitter, 74  
 LAGEOS, Laser Geodynamics Satellite, 71  
 Langmuir, Irving Langmuir, 147  
 Larmor, Joseph Larmor, 118, 121  
 Lazius, Wolfgang Lazius, 104  
 LBG, Lyman Break Galaxien, 74  
 LCT, Laser Communication Terminal, 54  
 Lecher, Ernst Lecher, 54  
 Leder, Hans Leder, 124  
 Leighton, Robert Benjamin Leighton, 149, 159  
 Lemaître, Abbé Georges Edouard Lemaître, 85  
 LEMP, Lightning Electromagnetic Pulse, 210  
 Lense, Josef Lense, 71  
 LET, Linear Energy Transfer, 214  
 Lieben, Robert von Lieben, 54  
 Liechtenstein, Joseph Marx Freiherr von Liechtenstein, 105  
 Liesganig, Joseph Liesganig, 190  
 Lilienfeld, Julius Edgar Lilienfeld, 213  
 Littrow, Joseph Johannes von Littrow, 154  
 Littrow, Karl Ludwig von Littrow, 154  
 Littrow, Otto von Littrow, 154  
 LMN, Boundary Normal Koordinatensystem, 246  
 Lobatschewski, Nikolai Iwanowitsch Lobatschewski, 140  
 Lojen, Gerhard Lojen, 70  
 Loomis, Elias Loomis, 103  
 Lorentz, Hendrik Antoon Lorentz, 136  
 Lorenz, Ludwig Valentin Lorenz, 136  
 LPS, Lightning Protection System, 210  
 LSM, Langsamer Sonnenwind, 167  
 LSS, Large Scale Structure, 72, 94, 149  
 LTI, Linear Time-Invariant, 235  
 Lukrez, Titus Lucretius Carus, 103
- Müller, David Heinrich Müller, 124  
 Münzer, Hieronymus Münzer, 105  
 MAC, Magnetische-, Auftriebs- und Corioliskräfte, 128  
 Mach, Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach, 141  
 MAG, Geomagnetic Dipole Koordinatensystem, 246  
 Magellan, Ferdinand Magellan, 190  
 Magnes, Magnesia, 103  
 Mako, Paul Mako, Pál Makó de Kerekgede, 182  
 Maler, Teobert Maler, 65  
 Mandl, Rudi W. Mandl, 74  
 Margules, Max Margules, 153
- Maximilian I. (HRR), Maximilian I. von Habsburg, 69, 105  
 Maxwell, James Clerk Maxwell, 136  
 Mayer, Walter (Walther) Mayer, 141  
 MCP, Micro Channel Plate, 24  
 MDF, Magnetic Direction Finding, 212  
 MDI, Michelson Doppler Imager, 149  
 MECU, Million Accounting Unit, 194  
 Meitner, Lise Meitner, 147  
 MEMS, Micro Electro Mechanical Systems, 55  
 Metrodoros, Metrodoros von Chios, 110  
 MEZ, mitteleuropäische Zeit, 192  
 MHD, Magnetohydrodynamik, 62, 107, 117, 118, 120, 126, 127, 146, 147, 160, 166, 169, 192, 196, 233  
 Minkowski, Hermann Minkowski, 140  
 MIR, Merged Interaction Region, 171  
 Mises, Richard von Mises, 83  
 MMS, Magnetospheric Multi Scale, 176, 189, 191, 192, 196, 233, 245  
 Morré, Karl Morré, 209  
 MSA, Mikrostruktur Analysator, 6  
 MSK, Minimum Shift Keying, 31  
 MSP, Master Science Plan, 198  
 mumok, Museum Moderner Kunst Stiftung Ludwig Wien, 231
- NASA, National Aeronautics and Space Administration, USA, 191  
 Neckam, Alexander Neckam, 103  
 NEEM, North Greenland Eemian Ice Drilling, 153  
 Neer, Aert van der Neer, 152  
 NEO, Near-Earth Object, 180  
 Nestroy, Johann Nestroy, 190  
 Neugebauer, Otto Neugebauer, 65, 141  
 Neumann, Johann G. Neumann, 178  
 Newton, Isaac Newton, 75, 82, 89, 140, 141  
 NGDC, National Geophysical Data Center, 150  
 NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, 44, 150, 180  
 Noether, Amalie "Emmy" Noether, 144  
 Nordberg, Willi (William, Bill) Nordberg, 190  
 NP, Nonlinear Programming, 224  
 NRL, Naval Research Laboratory, 251  
 NS, Neutronenstern, 180
- OB, Outboard Sensor, 4  
 Oberth, Hermann Oberth, 189  
 Ockham, William von Ockham, 68, 230  
 ÖAW, Österreichische Akademie der Wissenschaften, 1, 2, 190  
 ÖBL, Österreichische Biographische Lexikon 1815–1950, 2  
 Oort, Jan Hendrik Oort, 92

- Oppenheim, Samuel Oppenheim, 151  
 Oppolzer, Theodor von Oppolzer, 151  
 Ørsted, Hans Christian Ørsted, 136  
 OS, Orthogonalized Sensor Koordinatensystem, 246  
 OSL, Optisch Stimulierte Lumineszenz, 158
- Pachleitner, Franz Pachleitner, 190  
 PACS, Physics and Astronomy Classification Scheme, 251  
 Palisa, Johann Palisa, 246  
 PAR, Positive Acknowledge Retransmit, 217  
 Parker, Eugene Newman Parker, 165, 166, 168, 169, 171, 172  
 Paul III., Papst, Alessandro Farnese, 69  
 Payer, Julius von Payer, 124  
 PBL, Planetare Grenzschicht, Planetary Boundary Layer, 174  
 PDG, Particle Data Group, 251  
 PDS, Planetary Data System, 199  
 PEACE, Plasma Electron And Current Experiment, 197  
 Peregrinus, Petrus Peregrinus de Maricourt, 103  
 Peuerbach, Georg von Peuerbach, 68  
 Pfeiffer, Ida Pfeiffer, 124  
 Philolaos, Philolaos von Kroton, 67  
 PICAM, Planetary Ion CAMera, 1, 2, 24, 25, 27, 28, 61, 62  
 Pirker, Alfred Pirker, 70  
 Plößl, Simon Plößl, 154  
 Platon, Platon, 67  
 Plinius, Plinius der Ältere, 152  
 PLL, Phase Lock Loop, 188  
 Pontikos, Herakleides Pontikos, 67  
 Popper, Karl Raimund Popper, iv, 222  
 Portenau, Odorich von Portenau, 104  
 Posnansky, Arthur Posnansky, 65  
 PP, Prime Parameter, 199, 240  
 PPS, Puls Pro Sekunde, 31  
 PSA, Planetary Science Archive, 199  
 PSD, Power Spectral Density, 47  
 PSF, point spread function, 77  
 PSLV, Polar Satellite Launch Vehicle, 191  
 Ptolemäus, Claudius Ptolemäus, 67
- QCD, Quantenchromodynamik, 134  
 QED, Quantenelektrodynamik, 134  
 QFT, Quantenfeldtheorie, 134  
 QSO, Quasi Stellares Objekt, 91
- Radon, Johann Karl August Radon, 235  
 RAPID, Research with Adaptive Particle Imaging Detectors, 197  
 RD, Rotational Discontinuity, 147  
 Reder, Friedrich H. Reder, 190
- Regiomontanus, Hans Müller, Camillus Johann(es) Müller aus Königsberg, 68, 105  
 Reilly, Franz Johann Joseph von Reilly, 105  
 Reischek, Andreas Reischek, 123  
 Ressel, Josef Ludwig Franz Ressel, 123  
 RF, Radio Frequency, 54  
 Rheticus, Georg Joachim Rheticus, 69  
 Riedler, Willibald Riedler, 61, 189  
 RMHD, Rotating MHD, 127  
 RPC-Mag, Rosetta Plasma Consortium Magnetometer, 1, 18  
 RTN, Radial Tangential Normal Koordinatensystem, 246  
 Rudolff, Christoph Rudolff, 65  
 Rudolf II., Rudolf II., Kaiser des Heiligen Römischen Reichs, 69
- S/C, Spacecraft, 130  
 Sünkel, Hans Sünkel, 130  
 SAA, South Atlantic Anomaly, 122, 214  
 Sacrobosco, Johannes de Sacrobosco, John von Hollywood, 68  
 SAD, Solar Array Disturbance, Spin Average Disturbance, 13  
 SADM, Solar Array Drive Mechanism, 233  
 Sagdeev, Roald Zinnurovich Sagdeev, 189  
 Salpeter, Edwin Ernest Salpeter, 108, 148  
 SBH, Supermassives Schwarzes Loch, 101  
 SCHA, Spherical Cap Harmonics Analysis, 106  
 Scheimpflug, Theodor Scheimpflug, 190  
 Scheiner, Christoph Scheiner, 154  
 Scherzer, Karl von Scherzer, 123  
 Schmiedl, Friedrich Schmiedl, 203  
 Schrödinger, Erwin Schrödinger, 83  
 Schwabe, Samuel Heinrich Schwabe, 159  
 SCS, Spacecraft Sun Koordinatensystem, 246  
 SDSC, Satish Dhawan Space Center, 191  
 SDSS, Sloan Digital Sky Survey, 74  
 SE, Systems Engineering, 222, 245  
 SEB, Single Event Burnout, 213  
 SEE, Single Event Effekt, 212–214  
 SEFI, Single Event Functional Interrupt, 213  
 SEGMA, South European Geomagnetic Array, 41, 46, 47, 200  
 SEL, Single Event Latch-up, 213  
 Seleukos, Seleukos von Seleukia, 67  
 Sellény, Joseph Sellény, 124  
 SEP, Solar Energetic Particles, 168, 169, 187, 213  
 SET, Single Event Transient, 213  
 SEU, Single Event Upset, 213  
 Seutter, Matthäus Seutter, 105  
 SFR, Star Formation Rate, 74, 114  
 SFU, Solar Flux Unit, 150  
 SGR, Soft  $\gamma$  Repeater, 180

- SHA, Spherical Harmonics Analysis, 105
- SI, Internationales Einheitensystem, 137
- SIC, Solid Inner Core, 121, 126
- SID, Sudden Ionospheric Disturbance, 178
- SIDC, Solar Influences Data Analysis Center, 150
- SINAD, Signal to Noise and Distortion Ratio, 220
- Slipher, Vesto Melvin Slipher, 86
- SM, Solar Magnetic Koordinatensystem, 246
- SMILE, Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer, 192
- SMOS, Soil Moisture and Ocean Salinity, 180
- SN, Supernova, 64, 65, 71–73, 111, 118, 119, 166, 170, 180
- SNR, Signal to Noise Ratio, 10, 111, 220
- SOHO, Solar & Heliospheric Observatory, 149, 168, 176, 194, 196, 244
- SOI, Silicon On Insulator, 212
- SP, Summary Parameter, 240
- SPC, Science Programme Committee, 194, 198
- SR, Spin Reference Koordinatensystem, 246
- SRT, Spezielle Relativitätstheorie, 140
- SS, Slow Shock, 147
- SSA, Space Situational Awareness, 180
- SSBW, Small Signal Bandwidth, 220
- SSC, Satellite Situation Center, 243
- SSC, Sudden Storm Commencement, 181
- SSN, Sonnenfleckenanzahl, solar sunspot number, 164
- SSPA, Solid-State Power Amplifier, 53
- SST, Sea Surface Temperature, 153
- SST, Space Surveillance and Tracking, 178, 180
- SST, Swedish Solar Telescope, 161
- Stabius-Stöberer, Johannes Stabius-Stöberer, 104
- STAFF, Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation experiment, 197, 201
- Stampfl, Rudolf A. Stampfl, 190
- STB, Solar Terrestrische Beziehung, 176, 178, 180
- Štefan, Jožef Štefan, Josef Stefan, 83
- Sterneck, Robert Daublebsky von Sterneck, 153
- STP, Solar Terrestrial Probes, 191
- Strauß, Johann Baptist Strauß (Sohn), 209
- STSP, Solar Terrestrial Science Programme, 194
- Størmer, Carl Størmer, 104
- Suess, Hans Eduard Suess, 150, 155
- Sunthaym, Ladislaus Sunthaym, 104
- SVD, Singular Value Decomposition, 128
- SWE, Space Situational Awareness Space Weather, 180
- SZ, Sunyaev Zel'dovich Effekt, 94, 98, 102
- Székely, Angelika Székely, 153
- TAI, International Atomic Time, 246
- TandEM, Titan and Enceladus Mission, 1, 53, 55, 57, 58, 61
- TC, Telekommando, 5, 18, 180, 214
- TD, Tangential Discontinuity, 147, 169
- TDE, Tidal Disruption Event, 180
- TDE, Time Delay Estimation, 54
- TEC, Total Electron Content, 34, 46–48, 173
- Tedesko, Anton Tedesko, 192
- TGF, Terrestrial  $\gamma$ -ray Flash, 180
- THD, Total Harmonic Distortion, 220, 221
- Themis, Time History of Events and their Macroscopic Interactions during Substorms, 191, 196, 245
- Thirring, Hans Thirring, 71, 82
- THOR, Turbulence Heating Observer, 192
- TID, Total Ionizing Dose, Gesamtionisierungs-Dosis, 213, 214
- Tieffenthaler, Joseph Tieffenthaler, 105
- Tirenberger, Karl Tirenberger, 182
- TIROS, Television and InfraRed Observation Satellite, 190
- TLM, Transmission Line Method, 51, 173
- TM, Telemetrie, 5, 180, 203
- TMR, Triple Modular Redundancy, 217
- TOA, Time Of Arrival, 212
- TOV, Tolman Oppenheimer Volkov, 148
- TS, Terminierungsschock, 170–172
- TSI, Total Solar Irradiance, 162, 164
- TSP, Termination Shock Particle, 171
- TSSM, Titan Saturn System Mission, 2, 53, 61
- TUE, Total Unadjusted Error, 221
- TWT, Traveling Wave Tube, 53
- UHECR, Ultra High Energy Cosmic Rays, 116, 186
- ULF, Ultra Low Frequency, 31, 34, 36, 41, 46, 47, 49, 186
- Ulinski, Franz Abdon Ulinski, 22
- Unger, Franz Joseph Andreas Nicolaus Unger, 158
- Ungerböck, Gottfried Ungerböck, 54
- UPS, Unterbrechungsfreie Stromversorgung, 217
- URSI, International Union of Radio Science, 173
- USGS, United States Geological Survey, 46
- UTC, Koordinierte Weltzeit, Coordinated Universal Time, 18
- Vögelin, Johannes Vögelin, 130
- VAB, Vehicle Assembly Building, 192
- Van Allen, James A. Van Allen, 186
- Vermeer, Jan Vermeer van Delft, 62
- Vinci, Leonardo da Vinci, 62
- Vischer, Georg Matthäus Vischer, 105
- VLF, Very Low Frequency, Längstwelle, 1, 31, 34–39, 41, 42, 113, 187
- VLSI, Very Large Scale Integration, 219
- VLT, Very Large Telescope, 74, 75
- VMC, Visual Monitoring Camera, 203
- Vonbun, Friedrich O. Vonbun, 190

- Vries, Hessel de Vries, 155
- Wambacher, Hertha Wambacher, 184
- WBD, Wide Band Data instrument, 197
- WCA, Worst Case Analysis, 218
- WDMAM, World Digital Magnetic Anomaly Map, 123
- Weber, Ernst Weber, 54
- WEC, Wave Experiment Consortium, 197
- Wegener, Alfred Wegener, 152
- Weisskopf, Victor Frederick Weisskopf, 134
- Weizenböck, Roland Weizenböck, 141
- Weizsäcker, Carl Friedrich von Weizsäcker, 147
- Weyprecht, Carl Weyprecht, 124, 182, 189
- WHISPER, Waves of High frequency and Sounder for Probing Electron density by Relaxation experiment, 197
- Widmanstätten, Alois von Widmanstätten, 178
- Wilczek, Hans (Johann Nepomuk) Graf Wilczek, 189
- Winkler, Gernot Maria Rudolph Winkler, 190
- Wittgenstein, Ludwig Josef Johann Wittgenstein, iii, 134
- WL, Weak Lensing, 75, 98
- WMAP, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 64
- WNM, Warm Neutral Medium, 112
- Ygl, Warmund Ygl, 104
- Zach, Franz Xaver Freiherr von Zach, 130
- ZAMG, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 124, 153
- Zeeman, Pieter Zeeman, 109
- Zeiller, Martin Zeiller, 105, 124
- Zwicky, Fritz Zwicky, 92

# Literaturverzeichnis

- [Alfvén, 1981] Alfvén, H. (1981). *Cosmic Plasma*, volume 82. Astrophysics and Space Science Library, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- [Andrewes, 2000] Andrewes, W. (2000). Finding space on earth: The quest for longitude 1500-1800. *Frequency Control Symposium and Exhibition, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International*, pages 3–6.
- [arXiv, 2017] arXiv (as of 2017). *arXiv.org*. Preprint-Server.
- [Astafyeva et al., 2013] Astafyeva, E., Shalimov, S., Olshanskaya, E., and Lognonn, P. (2013). Ionospheric response to earthquakes of different magnitudes: Larger quakes perturb the ionosphere stronger and longer. *Geophysical Research Letters*, 40(9):1675–1681.
- [Aydogar et al., 1994] Aydogar, Ö., Jernej, I., Schwingenschuh, K., Riedler, W., Thomlinson, J., Balogh, A., Beek, T., Serpell, E., Carr, C., Larbie, H., Acuna, M., and Musmann, G. (1994). 16-Bit Analog to Digital Converter for Space Missions, CLUSTER, MARS 94/96 and CASSINI. Technical report, IWF-PD9407/FGM01, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz.
- [Balogh et al., 1997] Balogh, A., Dunlop, M. W., Cowley, S. W. H., Southwood, D. J., Thomlinson, J. G., Glassmeier, K. H., Musmann, G., Luhr, H., Buchert, S., Acuna, M. H., Fairfield, D. H., Slavin, J. A., Riedler, W., Schwingenschuh, K., and Kivelson, M. G. (1997). The Cluster Magnetic Field Investigation. *Space Science Reviews*, 79:65–91.
- [Bartelmann and Schneider, 2001] Bartelmann, M. and Schneider, P. (2001). Weak gravitational lensing. *Physics Reports*, 340:291–472.
- [Baumjohann and Treumann, 1996] Baumjohann, W. and Treumann, R. A. (1996). *Basic Space Plasma Physics*. Imperial College Press, London, UK, ISBN 1-86094-017-X.
- [Begall et al., 2008] Begall, S., Červený, J., Neef, J., Oldřich, V., and Burda, H. (2008). Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *PNAS*, 105(36):13451–13455.
- [Belcher, 1973] Belcher, J. W. (1973). A variation of the Davis-Smith method for in-flight determination of spacecraft magnetic fields. *Journal of Geophysical Research*, 78(28):6480–6490.
- [Berciano Alba et al., 2006] Berciano Alba, A., Borges de Silva, P., Eichelberger, H., Giovacchini, F., Godolt, M., Hasinger, G., Lerchster, M., Lusset, V., Mattana, F., Mellier, Y., Michałowski, M., Monteserin-Sanchez, C., Noviello, F., Persson, C., Santovincenzo, A., Schneider, P., Zhang, M., and Östman, L. (2006). Demon: a proposal for a satellite-borne experiment to study dark matter and dark energy. volume 6266, page 626633. SPIE.
- [Berger et al., 2008] Berger, F., Besser, B. P., and Krause, R. A. (2008). *Carl Weyprecht (1838 - 1881) Seeheld, Polarforscher, Geophysiker*. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.
- [Besser, 2007] Besser, B. P. (2007). Synopsis of the historical development of Schumann resonances. *Radio Sci.*, 42(RS2S02):20.

- [Besser, 2009] Besser, B. P. (2009). *Österreichs Weg in den Weltraum*. Beauchesne, Cité du Cardinal-Lemoine, Paris, France.
- [Besser and Eichelberger, 2012] Besser, B. P. and Eichelberger, H. U. (2012). Joseph Liesganig - astronomer by education, passionate surveyor in Austrian-Hungarian Empire. volume Athen of *5th International Conference of the ESHS*,.
- [Besser et al., 2013a] Besser, B. P., Eichelberger, H. U., Meindlhumer, S., Stachel, T., Schwingenschuh, K., Stachel, M., and Prattes, G. (2013a). Die Novara-Weltumsegelung (1857-1859): Wendepunkt für Geophysik / Meteorologie / Ozeanographie in Österreich. *History of Physics, 63. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft*, pages K012D–902.
- [Besser et al., 2010a] Besser, B. P., Eichelberger, H. U., and Schwingenschuh, K. (2010a). Modelling of VLF ionospheric propagation related to earthquake events. *8th International Conference Problems of Geocosmos*.
- [Besser et al., 2016] Besser, B. P., Eichelberger, H. U., Schwingenschuh, K., and Stachel, M. (2016). Geophysical data of two Austrian (research) vessel expeditions in the 19th Century. *2nd International Conference on the History of Physics*, Pöllau.
- [Besser et al., 2015] Besser, B. P., Eichelberger, H. U., Stachel, M., Meindlhumer, S., Stachel, T., and Schwingenschuh, K. (2015). Geophysical measurements during the Novara vessel world circumnavigation from 1857 to 1859. *Geophysical Research Abstracts*, 17:EGU2015–12385.
- [Besser et al., 2009] Besser, B. P., Eichelberger, H. U., Stachel, M., and Prattes, G. (2009). Magnetic Field Measurements during the Novara Expedition (1857-1859). *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*, pages H02–FRI–P1700–1118.
- [Besser et al., 2007] Besser, B. P., Friedrich, K., and Wallner, W. (Hsg.) (2007). *Willi Riedler 75, Festschrift*. Verlag der Technischen Universität Graz, ISBN 978-3-902465-78-8.
- [Besser et al., 2012] Besser, B. P., Friedrich, K., and Wallner, W. (Hsg.) (2012). *Willi Riedler 80, Festschrift*. Verlag der Technischen Universität Graz, ISBN 978-3-85125-229-3.
- [Besser et al., 2010b] Besser, B. P., Iber, W. M., and Karner, S. (Hsg.) (2010b). *Nordberg. Der Weg in den Weltraum*. Beitragsband zu Symposium und Ausstellung in Fehring 2010, Stadtgemeinde Fehring, Graz - Fehring.
- [Besser et al., 2006] Besser, B. P., Lichtenegger, H. I. M., Eichelberger, H. U., Schwingenschuh, K., Morente, J. A., and Močnik, K. (2006). Numerical Simulation and Experimental Simulator for Extremely Low Frequency Wave Propagation in the Earth-Ionosphere Cavity: An Educational Approach. volume Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, TU Graz, Graz of *12th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*,, pages 100–103.
- [Besser et al., 2013b] Besser, B. P., Lichtenegger, H. I. M., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., and Stachel, M. (2013b). General approach to solutions of ionospheric cavity wave propagation problems. In Carrion Perez, M. C., Delgado Mora, A., Hidalgo Alvarez, R., Martin Molina, A., Olmo Reyes, F. J., Ortega Vinuesa, J. L., and Porti Duran, J., editors, *Juan Antonio Morente Chiquero: In Memoriam*, Universidad de Granada, Granada, Spain, pages 51–60.
- [Besser et al., 2008] Besser, B. P., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Magnes, W., Prattes, G., Aydogar, Ö., Jernej, I., Lichtenegger, H. I. M., Hofe, R., and Tokano, T. (2008). Acoustics of Titan's troposphere with active multi-microphone techniques. Lessons learned from the HUYGENS HASI acoustic sensor. *Outer Planet Flagship Mission Instrument Workshop*.
- [Besser et al., 2002] Besser, B. P., Schwingenschuh, K., Jernej, I., Eichelberger, H. U., Lichtenegger, H. I. M., Fulchignoni, M., Molina-Cuberos, G. J., Morente, J. A., Portí, J. A., and Salinas, A. (2002). Schumann resonances as indicators for lightning on Titan. In Lacoste, H., editor, *Exo-Astrobiology*, volume 518 of *ESA Special Publication*, pages 341–344.

- [Besser et al., 2002] Besser, B. P., Schwingenschuh, K., Lichtenegger, H. I. M., Eichelberger, H. U., Molina-Cuberos, G. J., Morente, J. A., Portí, J. A., and Salinas, A. (2002). Analytical and numerical investigations of Schumann resonances. volume Houston of *34th Scientific Assembly of COSPAR*.
- [Biagi et al., 2004] Biagi, P. F., Piccolo, R., Castellana, L., Maggipinto, T., Ermini, A., Martellucci, S., Bellecci, C., Perna, G., Capozzi, V., Molchanov, O. A., Hayakawa, M., and Ohta, K. (2004). VLF-LF radio signals collected at Bari (South Italy): a preliminary analysis on signal anomalies associated with earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(5/6):685–689.
- [Bilitza and Reinisch, 2008] Bilitza, D. and Reinisch, B. W. (2008). International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Advances in Space Research*, 42:599–609.
- [Bodenner and Will, 2003] Bodenner, J. and Will, C. M. (2003). Deflection of light to second order: A tool for illustrating principles of general relativity. *American Journal of Physics*, 71(8):770–773.
- [Bondi, 1952] Bondi, H. (1952). On spherically symmetrical accretion. *MNRAS*, 112:195–204.
- [Boudjada et al., 2015] Boudjada, M. Y., Biagi, P. F., Al-Haddad, E., Besser, B., Wolbang, D., Eichelberger, H., Galopeau, P., and Schwingenschuh, K. (2015). Remote sensing of the Earth’s ionosphere perturbations using very low frequency transmitters. *Geophysical Research Abstracts*, 17:EGU2015–12231–1.
- [Boudjada et al., 2017a] Boudjada, M. Y., Biagi, P. F., Al-Haddad, E., Galopeau, P. H. M., Besser, B., Wolbang, D., Prattes, G., Eichelberger, H., Stangl, G., Parrot, M., and Schwingenschuh, K. (2017a). Reception conditions of low frequency (LF) transmitter signals onboard DEMETER micro-satellite. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 102(Supplement C):70 – 79.
- [Boudjada et al., 2014] Boudjada, M. Y., Biagi, P. F., Sawas, S., Galopeau, P. H. M., Besser, B., Wolbang, D., Prattes, G., Eichelberger, H., Stangl, G., Parrot, M., and Schwingenschuh, K. (2014). Reception conditions of low frequency (LF) transmitter signals onboard DEMETER micro-satellite. *Geophysical Research Abstracts*, 16:EGU2014–7703.
- [Boudjada et al., 2011] Boudjada, M. Y., Biernat, H., Al-Haddad, E., Parrot, M., Schwingenschuh, K., Galopeau, P. H. M., Stangl, G., Eichelberger, H. U., Besser, B. P., and Voller, W. (2011). VLF remote sounding of the upper and lower ionosphere above seismic regions. *2nd International DEMETER Workshop*, Paris.
- [Boudjada et al., 2016] Boudjada, M. Y., Sawas, S., Galopeau, P. H. M., Eichelberger, H., and Schwingenschuh, K. (2016). LF radio wave propagation at equatorial regions. *Geophysical Research Abstracts*, 18:EGU2016–6914.
- [Boudjada et al., 2008] Boudjada, M. Y., Schwingenschuh, K., Biernat, H. K., Berthelier, J. J., Blecki, J., Parrot, M., Stachel, M., Aydogar, O., Stangl, G., and Weingrill, J. (2008). Similar behaviors of natural ELF/VLF ionospheric emissions and transmitter signals over seismic Adriatic regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(6):1229–1236.
- [Boudjada et al., 2009] Boudjada, M. Y., Schwingenschuh, K., Biernat, H. K., Berthelier, J. J., Parrot, M., Blecki, J., Galopeau, P. H. M., Eichelberger, H. U., Stachel, M., and Aydogar, Ö. (2009). Flux density variations of hiss and chorus ionospheric components observed before and after earthquake occurrences. *Geophysical Research Abstracts*, 11:EGU2009–4065.
- [Boudjada et al., 2017b] Boudjada, M. Y., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Rozhnoi, A., Besser, B., Biagi, P. F., Magnes, W., Lammer, H., and Stachel, M. (2017b). Investigation of VLF and LF transmitter signals prior to earthquakes in Italy and in Greece recorded in the year 2016. *Geophysical Research Abstracts*, 19:EGU2017–12338.

- [Carr et al., 2006] Carr, C., Brown, P., Zhang, T. L., Aydogar, Ö., Magnes, W., Auster, U., Balogh, A., Beek, T., Eichelberger, H., Fornaçon, K.-H., Georgescu, E., Gloag, J., Liao, H., Ludlam, M., Nakamura, R., O'Brien, H., Oddy, T., and Richter, I. (2006). The Double Star magnetic field investigation: Overview of instrument performance and initial results. *Advances in Space Research*, 38:1828–1833.
- [Carr et al., 2005] Carr, C., Brown, P., Zhang, T. L., Gloag, J., Horbury, T., Lucek, E., Magnes, W., O'Brien, H., Oddy, T., Auster, U., Austin, P., Aydogar, Ö., Balogh, A., Baumjohann, W., Beek, T., Eichelberger, H., Fornaçon, K.-H., Georgescu, E., Glassmeier, K.-H., Ludlam, M., Nakamura, R., and Richter, I. (2005). The Double Star magnetic field investigation: instrument design, performance and highlights of the first year's observations. *Annales Geophysicae*, 23:2713–2732.
- [Chapman, 1970] Chapman, S. (1970). Auroral Physics. *ARA&A*, 8:61–86.
- [Chemoul et al., 2001] Chemoul, B., Louaas, E., Roux, P., Schmitt, D., and Pourcher, M. (2001). Ariane 5 flight environments. *Acta Astronautica*, 48:275–285.
- [Davis et al., 1985] Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., and Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry - Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20:1593–1607.
- [Davis Jr. and Smith, 1968] Davis Jr., L. and Smith, E. J. (1968). The in-flight determination of spacecraft field zeros. *Eos Trans. AGU*, 49 (257).
- [Demon Team, 2005] Demon Team (2005). Dark Energy Dark Matter Workshop. Graz.
- [Dow et al., 2004] Dow, J., Matussi, S., Mugellesi Dow, R., Schmidt, M., and Warhaut, M. (2004). The implementation of the cluster II constellation. *Acta Astronautica*, 54:657–669.
- [ECSS, 2008a] ECSS (2008a). Space engineering, Electromagnetic compatibility. Technical report, ECSS-E-ST-20-07C, ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands.
- [ECSS, 2008b] ECSS (2008b). Space engineering, Reference coordinate system. Technical report, ECSS-E-ST-10-09C, ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands.
- [Eichelberger, 2007a] Eichelberger, H. (2007a). Cluster Mission. *AK Weltraumforschung, Seminar*, talk.
- [Eichelberger, 2008] Eichelberger, H. (2008). Kosmologie, Status 2008. *AK Weltraumforschung, Seminar*, talk.
- [Eichelberger et al., 2016a] Eichelberger, H., Fremuth, G., Prattes, G., Kürbisch, C., Laky, G., Giner, F., Neukirchner, S., Wallner, R., Jeszenszky, H., Leichtfried, M., Berthelie, J. J., Torkar, K., and Lichtenegger, H. I. M. (2016a). BepiColombo-MPO-SERENA-PICAM EMC measurements. In *2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC)*, pages 1–4.
- [Eichelberger et al., 2012a] Eichelberger, H., Prattes, G., Fremuth, G., Giner, F., Jeszenszky, H., Kürbisch, C., Leichtfried, M., and Torkar, K. (2012a). EMC Measurements from the Instrument ASPOC Aboard Magnetospheric Multiscale (MMS) Mission. *2012 ESA Workshop on Aerospace EMC*, ESA SP-702, Venice, Italy:4.
- [Eichelberger et al., 2008] Eichelberger, H., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Aydogar, Ö., Besser, B., Jernej, I., Lammer, H., Leitgeb, E., Lichtenegger, H., Stachel, M., and Tokano, T. (2008). Space and atmospheric planetary communication links as scientific tools. *Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008. CSNDSP 2008. 6th International Symposium on*, pages 736–739.
- [Eichelberger et al., 2010] Eichelberger, H., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Jaffer, G., Aydogar, Ö., Jernej, I., Besser, B., Stachel, M., Tokano, T., and Falkner, P. (2010). Acoustic measurements of atmospheric electrical discharges for planetary probes. *Geophysical Research Abstracts*, 12:EGU2010–10589.

- [Eichelberger et al., 2011] Eichelberger, H., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Jaffer, G., Aydogar, Ö., Jernej, I., Besser, B., Stachel, M., Tokano, T., and Falkner, P. (2011). Acoustic outdoor measurements with a multi-microphone instrument for planetary atmospheres and surfaces. *Geophysical Research Abstracts*, 13:EGU2011–10002.
- [Eichelberger et al., 2010] Eichelberger, H., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Tokano, T., Jernej, I., Besser, B., and Stachel, M. (2010). Antenna design for a direct-to-earth link of a planetary deep space probe. pages 1–4.
- [Eichelberger et al., 2012b] Eichelberger, H., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Wolbang, D., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P., Maggipinto, T., Besser, B., Stachel, M., Grill, C., Zehetleitner, S., Jernej, I., and Aydogar, Ö. (2012b). Investigations of lower atmospheric trends over Europe with very low frequency wave propagation paths. In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, pages 1156–1160.
- [Eichelberger et al., 2017] Eichelberger, H., Schwingenschuh, K., Boudjada, M. Y., Besser, B. P., Wolbang, D., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., Stachel, M., Prattes, G., Aydogar, Ö., Muck, C., Grill, C., Jernej, I., Stachel, T., and Moro, F. (2017). Catalogue of x-ray solar flare induced variations in sub-ionospheric very low frequency (VLF) waveguides. *Geophysical Research Abstracts*, 19:EGU2017–13146.
- [Eichelberger et al., 2009] Eichelberger, H., Schwingenschuh, K., Prattes, G., Besser, B., Aydogar, Ö., Jernej, I., Hofe, R., Falkner, P., Tokano, T., and Simoes, F. (2009). A wave telescope concept as part of a planetary acoustic experiment. *Geophysical Research Abstracts*, 11:EGU2009–10460.
- [Eichelberger et al., 2008] Eichelberger, H., Schwingenschuh, K., Prattes, G., Besser, B., Aydogar, Ö., Jernej, I., Lichtenegger, H., Hofe, R., Falkner, P., and Tokano, T. (2008). Acoustics of planetary atmospheres with active multi-microphone techniques, probing Titan. *Geophysical Research Abstracts*, 10:EGU2008–A–09049.
- [Eichelberger et al., 2015] Eichelberger, H., Schwingenschuh, K., Wolbang, D., Besser, B. P., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., Stachel, M., Prattes, G., Boudjada, M. Y., Aydogar, Ö., Zehetleitner, S., Grill, C., and Jernej, I. (2015). Seismo-electromagnetic VLF link calibration in Europe. *Geophysical Research Abstracts*, 17:EGU2015–13580.
- [Eichelberger et al., 2016b] Eichelberger, H., Schwingenschuh, K., Wolbang, D., Besser, B. P., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., Stachel, M., Prattes, G., Boudjada, M. Y., Aydogar, Ö., Zehetleitner, S., Grill, C., and Jernej, I. (2016b). Very low frequency (VLF) measurements and theoretical study of seismo-electromagnetic phenomena. *Geophysical Research Abstracts*, 18:EGU2016–8690.
- [Eichelberger, 2003] Eichelberger, H. U. (2003). DoubleStar FGM EQM Sample Rate and Frequency Response Analysis. Technical report, DST-IWF-TR0001, IWF 2003/01, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger, 2007b] Eichelberger, H. U. (2007b). DEMON - Dark Energy and Matter Observational Nexus. Magnetometer Workshop, page 12. Klippitztörl.
- [Eichelberger et al., 2007] Eichelberger, H. U., Duma, V., Zhang, T. L., Nakamura, R., Takada, T., Aydogar, Ö., Schwingenschuh, K., Stachel, M. J., and Baumjohann, W. (2007). TC2 data de-spiking methodology. volume IWF 2007/01 of *Magnetometer Workshop*, page 15. Klippitztörl.
- [Eichelberger et al., 2000a] Eichelberger, H. U., Feldhofer, H., Schwarzl, H., and Schwingenschuh, K. (2000a). Magnetic cleanliness measurements and analysis of the ROSETTA MIDAS experiment. Technical report, IWF 2000/06, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 1999a] Eichelberger, H. U., Feldhofer, H., Schwingenschuh, K., Magnes, W., Močnik, K., Aydogar, Ö., Berghofer, G., Koren, W., Scherr, A., Stachel, M., Stock, D., Jernej, I., Schwarzl, H., Zhang, T., and Riedler, W. (1999a). Sample Rate and Frequency Response Analysis of the Cluster-II

- FGM Calibration: F8. Technical report, IWF-9907, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 1999b] Eichelberger, H. U., Feldhofer, H., Schwingenschuh, K., Magnes, W., Močnik, K., Aydogar, Ö., Berghofer, G., Koren, W., Scherr, A., Stachel, M., Stock, D., Jernej, I., Schwarzl, H., Zhang, T., and Riedler, W. (1999b). Sample Rate and Frequency Response Analysis of the Cluster-II FGM Calibration: F6, F7. Technical report, IWF-9903, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 1999c] Eichelberger, H. U., Feldhofer, H., Schwingenschuh, K., Magnes, W., Močnik, K., Aydogar, Ö., Berghofer, G., Koren, W., Scherr, A., Stachel, M., Stock, D., Jernej, I., Schwarzl, H., Zhang, T., and Riedler, W. (1999c). Sample Rate and Frequency Response Analysis of the Cluster-II FGM Calibration: F9. Technical report, IWF-9913, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 2000b] Eichelberger, H. U., Feldhofer, H., Schwingenschuh, K., Magnes, W., Močnik, K., Aydogar, Ö., Berghofer, G., Koren, W., Scherr, A., Stachel, M., Stock, D., Jernej, I., Schwarzl, H., Zhang, T., and Riedler, W. (2000b). Sample Rate and Frequency Response Analysis of the Cluster-II FGM Calibration: FS. Technical report, IWF 2000/01, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 1998] Eichelberger, H. U., Kömle, N. I., and Kargl, G. (1998). Breadboard design and test results from MUPUS ANC-M experiment. Technical report, ÖAW-IWF 100, RO-MUP-IWF-ANC-PR-003, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 2011] Eichelberger, H. U., Leitgeb, E., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Biagi, P. F., Maggipinto, T., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Besser, B. P., Stachel, M., Jernej, I., and Aydogar, Ö. (2011). Remote sensing of natural and artificial variations in the earth-ionosphere cavity via very low frequency. *The 11th International Conference on Telecommunications, 2011. ConTEL 2011*, page 4.
- [Eichelberger et al., 1996a] Eichelberger, H. U., Magnes, W., Schwingenschuh, K., Berghofer, G., Feldhofer, H., Koren, W., Močnik, K., and Riedler, W. (1996a). Computerprogramme zur Bestimmung von Skalenfaktoren, Linearität und Orthogonalität eine Magnetfeldsensors. Technical report, IWF-9605, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 1996b] Eichelberger, H. U., Magnes, W., Schwingenschuh, K., Berghofer, G., Feldhofer, H., Koren, W., Močnik, K., and Riedler, W. (1996b). Datenerfassungsprogramme unter Test Point 3.0 für MAGLAB 01 und CHIMAG; Steuerprogramm für das EMC Analysegerät HP8591EM. Technical report, IWF-9606, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 2010] Eichelberger, H. U., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Tokano, T., Jernej, I., Stachel, M., Besser, B. P., and Aydogar, Ö. (2010). Data management techniques for acoustical planetary data. In *38th COSPAR Scientific Assembly*, pages B09–0014–10.
- [Eichelberger et al., 2012c] Eichelberger, H. U., Prattes, G., Schwingenschuh, K., Wolbang, D., Boudjada, M. Y., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., Maggipinto, T., Stachel, M., Jernej, I., Aydogar, Ö., and Besser, B. P. (2012c). Characterisation of very low frequency (VLF) fluctuations at the Graz receiver knot in the INFREP system. *Geophysical Research Abstracts*, 14:EGU2012–12824.
- [Eichelberger et al., 2002] Eichelberger, H. U., Schwingenschuh, K., Aydogar, Ö., and Baumjohann, W. (2002). Sample Rate and Frequency Response Analysis of Rosetta RPC-MAG. Technical report, IWF 2002/01, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 1996c] Eichelberger, H. U., Schwingenschuh, K., Berghofer, G., Feldhofer, H., Koren, W., Magnes, W., Močnik, K., Stachel, M., and Riedler, W. (1996c). HP 8591 EMC Analysegerät Systembeschreibung & Testmessungen. Technical report, IWF-9602, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.

- [Eichelberger et al., 2003] Eichelberger, H. U., Zhang, T., Magnes, W., Baumjohann, W., Nakamura, R., Schwingenschuh, K., Aydogar, Ö., Jernej, I., Koren, W., and Valavanoglou, A. (2003). DoubleStar FGM FM1 Sample Rate and Frequency Response Analysis. Technical report, DST-IWF-TR0002, IWF 2003/02, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eichelberger et al., 2004] Eichelberger, H. U., Zhang, T., Magnes, W., Baumjohann, W., Nakamura, R., Schwingenschuh, K., Aydogar, Ö., Jernej, I., Koren, W., and Valavanoglou, A. (2004). DoubleStar FGM FM2 Sample Rate and Frequency Response Analysis. Technical report, DST-IWF-TR0004, IWF 2004/01, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences.
- [Eriksson et al., 2006] Eriksson, A. I., André, M., Klecker, B., Laakso, H., Lindqvist, P.-A., Mozer, F., Paschmann, G., Pedersen, A., Quinn, J., Torbert, R., Torkar, K., and Vaith, H. (2006). Electric field measurements on Cluster: comparing the double-probe and electron drift techniques. *Annales Geophysicae*, 24:275–289.
- [ESA, 1988] ESA (1988). The Cluster Mission: Scientific and Technical Aspects of the Instruments, Sci. Coordinator R. Schmidt, Compiled by T.D. Guyenne. volume SP-1103 of *ESA Special Publication*, pages 1–103.
- [ESA, 2005] ESA (2005). Cosmic Vision: Space Science for Europe 2015-2025. *ESA Brochure*, BR-247:1–111.
- [Feldhofer, 2003] Feldhofer, H. (2003). *Advanced magnetic field cleanliness techniques for space missions with magnetic field experiments*. PhD thesis, TU-Graz.
- [Ferri and Warhaut, 1997] Ferri, P. and Warhaut, M. (1997). Cluster Mission Operations. *Space Science Reviews*, 79:475–485.
- [Fornaçon et al., 2000] Fornaçon, K.-H., Georgescu, E., and Kempen, R. (2000). Data Processing Handbook. Technical report, CL-IGM-SN-0001, IGEP/TU-BS, Braunschweig, Germany.
- [Friedrich, 2016] Friedrich, M. (2016). *Handbook of the Lower Ionosphere*. Verlag der Technischen Universität Graz, ISBN 978-3-85125-485-3.
- [Friedrich et al., 2017] Friedrich, M., Pock, C., and Torkar, K. (2017). Long-term trends in the D- and E-region based on rocket-borne measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 163(Supplement C):78 – 84.
- [Friedrich and Rapp, 2009] Friedrich, M. and Rapp, M. (2009). News from the Lower Ionosphere: A Review of Recent Developments. *Surveys in Geophysics*, 30:525–559.
- [Friedrich et al., 1998] Friedrich, M., Siskind, D., and Torkar, K. (1998). HALOE nitric oxide measurements in view of ionospheric data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60(15):1445 – 1457.
- [Friedrich and Torkar, 2001] Friedrich, M. and Torkar, K. M. (2001). FIRI: A semiempirical model of the lower ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A10):21409–21418.
- [Georgescu et al., 2006] Georgescu, E., Auster, H. U., Brown, P., Carr, C. M., Eichelberger, H., Fornaçon, K.-H., Gloag, J., and Zhang, T. L. (2006). Use of Double Star (TC-1) Magnetic Field Measurements in Multi-Spacecraft Studies. In *36th COSPAR Scientific Assembly*, volume 36 of *COSPAR, Plenary Meeting*, pages 2339–+.
- [Georgescu et al., 2008] Georgescu, E., Auster, H. U., Takada, T., Gloag, J., Eichelberger, H., Fornaçon, K.-H., Brown, P., Carr, C. M., and Zhang, T. L. (2008). Modified Gradiometer Technique Applied to Double Star (TC-1). *Advances in Space Research*, 41:1579–1584.
- [Giordano Bruno and Schultz (Hsg.), 1994] Giordano Bruno and Schultz (Hsg.), C. (1994). *Über das Unendliche, das Universum und die Welten*. Reclam, Ditzingen.

- [Gold, 1959] Gold, T. (1959). Motions in the Magnetosphere of the Earth. *Journal of Geophysical Research*, 64(9):1219–1224.
- [Goldberg et al., 1997] Goldberg, R. A., Lehmacher, G. A., Schmidlin, F. J., Fritts, D. C., Mitchell, J. D., Croskey, C. L., Friedrich, M., and Swartz, W. E. (1997). Equatorial dynamics observed by rocket, radar, and satellite during the CADRE/MALTED campaign: 1. Programmatics and small-scale fluctuations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D22):26179–26190.
- [Gopalswamy et al., 2008] Gopalswamy, N., Yashiro, S., Akiyama, S., Mäkelä, P., Xie, H., Kaiser, M., Howard, R., and Bougeret, J. (2008). Coronal mass ejections, type II radio bursts, and solar energetic particle events in the SOHO era. *Ann. Geophys*, 26:3033–3047.
- [Gunn and Peterson, 1965] Gunn, J. E. and Peterson, B. A. (1965). On the Density of Neutral Hydrogen in Intergalactic Space. *Astrophysical Journal*, 142:1633–1641.
- [Haberfellner et al., 2002] Haberfellner, Nagel, Becker, Büchel, and von Massow (2002). *Systems Engineering - Methodik und Praxis*. Orell Füssli, 11 edition.
- [Hapgood, 1992] Hapgood, M. A. (1992). Space physics coordinate transformations - A user guide. *Planetary and Space Science*, 40:711–717.
- [Hathaway, 2010] Hathaway, D. H. (2010). The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7(1).
- [Hautsalo, 2005] Hautsalo, J. (2005). Study of Aurora Related Sound and Electric Field Effects. Master's thesis, Helsinki University of Technology.
- [Hayakawa, 2011] Hayakawa, M. (2011). On the fluctuation spectra of seismo-electromagnetic phenomena. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(2):301–308.
- [Hayakawa et al., 1996] Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O. A., and Yumoto, K. (1996). Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam Earthquake of 8 August 1993. *Geophysical Research Letters*, 23(3):241–244.
- [Hodges et al., 1999] Hodges, K. E., Krebs, C. J., and Sinclair, A. R. E. (1999). Snowshoe hare demography during a cyclic population low. *Journal of Animal Ecology*, 68(3):581–594.
- [Ida et al., 2008] Ida, Y., Yang, D., Li, Q., Sun, H., and Hayakawa, M. (2008). Detection of ULF electromagnetic emissions as a precursor to an earthquake in China with an improved polarization analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(4):775–777.
- [Ishak et al., 2008] Ishak, M., Rindler, W., Dossett, J., Moldenhauer, J., and Allison, C. (2008). A new independent limit on the cosmological constant/dark energy from the relativistic bending of light by Galaxies and clusters of Galaxies. *MNRAS*, 388:1279–1283.
- [Jackson et al., 2000] Jackson, A., Jonkers, A. R. T., and Walker, M. R. (2000). Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. In *Astronomy, physics and chemistry of  $H_3^+$* , volume 358 of *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, pages 957–+.
- [Jackson, 1998] Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*. 3rd. edition, John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-30932-X.
- [Jaffer et al., 2010] Jaffer, G., Eichelberger, H. U., Koudelka, O., and Schwingenschuh, K. (2010). A lightning detector onboard Austrian nanosatellite (LiNSAT). *UN/Austria/ESA Symposium on Small Satellite Programmes for Sustainable Development: Payloads for Small Satellite Programmes*.
- [Jaffer et al., 2011] Jaffer, G., Eichelberger, H. U., Schwingenschuh, K., and Koudelka, O. (2011). *Adaptive Filtering Applications*, chapter A LEO Nano-Satellite Mission for the Detection of Lightning VHF Sferics. InTech, ISBN 978-953-307-306-4.

- [Jaffer et al., 2010] Jaffer, G., Koudelka, O., Schwingenschuh, K., and Eichelberger, H. U. (2010). A Lightning Detector Onboard Austrian Nanosatellite (LiNSAT). *AGU fall meeting, Sensing Lightning From Space: From Mission Concept to Applications*:ID:AE21A–0256.
- [Jaffer et al., 2008] Jaffer, G., Koudelka, O., Unterberger, M., Valavanoglou, N., Schwingenschuh, K., and Eichelberger, H. (2008). The detection of sferics by a nano-satellite. In *Proceedings of the International Astronautical Congress 2008*, International Astronautical Federation, page 6.
- [Jefferys, 1999] Jefferys, W. H. (1999). Calibration of the Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensors: An Application of Seminal Ideas of H. K. Eichhorn. In Dvorak, R., Haupt, H. F., and Wodnar, K., editors, *Modern Astrometry and Astrodynamics*, page 53.
- [Jernej et al., 1991] Jernej, I., Aydogar, Ö., and Schwingenschuh, K. (1991). Dynamische A/D Converter test. Technical report, IWF-9103, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz.
- [Jetzl et al., 2005] Jetzl, I., Amerstorfer, U., Haslinger, C., Cristea, E., Flock, B., Kaufmann, E., Delva, M., Nischelwitzer-Fennes, U., Neukirchner, S., Nakamura, R., Zehetleitner, S., and Grill, C. (2005). Die schönsten Seiten des IWF. In Eichelberger, H., editor, *Der Kalender 2005/06*, volume IWF 2005/01 of *int. Rep.*, page 32.
- [Joyce, 1996] Joyce, J. (1996). *Ulysses*. Suhrkamp, Taschenbuch 2551, vorliegende Ausgabe erstmals erschienen 1975 als Band 3.1 und 3.2, p. 990.
- [Khan et al., 2012] Khan, M. S., Muhammad, S. S., Awan, M. S., Kvicera, V., Grabner, M., and Leitgeb, E. (2012). Further results on fog modeling for terrestrial free-space optical links. *Optical Engineering*, 51(3):031207–1–10.
- [Krebs et al., 2001] Krebs, C. J., Boonstra, R., Boutin, S., and Sinclair, A. R. E. (2001). What drives the 10-year cycle of snowshoe hares? *BioScience*, 51(1):25–35.
- [Larmor, 1919] Larmor, J. (1919). How could a Rotating Body such as the Sun become a Magnet? *Rep. of the 87 meeting of the Brit. Assoc. for the advancement of science*, 87:159–160.
- [Ledinegg, 1982] Ledinegg, E. (1982). VLF mode conversion at terminator taking into account earth's curvature. *Radio Science*, 17(05):879–887.
- [Leinweber, 2011] Leinweber, H. K. (2011). *In-flight Calibration of Space-borne Magnetometers*. PhD thesis, TU-Graz.
- [Leinweber et al., 2008] Leinweber, H. K., Russell, C. T., Torkar, K., Zhang, T. L., and Angelopoulos, V. (2008). An advanced approach to finding magnetometer zero levels in the interplanetary magnetic field. *Measurement Science and Technology*, 19(5):055104 (15pp).
- [Leitgeb and Plank, 2015] Leitgeb, E. and Plank, T. (2015). Combination of Free Space Optics (FSO) and RF for different wireless application scenarios. In *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 1–4.
- [Lerchster and Eichelberger, 2007] Lerchster, M. and Eichelberger, H.-U. (2007). DEMON - Projektstudie zur Beantwortung von Struktur und Aufbau des Universums. *Space Day 2007*, invited talk.
- [Lichtenegger, 1993] Lichtenegger, H. (1993). Grundlagenprobleme der Physik; Werfen uns die Fixsterne aus der Bahn? oder Das Rätsel der Trägheit; Eine kurze Einführung für Ingenieure reiferen Alters.
- [Linder, 2008] Linder, E. V. (2008). Resource Letter DEAU-1: Dark energy and the accelerating universe. *American Journal of Physics*, 76(3):197–204.
- [Living Reviews, 2017] Living Reviews (as of 2017). *livingreviews.org*. Springer.
- [Magnes, 1999] Magnes, W. (1999). *Ground-Station Magnetometer Network CHIMAG in the Frame of the Chinese MERIDIAN Project*. PhD thesis, TU-Graz.

- [Mellier, 1999] Mellier, Y. (1999). Probing the universe with weak lensing. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 37:127–189.
- [Mohr et al., 2016] Mohr, P. J., Newell, D. B., and Taylor, B. N. (2016). Codata recommended values of the fundamental physical constants: 2014. *Rev. Mod. Phys.*, 88:035009.
- [Molchanov et al., 2006] Molchanov, O., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Akentieva, O., Berthelier, J. J., Parrot, M., Lefeuvre, F., Biagi, P. F., Castellana, L., and Hayakawa, M. (2006). Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(5):745–753.
- [Molchanov and Hayakawa, 2008] Molchanov, O. A. and Hayakawa, M. (2008). *Seismo-Electromagnetics and Related Phenomena: History and latest results*. Terrapub, Tokyo.
- [Molina-Cuberos et al., 2003] Molina-Cuberos, G. J., Morente, J. A., Portí, J. A., Salinas, A., Schwingenschuh, K., Lichtenegger, H. I. M., Besser, B. P., Eichelberger, H. U., and Margineda, J. (2003). Schumann resonances on Mars: Numerical simulations. volume Nice of *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*.
- [Molina-Cuberos et al., 2002] Molina-Cuberos, G. J., Morente, J. A., Portí, J. A., Schwingenschuh, K., Besser, B. P., Lichtenegger, H. I. M., Eichelberger, H. U., and Salinas, A. (2002). A study of planetary ionospheric cavity using the TLM numerical method: Schumann resonances. volume Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, TU Graz, Graz of *10th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, pages 89–93.
- [Molina-Cuberos et al., 2004] Molina-Cuberos, G. J., Portí, J., Besser, B. P., Morente, J. A., Margineda, J., Lichtenegger, H. I. M., Salinas, A., Schwingenschuh, K., and Eichelberger, H. U. (2004). Schumann resonances and electromagnetic transparency in the atmosphere of Titan. *Advances in Space Research*, 33:2309–2313.
- [Morente et al., 2002] Morente, J. A., Molina-Cuberos, G. J., Portí, J. A., Schwingenschuh, K., Besser, B. P., Lichtenegger, H. I. M., Eichelberger, H. U., and Salinas, A. (2002). Schumann resonances and electromagnetic transparency in the atmosphere of Titan. volume Houston of *34th Scientific Assembly of COSPAR*.
- [Morente et al., 2003] Morente, J. A., Portí, J. A., Salinas, A., Molina-Cuberos, G. J., Margineda, J., Schwingenschuh, K., Besser, B. P., Lichtenegger, H. I. M., and Eichelberger, H. U. (2003). Sounding Mars by Schumann resonances and electromagnetic transparency. volume Granada of *Mars Atmosphere Modelling and Observations*.
- [Morente et al., 2004] Morente, J. A., Schwingenschuh, K., Jernej, I., Eichelberger, H. U., Lichtenegger, H. I. M., Besser, B. P., Molina-Cuberos, G. J., Lopez-Moreno, J. J., Hamelin, M., and Colombatti et al., G. (2004). ELF waves on Titan - Lessons from a Huygens terrestrial balloon flight. volume Paris of *35th COSPAR Scientific Assembly*.
- [Muhammad et al., 2007] Muhammad, S. S., Flecker, B., Leitgeb, E., and Gebhart, M. (2007). Characterization of fog attenuation in terrestrial free space optical links. *Optical Engineering*, 46(6):066001.
- [Nakamura et al., 2002a] Nakamura, R., Baumjohann, W., Klecker, B., Balogh, A., Reme, H., Zhang, T. L., Volwerk, M., Runov, A., Eichelberger, H. U., and The Cis Team (2002a). Fast Flows During Substorm Intensifications Observed By Cluster. *EGS XXVII General Assembly, Nice, 21-26 April 2002, abstract #2072*, 27:2072–+.
- [Nakamura et al., 2002b] Nakamura, R., Baumjohann, W., Klecker, B., Bogdanova, Y., Balogh, A., Rème, H., Bosqued, J. M., Dandouras, I., Sauvaud, J. A., Glassmeier, K.-H., Kistler, L., Mouikis, C., Zhang, T. L., Eichelberger, H., and Runov, A. (2002b). Motion of the dipolarization front during a flow burst event observed by Cluster. *Geophysical Research Letters*, 29(20):200000–1.

- [Nakamura et al., 2001] Nakamura, R., Baumjohann, W., Klecker, B., Paschmann, G., Balogh, A., Reme, H., Noda, H., Zhang, T., Eichelberger, H., Bogdanova, Y., Georgescu, E., Puhl-Quinn, P., Bosqued, J. M., Dandouras, I., Sauvaud, J. A., Kistler, L., Moebius, E., Quinn, J. M., Tobert, R. B., Eliasson, L., Parks, G. K., Carlson, C. W., Korth, A., McCarthy, M., and Formisano, V. (2001). Substorm Intensifications Observed by Cluster. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pages B3+.
- [Nakamura et al., 2005a] Nakamura, R., Baumjohann, W., Zhang, T. L., Carr, C. M., Balogh, A., Fornaçon, K.-H., Georgescu, E., Rème, H., Dandouras, I., Takada, T., Volwerk, M., Asano, Y., Runov, A., Eichelberger, H., Klecker, B., Mouikis, C., Kistler, L. M., and Amm, O. (2005a). Cluster and Double Star observations of dipolarization. *Annales Geophysicae*, 23:2915–2920.
- [Nakamura et al., 2005b] Nakamura, R., Baumjohann, W., Zhang, T. L., Carr, C. M., Balogh, A., Fornaçon, K.-H., Georgescu, E., Rème, H., Dandouras, I., Takada, T., Volwerk, M., Asano, Y., Runov, A., Eichelberger, H., Klecker, B., Mouikis, C., Kistler, L. M., and Amm, O. (2005b). Cluster and Double Star observations of dipolarization. *Annales Geophysicae*, 23:2915–2920.
- [Nakamura et al., 2007] Nakamura, R., Keika, K., Baumjohann, W., Runov, A., Magnes, W., Eichelberger, H., Angelopoulos, V., McFadden, J., Carlson, C. W., Larson, D., Glassmeier, K. H., Auster, U., Fornaçon, K. H., Lucek, E. A., Carr, C. M., Amm, O., Fazakerley, A. N., Reme, H., Dandouras, I., Klecker, B., and Daly, P. (2007). Relationship between tail-current sheet activation and dayside magnetosphere. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pages A1174+.
- [Nicolussi et al., 2009] Nicolussi, K., Kaufmann, M., Melvin, T. M., van der Plicht, J., Schiefling, P., and Thurner, A. (2009). A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: a base for environmental and climatic investigations. *The Holocene*, 19(6):909–920.
- [Offermann et al., 2015] Offermann, D., Goussev, O., Kalicinsky, C., Koppmann, R., Matthes, K., Schmidt, H., Steinbrecht, W., and Wintel, J. (2015). A case study of multi-annual temperature oscillations in the atmosphere: Middle Europe. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 135(Supplement C):1 – 11.
- [Omerbegović, 1999] Omerbegović, A. (1999). Radiationhardness test of 20-bit CS5508 ADC converter. Master's thesis, TU-Graz.
- [Oort, 1932] Oort, J. H. (1932). The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 6(238):249–287.
- [Oppenheim and Schafer, 1989] Oppenheim, A. V. and Schafer, R. (1989). *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, ISBN-0-13-216771-9.
- [Oppenheimer and Volkoff, 1939] Oppenheimer, J. R. and Volkoff, G. M. (1939). On massive neutron cores. *Phys. Rev.*, 55(4):374–381.
- [Ouzounov et al., 2017] Ouzounov, D., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., Hayakawa, M., Pulnits, S., Eichelberger, H., Schwingenschuh, K., and Fedun, V. (2017). Pre-Earthquake effects in atmosphere and ionosphere revealed by satellite and VLF/LF observations. *32<sup>nd</sup> URSI 2017 General Assembly and Scientific Symposium*, Montreal, Canada:GEH 4–1.
- [Partridge and Peebles, 1967] Partridge, R. B. and Peebles, P. J. E. (1967). Are young galaxies visible? *Astrophysical Journal*, 147:868+–.
- [Paschmann and Daly, 1998] Paschmann, G. and Daly, P. E. (1998). *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*. ISSI Scientific Report, SR-001, ESA Publications Division, The Netherlands.
- [Paschmann and Daly, 2008] Paschmann, G. and Daly, P. E. (2008). *Multi-Spacecraft Analysis Methods Revisited*. ISSI Scientific Report, SR-008, ISBN 987-92-9221-937-6, ESA Publications Division, The Netherlands.

- [Planck Collaboration et al., 2016] Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., Arnaud, M., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartlett, J. G., and et al. (2016). Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys.*, 594:A13.
- [Pollinger et al., 2012] Pollinger, A., Ellmeier, M., Magnes, W., Hagen, C., Baumjohann, W., Leitgeb, E., and Lammegger, R. (2012). Enable the inherent omni-directionality of an absolute coupled dark state magnetometer for e.g. scientific space applications. In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pages 33–36.
- [Powell, 1986] Powell, R. (1986). Relative vertical positioning using ground-level transponders with the ERS-1 altimeter. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, GE-24(3):421–425.
- [Prattes et al., 2009] Prattes, G., Eichelberger, H., Schwingenschuh, K., Hofe, R., Tokano, T., Jernej, I., and Stachel, M. (2009). Akustische Messungen für zukünftige Untersuchungen des Saturnmondes Titan - Titan Saturn System Mission (TSSM). 8. *Deutsche Klimatagung*.
- [Prattes et al., 2011] Prattes, G., Eichelberger, H. U., Schwingenschuh, K., Stachel, M., Magnes, W., Boudjada, M., and Stangl, G. (2011). Ground based and satellite communication channel influences and ultra low frequency (ULF) remote sensing techniques. *The 11th International Conference on Telecommunications, 2011. ConTEL 2011*, page 4.
- [Prattes et al., 2009] Prattes, G., Eichelberger, H. U., Stachel, M., Schwingenschuh, K., Nischelwitzer-Fennes, U., Zhang, T. L., Delva, M., Magnes, W., and Aydogar, Ö. (2009). Database Techniques for Scientific Investigations. *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*, pages 501–FRI–P1700–1054.
- [Prattes et al., 2010a] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Besser, B., Magnes, W., Stachel, M., Vellante, M., Villante, U., Nenovski, P., and the SEGMA Team (2010a). Seismo-magnetic multi-point ULF studies before the 2009 L’Aquila earthquake using the South European GeoMagnetic Array. *Geophysical Research Abstracts*, 12:EGU2010–9269–1.
- [Prattes et al., 2009] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Jernej, I., Aydogar, Ö., Georgescu, E., Fornaçon, K.-H., Fremuth, G., Torkar, K., and Stachel, M. (2009). EMC Strategies for Scientific Experiments aboard Planetary Missions and Probes. *ESA Workshop on Aerospace EMC*, page 6.
- [Prattes et al., 2011a] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Stachel, M., Magnes, W., Vellante, M., Villante, U., and Nenovski, P. (2011a). Epicenter location determination by an ULF magnetic field polarization technique analyzing the 2009 L’Aquila earthquake. *Geophysical Research Abstracts*, 13:EGU2011–10107.
- [Prattes et al., 2010b] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Stachel, M., Magnes, W., Vellante, M., Villante, U., Nenovski, P., and Westergom, V. (2010b). Signal Processing of Ultra Low Frequency (ULF) magnetic field data related to seismic activity in Europe during 2008 and 2009. In *ISRSSP’10, 2nd International Symposium on Radio Systems and Space Plasma*, pages 109–112.
- [Prattes et al., 2011b] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Boudjada, M. Y., Biagi, P. F., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Besser, B. P., Stachel, M., Jernej, I., Berghofer, G., Magnes, W., Wolbang, D., Nenovski, P., Villante, U., and Vellante, M. (2011b). Ground based ULF and VLF seismoelectromagnetic investigations in Europe. *2nd International DEMETER Workshop*, Paris.
- [Prattes et al., 2012a] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Magnes, W., Berghofer, G., Stachel, M., Besser, B., Wolbang, D., Vellante, M., Villante, U., and Nenovski, P. (2012a). The influence of manmade noise and geomagnetic fluctuations on seismo-magnetic signatures. *Geophysical Research Abstracts*, 14:EGU2012–4609.
- [Prattes et al., 2011] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Magnes, W., Boudjada, M., Stachel, M., Vellante, M., Villante, U., Westergom, V., and Nenovski, P. (2011). Ultra low frequency (ULF) European multi station magnetic field analysis before and during the 2009 earthquake at L’Aquila

- regarding regional geotechnical information. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7):1959–1968.
- [Prattes et al., 2012b] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Magnes, W., Boudjada, M., Stachel, M., Vellante, M., Villante, U., Wesztergom, V., and Nenovski, P. (2012b). Reply to Masci’s comment on ”Ultra Low Frequency (ULF) European multi station magnetic field analysis before and during the 2009 earthquake at L’Aquila regarding regional geotechnical information” by Prattes et al. (2011). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5):1721–1722.
- [Prattes et al., 2008] Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Magnes, W., Boudjada, M., Stachel, M., Vellante, M., Wesztergom, V., and Nenovski, P. (2008). Multi-point ground-based ULF magnetic field observations in Europe during seismic active periods in 2004 and 2005. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(3):501–507.
- [Press and Schechter, 1974] Press, W. H. and Schechter, P. (1974). Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation. *Astrophysical Journal*, 187:425–438.
- [Réfrégier, 2003] Réfrégier, A. (2003). Weak gravitational lensing by large-scale structure. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 41:645–668.
- [Riedler, 1966] Riedler, W. (1966). *Messung der Energiespektren und Winkelverteilung von Elektronen im Nordlicht*. PhD thesis, philosophische Fakultät, Universität Wien.
- [Roberts and Glatzmaier, 2000] Roberts, P. H. and Glatzmaier, G. A. (2000). Geodynamo theory and simulations. *Reviews of Modern Physics*, 72(4):1081–1123.
- [Rozhnoi et al., 2005] Rozhnoi, A. A., Solovieva, M. S., Molchanov, O. A., Hayakawa, M., Maekawa, S., and Biagi, P. F. (2005). Anomalies of LF signal during seismic activity in November-December 2004. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(5):657–660.
- [Runov et al., 2003] Runov, A., Nakamura, R., Baumjohann, W., Zhang, T. L., Volwerk, M., Eichelberger, H.-U., and Balogh, A. (2003). Cluster observation of a bifurcated current sheet. *Geophysical Research Letters*, 30(2):020000–1.
- [Salpeter, 2002] Salpeter, E. (2002). A generalist looks back. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 40:1+.
- [Salpeter, 1952] Salpeter, E. E. (1952). Nuclear reactions in the stars. i. proton-proton chain. *Phys. Rev.*, 88(3):547–553.
- [Schechter, 1976] Schechter, P. (1976). An analytic expression for the luminosity function for galaxies. *Astrophysical Journal*, 203:297–306.
- [Schein, 1985] Schein, E. H. (1985). *Organizational Culture and Leadership*. Jossey-Bass, 1st edition.
- [Schlaich, 1993] Schlaich, J. (1993). Sie bauen und forschen: Bauingenieure und ihr Werk – Anton Tedesko. *Beton- und Stahlbetonbau*, 88(5):137–146.
- [Schmid et al., 2016] Schmid, D., Nakamura, R., Volwerk, M., Plaschke, F., Narita, Y., Baumjohann, W., Magnes, W., Fischer, D., Eichelberger, H. U., Torbert, R. B., Russell, C. T., Strangeway, R. J., Leinweber, H. K., Le, G., Bromund, K. R., Anderson, B. J., Slavin, J. A., and Kepko, E. L. (2016). A comparative study of dipolarization fronts at MMS and Cluster. *Geophys. Res. Lett.*, 43:6012–6019.
- [Schmidt, 1993] Schmidt, R. (1993). Foreword. In Burke, W. R., editor, *Cluster: Mission, Payload and Supporting Activities*, volume 1159 of *ESA Special Publication*, pages 1–+.
- [Schmidt, 1994] Schmidt, R. (1994). *Electric and magnetic field measurements in space and the need for active control of the electrostatic potential of a spacecraft*. Habilitation, Technische Universität Graz.
- [Schmidt et al., 1997] Schmidt, R., Escoubet, P., and Schwartz, S. (1997). The Cluster Science Data System (CSDS) – a new approach to the distribution of scientific data. *Space Science Reviews*, 79:557–582.

- [Schneider, 2006] Schneider, P. (2006). *Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3-540-25832-9.
- [Schwarzl, 2001] Schwarzl, H. (2001). Development of a MATLAB toolbox for analysis of planetary and interplanetary magnetic fields. Master's thesis, TU-Graz.
- [Schwingenschuh et al., 2009a] Schwingenschuh, K., Boudjada, M., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Molchanov, O., Stachel, M., Prattes, G., Aydogar, Ö., Eichelberger, H. U., Besser, B., Močnik, K., Stangl, G., Biernat, H., Lammer, H., Weingrill, J., and Biagi, P. F. (2009a). The Graz seismo-electromagnetic VLF facility. *Geophysical Research Abstracts*, 11:EGU2009–9670.
- [Schwingenschuh et al., 2010a] Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Prattes, G., Besser, B. P., Simoes, F., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Molchanov, O., Friedrich, M., Stangl, G., Boudjada, M. Y., Biernat, H., Döllner, R., Biagi, P. F., and Nenovski, P. (2010a). Sub-ionospheric and trans-ionospheric VLF wave propagations and its relation to seismo-electromagnetic phenomena. In *ISRSSP'10*, 2nd International Symposium on Radio Systems and Space Plasma, pages 113–116.
- [Schwingenschuh et al., 2012a] Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Besser, B. P., Prattes, G., Boudjada, M. Y., Stangl, G., Wolbang, D., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., Friedrich, M., Biernat, H., and Hayakawa, M. (2012a). Atmospheric and ionospheric electrical parameter variations inferred from sub-ionospheric seismo-electromagnetic VLF/LF observations. *Geophysical Research Abstracts*, 14:EGU2012–8013.
- [Schwingenschuh et al., 2014] Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Wolbang, D., Prattes, G., Besser, B. P., Boudjada, M. Y., Stangl, G., Magnes, W., Berghofer, G., Aydogar, Ö., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Vellante, M., Villante, U., and Biagi, P. F. (2014). Combined ULF and VLF observations of seismo-electro-magnetic phenomena in Europe. *Geophysical Research Abstracts*, 16:EGU2014–13438–1.
- [Schwingenschuh et al., 2008a] Schwingenschuh, K., Lichtenegger, H., Simoes, F., Tokano, T., Hofe, R., Besser, B., Eichelberger, H., Jaffer, G., Macher, W., and Jernej, I. (2008a). Electric discharges in the lower atmosphere of Titan: HUYGENS acoustic and electric observations. *COSPAR-08*, (3661):B03–0009–08.
- [Schwingenschuh et al., 2002] Schwingenschuh, K., Lichtenegger, H. I. M., Menvielle, M., Hamelin, M., Magnes, W., Jernej, I., Eichelberger, H. U., Kolb, C., Lammer, H., Musmann, G., Zambelli, W., and Molina-Cuberos, G. J. (2002). Investigations of water on Mars using NetLander electric and magnetic experiments. In Lacoste, H., editor, *Exo-Astrobiology*, volume 518 of *ESA Special Publication*, pages 559–560.
- [Schwingenschuh et al., 2016] Schwingenschuh, K., Magnes, W., Xuhui, S., Wang, J., Pollinger, A., Hagen, C., Lammegger, R., Ellmeier, M., Prattes, G., Eichelberger, H. U., Wolbang, D., Boudjada, M. Y., Besser, B. P., Rozhnoi, A. A., and Zhang, T. (2016). Study of earthquakes and related phenomena using a satellite scalar magnetometer. *Geophysical Research Abstracts*, 18:EGU2016–8448.
- [Schwingenschuh et al., 2017] Schwingenschuh, K., Magnes, W., Xuhui, S., Wang, J., Pollinger, A., Hagen, C., Lammegger, R., Ellmeier, M., Prattes, G., Eichelberger, H. U., Wolbang, D., Boudjada, M. Y., Besser, B. P., Rozhnoi, A. A., Zhang, T., Delva, M., Jernej, I., and Aydogar, Ö. (2017). Seismo-magnetic observations aboard the upcoming Chinese CSES satellite. *Geophysical Research Abstracts*, 19:EGU2017–14944.
- [Schwingenschuh et al., 2015] Schwingenschuh, K., Magnes, W., Xuhui, S., Wang, J., Pollinger, A., Hagen, C., Prattes, G., Eichelberger, H. U., Wolbang, D., Boudjada, M. Y., Besser, B. P., Rozhnoi, A. A., and Zhang, T. (2015). Satellite-borne study of seismic phenomena by low frequency magnetic field observations. *Geophysical Research Abstracts*, 17:EGU2015–13812.
- [Schwingenschuh et al., 2000] Schwingenschuh, K., Magnes, W., Zhang, T. L., Berghofer, G., Koren, W., Riedler, W., Mocnik, K., Ottacher, H., Stachel, M., Scherr, A., Zhao, H., Zhou, G. C., Wang, D. J., Chen, S. W., Le, G., Means, J., Greer, W., Pierce, D., Snare, B., and Russell, C. T. (2000). Low Latitude

- Magnetometer Chain in China in the Frame of the Meridian Project. *Advances in Space Research*, 25:1353–1356.
- [Schwingenschuh et al., 2001] Schwingenschuh, K., Molina-Cuberos, G. J., Eichelberger, H. U., Torkar, K., Friedrich, M., Grard, R., Falkner, P., López-Moreno, J. J., and Rodrigo, R. (2001). Propagation of electromagnetic waves in the lower ionosphere of Titan. *Advances in Space Research*, 28:1505–1510.
- [Schwingenschuh et al., 2011] Schwingenschuh, K., Prattes, G., Besser, B. P., Močnik, K., Stachel, M., Aydogar, Ö., Jernej, I., Boudjada, M. Y., Stangl, G., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., Hayakawa, M., and Eichelberger, H. U. (2011). The Graz seismo-electromagnetic VLF facility. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(4):1121–1127.
- [Schwingenschuh et al., 2012b] Schwingenschuh, K., Prattes, G., Delva, M., Eichelberger, H. U., Berghofer, G., Magnes, W., Vellante, M., Nenovski, P., Wesztergom, V., Auster, H. U., and Fornaçon, K.-H. (2012b). 'Clean' Observations of Magnetic Field Fluctuations on Planetary Surfaces. *2012 ESA Workshop on Aerospace EMC*, ESA SP-702, Venice, Italy:4.
- [Schwingenschuh et al., 2013] Schwingenschuh, K., Prattes, G., Eichelberger, H. U., Magnes, W., Berghofer, G., Aydogar, Ö., Besser, B. P., Boudjada, M., Stangl, G., Zhang, T., Wolbang, D., Vellante, M., Villante, U., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Nenovski, P., Wesztergom, V., and Szendrői, J. (2013). The reliability of the seismo-magnetic method derived from ULF/ELF observations by the South European Geomagnetic Array (SEGMA). *Geophysical Research Abstracts*, 15:EGU2013–8975.
- [Schwingenschuh et al., 2011] Schwingenschuh, K., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Vellante, M., Villante, U., Nenovski, P., Wesztergom, V., Biagi, P. F., Prattes, G., Eichelberger, H., Besser, B. P., Magnes, W., Stachel, M., and Boudjada, M. Y. (2011). Coordinated ground-based ULF and sub-ionospheric VLF seismo-electromagnetic investigations in Europe. *Geophysical Research Abstracts*, 13:EGU2011–11007.
- [Schwingenschuh et al., 2010b] Schwingenschuh, K., Simoes, F., Rozhnoi, A., Friedrich, M., Stangl, G., Boudjada, M. Y., Besser, B. P., Eichelberger, H., Prattes, G., and Biagi, P. F. (2010b). Seismo-electromagnetic variations in the VLF/LF sub-ionospheric waveguide before, during and after the April 6, 2009 earthquake at L'Aquila. *Geophysical Research Abstracts*, 12:EGU2010–9173.
- [Schwingenschuh et al., 2008b] Schwingenschuh, K., Tokano, T., Besser, B., Jernej, I., Hofe, R., Magnes, W., Falkner, P., Brown, V., Eichelberger, H., and HASI team (2008b). Variations of acoustic parameters in the troposphere of Titan as observed by the HUYGENS HASI acoustic sensor. *Geophysical Research Abstracts*, 10:EGU2008–A–09591.
- [Schwingenschuh et al., 2010] Schwingenschuh, K., Tokano, T., Jernej, I., Eichelberger, H. U., Prattes, G., Besser, B. P., Brown, V., Hamelin, M., and PWA/HASI team (2010). Electric field transients observed by the HUYGENS probe in the atmosphere of Titan: Atmospheric electricity phenomena or artefacts? *7th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VII)*.
- [Schwingenschuh et al., 2008c] Schwingenschuh, K., Tokano, T., Lichtenegger, H. I. M., Jernej, I., Besser, B., Eichelberger, H., Macher, W., and Lammer, H. (2008c). Electrical discharges in the lower atmosphere of Titan and related nonlinear phenomena. *International Symposium Topical Problems Of Nonlinear Wave physics*, (Nizhny Novgorod).
- [Schwingenschuh et al., 2009b] Schwingenschuh, K., Villante, U., Vellante, M., De Lauretis, M., Francia, P., Piancatelli, A., Pietropaolo, E., Meloni, A., Palangio, P., Prattes, G., Boudjada, M., Magnes, W., Eichelberger, H., Zhang, T. L., Nenovski, P., and Rozhnoi, A. (2009b). The April 6, 2009 Earthquake at L'Aquila: A preliminary seismo-magnetic analysis of multipoint ground-based magnetic field measurements. *AGU fall meeting*, Natural Hazards (NH):ID:717182.
- [Simonyi, 1989] Simonyi, K. (1989). *Theoretische Elektrotechnik*. 9. Auflage, Deutscher Verlag der Wissenschaften, ISBN 3-326-00045-6.

- [Sinclair and Gosline, 1997] Sinclair, A. R. E. and Gosline, J. M. (1997). Solar Activity and Mammal Cycles in the Northern Hemisphere. *American Naturalist*, 149(4):776–784.
- [Sinclair et al., 1993] Sinclair, A. R. E., Gosline, J. M., Holdsworth, G., Krebs, C. J., Boutin, S., Smith, J. N. M., Boonstra, R., and Dale, M. (1993). Can the solar cycle and climate synchronize the snowshoe hare cycle in Canada? Evidence from tree rings and ice cores. *American Naturalist*, 141(2):173–198.
- [Solovieva et al., 2015] Solovieva, M., Rozhnoi, A., Levin, B., Fedun, V., Hayakawa, M., Schwingenschuh, K., and Eichelberger, H. U. (2015). Analysis of the lower ionospheric perturbations: Application to natural hazard risk assessment. *26th IUGG General Assembly*, Prag.
- [Special Issue Icarus, 2004] Special Issue Icarus (2004). The Deep Space 1 encounter with Comet 19P/Borelly. *Icarus*, 167:135.
- [Stachel, 2005] Stachel, M. (2005). Identifikation von Verbesserungspotentialen in einer bestehenden Knowledge Base und Implementierung von Optimierungsmaßnahmen. Master's thesis, TU-Graz.
- [Stangl et al., 2011] Stangl, G., Boudjada, M. Y., Biagi, P. F., Krauss, S., Maier, A., Schwingenschuh, K., Al-Haddad, E., Parrot, M., and Voller, W. (2011). Investigation of TEC and VLF space measurements associated to L'Aquila (Italy) earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(4):1019–1024.
- [Stern, 2002] Stern, D. P. (2002). A millenium of geomagnetism. *Reviews of Geophysics*, 40 (3):1007–+.
- [Stock et al., 2014] Stock, K. F., Heilingner, R., and Stock, M. (550 p., 2014). *Personalbibliographien österreichischer Astronomen, Chemiker, Geodäten, Geologen, Mathematiker und Physiker*. Verlag der Technischen Universität Graz.
- [Terzian and Bilson, (Eds.), 1982] Terzian, Y. and Bilson, (Eds.), E. M. (1982). *Cosmology and astrophysics - Essays in honor of Thomas Gold*. Cornell University Press, Ithaca and London.
- [Teubenbacher et al., 2013] Teubenbacher, R., Nakamura, R., Giner, L., Plaschke, F., Baumjohann, W., Magnes, W., Eichelberger, H., Steller, M., and Torbert, R. (2013). Magnetic field gradients inferred from multi-point measurements of Cluster FGM and EDI. *Geophysical Research Abstracts*, 15:EGU2013–10287.
- [Thomas and Weiss, 2004] Thomas, J. H. and Weiss, N. O. (2004). Fine Structure in Sunspots. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 42:517–548.
- [Torkar, 1998] Torkar, K. (1998). *Aktive Plasmaexperimente in der Magnetosphären- und Ionosphärenforschung*. Habilitation, Technische Universität Graz.
- [Torkar et al., 2005a] Torkar, K., Fehringner, M., Escoubet, C. P., André, M., Pedersen, A., Svenes, K. R., and Décréau, P. M. E. (2005a). Analysis of Cluster spacecraft potential during active control. *Advances in Space Research*, 36:1922–1927.
- [Torkar et al., 2014] Torkar, K., Nakamura, R., Tajmar, M., Scharlemann, C., Jeszenszky, H., Laky, G., Fremuth, G., Escoubet, C., and Svenes, K. (2014). Active spacecraft potential control investigation. *Space Science Reviews*, pages 1–30.
- [Torkar et al., 2005b] Torkar, K., Svenes, K. R., Fazakerley, A., Szita, S., Rème, H., Dandouras, I., Fehringner, M., Escoubet, C. P., and André, M. (2005b). Improvement of plasma measurements onboard Cluster due to spacecraft potential control. *Advances in Space Research*, 36:1951–1957.
- [Torkar et al., 2012] Torkar, K., Tajmar, M., Escoubet, C. P., and Svenes, K. (2012). Active Spacecraft Potential Control for the Magnetospheric Multiscale Mission. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40:394–401.
- [Voigt, 1988] Voigt, H. H. (1988). *Abriß der Astronomie*. 4. Auflage, BI Wissenschaftsverlag, Mannheim/Wien/Zürich, ISBN 3-411-03148-4.

- [Voit, 2005] Voit, G. M. (2005). Tracing cosmic evolution with clusters of galaxies. *Reviews of Modern Physics*, 77(1):207–258.
- [Volwerk et al., 2004] Volwerk, M., Baumjohann, W., Glassmeier, K., Nakamura, R., Zhang, T., Runov, A., Vörös, Z., Klecker, B., Treumann, R., Bogdanova, Y., Eichelberger, H., Balogh, A., and Rème, H. (2004). Compressional waves in the Earth's neutral sheet. *Annales Geophysicae*, 22:303–315.
- [Volwerk et al., 2005a] Volwerk, M., Zhang, T. L., Nakamura, R., Runov, A., Baumjohann, W., Auster, U., Takada, T., Eichelberger, H., Carr, C. M., Balogh, A., Klecker, B., and Rème, H. (2005a). Coordinated Cluster and Double Star Observations of a Plasma Flow Channel with ULF Waves. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pages B369+.
- [Volwerk et al., 2005b] Volwerk, M., Zhang, T. L., Nakamura, R., Runov, A., Baumjohann, W., Glassmeier, K.-H., Takada, T., Eichelberger, H. U., Carr, C. M., Balogh, A., Klecker, B., and Rème, H. (2005b). Plasma flow channels with ULF waves observed by Cluster and Double Star. *Annales Geophysicae*, 23:2929–2935.
- [Vörös et al., 2003a] Vörös, Z., Baumjohann, W., Nakamura, R., Runov, A., Zhang, T. L., Volwerk, M., Eichelberger, H. U., Balogh, A., Horbury, T. S., Glaßmeier, K.-H., Klecker, B., and Rème, H. (2003a). Multi-scale magnetic field intermittence in the plasma sheet. *Annales Geophysicae*, 21:1955–1964.
- [Vörös et al., 2004] Vörös, Z., Baumjohann, W., Nakamura, R., Volwerk, M., Runov, A., Zhang, T. L., Eichelberger, H. U., Treumann, R., Georgescu, E., Balogh, A., Klecker, B., and Rème, H. (2004). Magnetic turbulence in the plasma sheet. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 109(A18):11215+.
- [Vörös et al., 2003b] Vörös, Z., Nakamura, R., Baumjohann, W., Runov, A., Zhang, T. L., Volwerk, M., Eichelberger, H. U., Balogh, A., and Horbury, T. S. (2003b). Multifractal and wavelet analysis of magnetic turbulence in the plasma sheet. *EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 - 11 April 2003, abstract #3720*, pages 3720+.
- [Waelenke and Arnold, 2005] Waelenke, H. and Arnold, J. R. (2005). Hans E. Suess, December 16, 1909 - September 10, 1993. *Biographical Memoirs, National Academy of Sciences*, 87:20.
- [Widrow, 2002] Widrow, L. M. (2002). Origin of galactic and extragalactic magnetic fields. *Rev. Mod. Phys.*, 74(3):775–823.
- [Will, 1988] Will, C. M. (1988). Henry Cavendish, Johann von Soldner, and the deflection of light. *American Journal of Physics*, 56(5):413–415.
- [Wolbang et al., 2014] Wolbang, D., Biernat, H., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Prattes, G., Besser, B., Boudjada, M., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., and Friedrich, M. (2014). VLF study of low magnitude Earthquakes ( $4.5 < M < 5.6$ ) in south/eastern Europe in the period 2011-2013. *Geophysical Research Abstracts*, 16:EGU2014–484.
- [Wolbang et al., 2012] Wolbang, D., Biernat, H., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Prattes, G., Besser, B., Boudjada, M. Y., Rozhnoi, A., Solovieva, M., and Biagi, P. F. (2012). Seismo electro-magnetic parameter study of sub-ionospheric VLF radio links in Europe. *Geophysical Research Abstracts*, 14:EGU2012–761.
- [Wolbang et al., 2013] Wolbang, D., Biernat, H., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Prattes, G., Besser, B., Boudjada, M. Y., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., and Friedrich, M. (2013). Comparative statistical and spectral studies of seismic and non-seismic sub-ionospheric VLF anomalies. *Geophysical Research Abstracts*, 15:EGU2013–653.
- [Wolbang et al., 2014] Wolbang, D., Biernat, H. K., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H., Prattes, G., Besser, B. P., Boudjada, M. Y., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Biagi, P. F., and Friedrich, M. (2014). Coordinated study of non-seismic and weak seismic events ( $M < 5$ ) using VLF radio links. *COSPAR-14*, pages C0.4–0031–14.

- [Wolbang, 2014] Wolbang, D. A. (2014). Seismo-electromagnetic parameter study of sub-ionospheric VLF radio links in Europe. Master's thesis, Karl-Franzens-Universität Graz.
- [Zhang et al., 2006] Zhang, T. L., Baumjohann, W., Nakamura, R., Runov, A., Volwerk, M., Asano, Y., Vörös, Z., Eichelberger, H.-U., Sergeev, V., Shi, J. K., and Balogh, A. (2006). A statistical survey of the magnetotail current sheet. *Advances in Space Research*, 38:1834–1837.
- [Zhang et al., 2004] Zhang, T. L., Baumjohann, W., Nakamura, R., Runov, A., Volwerk, M., Vörös, Z., Eichelberger, H.-U., Sergeev, V., and Balogh, A. (2004). A statistical survey of the neutral sheet. In *35th COSPAR Scientific Assembly*, volume 35 of *COSPAR, Plenary Meeting*, pages 1099–+.
- [Zhang et al., 2002] Zhang, T. L., Baumjohann, W., Nakamura, R., Volwerk, M., Balogh, A., Glassmeier, K.-H., Eichelberger, H.-U., and Schwingenschuh, K. (2002). Structures of The Neutral Sheet Observed By Cluster. *EGS XXVII General Assembly, Nice, 21-26 April 2002, abstract #5815*, 27:5815–+.
- [Zhang et al., 2005a] Zhang, T. L., Nakamura, R., Volwerk, M., Runov, A., Baumjohann, W., Eichelberger, H. U., Carr, C., Balogh, A., Sergeev, V., Shi, J. K., and Fornaçon, K.-H. (2005a). Double Star/Cluster observation of neutral sheet oscillations on 5 August 2004. *Annales Geophysicae*, 23:2909–2914.
- [Zhang et al., 2005b] Zhang, T. L., Nakamura, R., Volwerk, M., Runov, A., Baumjohann, W., Eichelberger, H. U., Carr, C., Balogh, A., Sergeev, V., Shi, J. K., and Fornaçon, K.-H. (2005b). Double Star/Cluster observation of neutral sheet oscillations on 5 August 2004. *Annales Geophysicae*, 23:2909–2914.
- [Zwicky, 1933] Zwicky, F. (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6:110–127.
- [Zwicky, 1937] Zwicky, F. (1937). On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *Astrophysical Journal*, 86:217–+.

# Tabellenverzeichnis

1.1	Matrix Mehrpunkt-Projekte und Atmosphären-Messungen	3
2.1	Operative Bereiche für das Fluxgate-Magnetometer	5
2.2	Magnetfeldvektoren in der Telemetrie des Satelliten	5
2.3	Spannungskanäle zum Test der ADC Platine	7
2.4	ADC Platinen Statistik	12
2.5	Bereiche und Auflösung der DoubleStar Magnetometer	16
2.6	DoubleStar TC2 Despiking Parameter	18
2.7	Abtastrate und Bandbreite Rosetta RPC-Mag	20
2.8	Rosetta RPC-Mag Science und Housekeeping Moden	20
3.1	Energieverteilung PICAM/BepiColombo QM Simulation	25
4.1	ULF / VLF / LF Empfangsstationen	41
4.2	VLF Sendestationen	42
4.3	Nicht-seismische Einflüsse	50
A.1	Magnetfelder von Galaxien und großräumigen Strukturen	108
A.2	Standardmodell Kräfte und Träger der Wechselwirkung, Bosonen	133
A.3	Standardmodell Leptonen, Quarks	133
A.4	Standardmodell Mesonen, Baryonen	133
A.5	Adiabatische Invarianten	145
A.6	Charakteristische Plasmagrößen	146
A.7	Plasma Parameter und Zahlenwert-Darstellungen	146
A.8	Mittlere Sonnenwind Parameter bei 1 AU	167
A.9	Erdoberfläche und Atmosphärenschichten	174
A.10	Mikro- vs. Makroskopische-Parameter – Wellenausbreitung	175
A.11	Auswirkungen von solaren Phänomenen auf die Erde	178
A.12	Grundlagenmission vs. angewandte Mission	180
A.13	Nutzlast der Cluster Satelliten	195
A.14	Cluster S/C Telemetrie Moden	203
A.15	Ergänzungen zur Cluster Mission	203
B.1	EMV Geräte und Meßeinrichtungen	205
B.2	Physikalische Parameter von Blitzen in Mitteleuropa	210
B.3	Verteilungsfunktionen der Ausfallraten und Funktionsfähigkeit	218
C.1	Cluster FGM Abtastraten	223
C.2	Dateinamenstruktur für die Kalibration	223
C.3	Fitparameter für die digitale Frequenzanalyse	226
C.4	Digitale Frequenzantwort, Datenbankeinträge	236
C.5	Frequenzgang Approximation Burst / Normal Mode und Filterkorrektur	238
C.6	Frequenzgang Cluster FGM – Dateien und Software	238

C.7 Koordinatensysteme für Weltraum-Missionen . . . . .	246
C.8 Techniken der Datenanalyse für Cluster . . . . .	247
C.9 Curlometer-Technik, Berechnung der db-Files . . . . .	247
C.10 Physikalische Konstanten . . . . .	252

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Zeitstruktur der Arbeiten bei Projekten und Missionen	2
2.1	Blockdiagramm FGM	4
2.2	ADC Board Ober- und Unterseite	7
2.3	Setup für die ADC-Platinen Tests	8
2.4	Flugmodell F8 auf Testplatine	8
2.5	Test der Clusterplatine	9
2.6	Platine in der Temperatorkammer	10
2.7	Cluster FGM ADC-Board Testergebnisse	11
2.8	Cluster FGM Amplitudengang, Abtastrate und Phasenverschiebung bis 1 kHz	13
2.9	DoubleStar FGM ADC Datenflußdiagramm	14
2.10	DSP TC1 SAD Sprünge, $\Delta$ IB OB, Korrektur, TC1 10.04.2004, TC2 18.08.2004, GSE	15
2.11	DSP TC2 Despiking Blockdiagramm Gradiometer Methode	16
2.12	DoubleStar TC2 2004-08-18, 2100-2400, OB und IB By, PP, GSE Daten	17
2.13	DoubleStar Datenflußdiagramm	19
2.14	Rosetta Mission Zeitachse	20
2.15	Rosetta RPC-Mag Datenflußdiagramm	21
2.16	Rosetta RPC-Mag Bandbreite, 22000 nT und 500 nT Kalibrierfelder	22
2.17	Dynamisches Spektrum von Rosetta RPC-Mag OB- und IB Daten	23
3.1	PICAM/BepiColombo QM Simulation	25
3.2	PICAM/BepiColombo QM Simulation Resultate	26
3.3	EMV Messungen PICAM/BepiColombo QM	27
3.4	PICAM/BepiColombo FM02	28
3.5	EMV Messung am Experiment MAREMF, Mars-96	29
3.6	EMV Messungen ASPOC/MMS EQM	30
4.1	VLF Spektrum Victor Franz Hess Forschungszentrum, IWF, Graz	32
4.2	Globale & Europäische ULF/VLF/LF Stationen zur Untersuchung von SEM Phänomenen	34
4.3	VLF Anlage, Komponenten und Schaltplan	35
4.4	VLF Empfangssignale 05. April 2009 und 06. Oktober 2009	36
4.5	VLF Empfangssignale DHO-GRZ für 1 Jahr	37
4.6	VLF Antennensystem	38
4.7	VLF Verstärker Oloid-Ummantelung und Dachaufbau	38
4.8	VLF Messungen, solare Ly $\alpha$ Strahlung und atmosphärische Parameter	39
4.9	VLF Amplituden für 8 Links, 01.11.2009 bis 31.05.2016	40
4.10	VLF Variation bei X-class Solar Flare Ereignissen	43
4.11	X-ray Solar Flare vs. VLF Amplituden Variation	44
4.12	Solar Flare Statistik	45
4.13	SEM Koppelmechanismen	49
4.14	Messung der Schumann Frequenzen am Modell	52
4.15	Schumann Frequenzen und Variation der Eigenfrequenz	52

5.1	TandEM / TSSM Weltraumsegment	53
5.2	TandEM / TSSM Ballonphase in der Titanatmosphäre	54
5.3	TandEM / TSSM Konfiguration und Ballonstudie	55
5.4	TandEM Montgolfière Akustik, 3R's Kommunikation	55
5.5	TandEM akustisches Instrument	57
5.6	Terrestrische akustische Außenmessungen	58
5.7	TandEM Multi-Mikrophon Instrument ACU	58
5.8	Fernerkundung von Wechselwirkungen im äußeren Sonnensystem	59
6.1	Sternennacht, V. van Gogh; Sinnierender Mann und Wasserwirbel, L. da Vinci	63
A.1	Ab-initio Grafik Kosmologie und Weltraumforschung	66
A.2	Antikythera Mechanismus	67
A.3	Astrolabium mit Alhidade	68
A.4	Johannes Kepler Inschriften und Denkmäler in Graz	70
A.5	Münze Österreich, Kosmologie & Mikrokosmos	71
A.6	Gravitationslinsen-System	79
A.7	Magnetismus Betrachtungsweisen	103
A.8	Chinesischer Kompaß, Modell Si Nan, Han Dynastie	104
A.9	IGRF12 Magnetfeldwerte	122
A.10	Fregatte SMS Novara und Lamont'scher Theodolit	124
A.11	Magnetische Messungen der Novara Expedition (1857 – 1859)	125
A.12	Totale Sonnenfinsternis vom 11. August 1999 über Graz	151
A.13	Winterlandschaft, Aert van der Neer	154
A.14	Solar-Terrestrische Beziehung	176
A.15	Magnetosphäre der Erde	177
A.16	Solar-Terrestrische Auswirkungen, erweitertes Schichtenmodell	179
A.17	Aurora Borealis, Frederic Edwin Church, künstlerische Darstellung	182
A.18	Magnetischer Sturm Index Dst und Magnetfeld vor dem Sturm	183
A.19	Magnetischer Sturm Index Dst und Magnetfeld während des Sturms	183
A.20	Funkenkammer, kosmische Strahlung	185
A.21	Erdefunkstelle und Koralm-Radar	193
A.22	Tetraederförmige Konfiguration der 4 Cluster S/C und ASPOC Instrument	197
A.23	Cluster S/C in offener Ansicht	200
A.24	Cluster S/C Boom	201
A.25	Start zweier Cluster-Satelliten in Baikonur, Juli & August 2000	202
B.1	Allgemeines Schema der EMV	206
B.2	EMV Messungen leitungsgebundene Emissionen – Signalleitung	207
B.3	Gedenktafel anlässlich eines Blitzeinschlages	209
B.4	Akustische Messung, Entladung mit / ohne Durchschlag	211
B.5	DS1 Magnetometer Bread Board Modell und Rosetta RPC-Mag Platine	215
B.6	Crystal CS5508 AD-Umsetzer und Chipansicht	215
C.1	Cluster FGM ADC Datenflußdiagramm	227
C.2	Spulensystem in Magnetsrode – Bodenkalibration	228
C.3	Kalibrations-Setup für die Frequenzanalyse	229
C.4	Meßanlage für die Bodenkalibration	229
C.5	The nominal three (to William of Ockham), Dan Flavin, 1963; mumok Wien	231
C.6	Cluster FGM digitale Frequenzanalyse	234
C.7	Kompensationssystem für den Frequenzgang	235
C.8	Datenflußdiagramm zur Rekonstruktion des Filters	236
C.9	Amplitudengang Outboard Normal- und Burst-Mode	237
C.10	Filter Eingangs- und Ausgangssignale im Normal Mode	239

C.11 Filter Eingangs- und Ausgangssignale im Burst Mode . . . . .	239
C.12 Dynamische Spektren mit schmalbandigen Störungen . . . . .	241
C.13 DoubleStar TC2 Event Kalibration . . . . .	242
C.14 Cluster FGM Tail Homepage . . . . .	244
C.15 Cluster vs. DoubleStar Daten . . . . .	249
C.16 Zertifikate . . . . .	250