



BSc Thomas HALBEDL

Messung von Gleichströmen am Sternpunkt von Drehstromtransformatoren im Höchstspannungsnetz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Elektrotechnik-Wirtschaft

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig RENNENR

Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz

Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg ACHLEITNER

Austrian Power Grid AG



Graz / Mai - 2014

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner für seine hervorragende Betreuung der Masterarbeit bedanken. Er gab mir stets interessante Anregungen und war immer um Problemlösungen bemüht.

Eine gleichwertige Dankbarkeit möchte ich auch an Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Achleitner seitens der Austrian Power Grid AG aussprechen. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Zudem hat er sich als treibende Kraft, Mentor und Organisator mit hervorragenden Impulsen zu dieser wissenschaftliche Studie eingebracht.

Ein weiterer Dank auch an alle Kollegen und Mitarbeiter am Institut für Elektrische Anlagen an der Technischen Universität Graz für ihre tatkräftige Unterstützung. Auch an die Mitarbeiter der Austrian Power Grid AG, insbesondere jene in den Umspannwerken, möchte ich mich bedanken.

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 Masterarbeit identisch.

AFFIDAVIT

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

Die Behandlung von Sternpunkten ist ein wichtiges Thema für den Schutz und Netzbetreiber von Übertragungsnetzen. Die starre Erdung der 400kV-Höchstspannungsebene wird über den Transformatorsternpunkt realisiert. Wegen dieser starren Erdung von Transformatoren, können Erdströme in das System eintreten. Moderne Transformatoren sind so ausgelegt, dass sie nur mehr sehr geringe Geräuschemissionen besitzen. Während der Inbetriebnahme eines neuen Transformators wurde ein unerwartet hoher Geräuschpegel festgestellt. Sättigungserscheinungen aufgrund von DC-Strömen bzw. sehr niederfrequenten Wechselströmen (unter 1Hz) wurden als Grund angenommen. Dies war der Anstoß für eine genauere wissenschaftliche Untersuchung.

Diese Masterarbeit beschreibt das eigens entwickelte Messsystem und zeigt die Probleme bei der Aufzeichnung von kleinen Gleichströmen bei gleichzeitigem Vorhandensein großer Wechselströme. Darüber hinaus werden die Resultate des Transformatorsternpunktstromes im österreichischen 400kV-Übertragungsnetz präsentiert und analysiert. Neben der betriebsfrequenten 50Hz-Komponente und den dazugehörigen Oberschwingungen wurden DC-Anteile bzw. sehr niederfrequente Anteile unter 1Hz, 16,7Hz-Komponenten vom Bahnstromnetz und interharmonische Komponenten detektiert.

Abstract

Neutral point treatment is a very important topic for protection and network operation. Due to the long system length 400kV-networks are operated with direct grounding of the neutral point. In transmission systems, usually at least one transformer per substation is operated with solid grounded starpoint, thus allowing earth currents to enter the transformer. Modern transformers are designed for very low noise emissions. During commissioning of a new transformer, unexpected noise was noticed and saturation due to DC currents respectively very low frequency currents (below 1Hz) was assumed to be the reason. This was the launch for a research project.

This master thesis gives a description of the measurement setup, highlighting the problem of recording small DC currents in the presence of high AC currents. Furthermore results from a neutral point current measurement in the Austrian 400kV-grid are presented and analysed, which revealed several frequency components in the spectrum including DC (or very slow variations below 1Hz), 16.7Hz from railway system, 50Hz mains, harmonics and interharmonics.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Transformator	9
2.1. Einleitung	9
2.2. Funktionsweise und Aufbau	10
2.3. Ersatzschaltbild	13
2.4. Hystereseschleife	14
2.4.1. Sättigung	15
3. Messsystem	17
3.1. Literaturrecherche	17
3.2. Eigenschaften des Messsignals	18
3.3. Anforderungen an das Messsystem	19
3.4. Komponenten des Messsystems	19
3.5. Externe Einflüsse auf das Messsystem	21
3.5.1. Höherfrequenter Wechselanteil	21
3.5.2. Magnetisches Feld	27
3.5.3. Temperaturabhängigkeit	30
3.6. Messabweichung und Fehlerabschätzung	32
3.6.1. Zufällige und systematische Messabweichung	32
3.6.2. Messunsicherheiten	33
4. Praktische Sternpunktstrommessungen	38
4.1. Installation des Messsystems	38
4.2. Messung	39
4.2.1. Versuchsmessung - UW 1	39
4.2.2. Versuchsmessung - UW 2	41
4.2.3. Wochenmessung - UW 2	41
4.3. Auswertung der Messung	42
4.3.1. Analysemethoden	43
4.3.2. Analyse des AC-Transformatorsternpunktstromes	45
4.3.3. Genauigkeit der Datenaufzeichnung vom Messsystem (Datenlogger)	51
4.3.4. Analyse des DC-Transformatorsternpunktstromes	54
4.3.5. Korrelation zwischen Erdmagnetismus und DC-Sternpunktstrom	57
5. Schlussfolgerung	65

Literaturverzeichnis	67
A. Technische Daten der Messsystemkomponenten	68
A.1. CP 30 AC/DC Stromzange, GMC-I PROSyS	68
A.2. TGPR-1001 Tinytag, Gemini Data Loggers	68
A.3. SK3107.000 Schaltschrank-Heizung, RITTAL	69
B. Labormessung	70
B.1. Verwendete Geräte für magnetische Feldmessung im Labor	70

1. Einleitung

In den österreichischen Übertragungsnetzen verwendet man ausschließlich starr geerdete Systeme. Dies bedeutet, dass zumindest ein Teil der Transformatorsternpunkte direkt mit Erde verbunden ist. Der Vorteil dieser Beschaltung liegt unter anderem in definierten Kurzschlussströmen bei Fehlern mit Erdberührung und der geringen Leiter-Erde Spannungsbeanspruchung der gesunden Leiter im Fehlerfall. Aus letzterem lässt sich eine minimale Isolationsbeanspruchung ableiten, welche vor allem von wirtschaftlichen Interesse ist.

Anstoß zu dieser Thematik kam von der Austrian Power Grid AG. Sie führte an einem neuen Transformator eine spektrale Geräuschemessung durch, da dieser erhöhte Emissionswerte im Vergleich zu der Abnahmemessung aufwies. Anhand dieser Messung wurde eindeutig festgestellt, dass nicht nur die Frequenzamplituden der geradzahligen Oberschwingungen (100Hz, 200Hz, etc.) im Geräuschespektrum, sondern vor allem die ungeradzahligen Oberschwingungen (150Hz, 250Hz, etc.) erhöhte Werte aufwiesen. Diese Tatsache ist ein Hinweis für das Vorhandensein von Gleichstrom und daraus resultierenden Sättigungserscheinungen im Magnetkreis.

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist, ein geeignetes Messsystem zu entwickeln, welches die Größenordnung der Gleichströme im Transformatorsternpunkt aufzeichnet, um diese anschließend auswerten zu können. Das Messsystem soll zudem flexibel in verschiedenen Umspannwerken einsetzbar sein.

Einführend wird im Folgenden kurz auf den Transformator eingegangen und aufgezeigt, welche Auswirkungen Gleichströme auf die Magnetkreise von Transformatoren haben.

Im darauffolgenden Kapitel werden der Aufbau und die Spezifikationen des verwendeten Messsystems beschrieben. Aus den Anforderungen an das Messsystem lassen sich die benötigten Komponenten für die Messungen ableiten. Eine große Herausforderung liegt dabei in der Beherrschung der externen Störfaktoren, die auf die einzelnen Komponenten des Messsystems und damit auf das Messergebnis wirken. Die verschiedenen Beeinflussungen werden im Labor nachgebildet und analysiert.

Im Kapitel "Praktische Sternpunktstrommessungen" wird näher erläutert, wie das Messsystem am Transformatorsternpunkt installiert wird. Mittels Versuchsmessungen, die vor Ort durchgeführt werden, wird das Messsystem für den Einsatz in der Praxis getestet. Zudem wird mit Hilfe der Signalverarbeitung ein Frequenzspektrum vom Strom

erstellt, welche die vorkommenden Frequenzen im Transformatorsternpunkt aufzeigt. Im Anschluss wird auch der Einfluss vom Erdmagnetismus auf den Sternpunktstrom im österreichischen Höchstspannungsnetz untersucht.

2. Transformator

2.1. Einleitung

In der Energietechnik verwendet man Drehstromtransformatoren, um die verschiedenen Spannungsebenen der Energieübertragung von der Höchstspannungsebene bis hin zur Niederspannungsebene miteinander verbinden zu können. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Spannungswandlung bei einspeisenden Maschinen an das Netz. Wegen der verschiedenen Anwendungen von Transformatoren werden sie, differenziert nach deren Verwendung, unterschiedlich bezeichnet. [1]

Leistungstransformatoren dienen zur Anpassung des Spannungsniveaus zwischen Erzeugung und Verteilung, *Maschinentransformatoren* zum Hochsetzen der Generatorspannung, *Netz- oder Kuppeltransformatoren* zur Kupplung von Netzen verschiedener Spannungsebenen, *Verteilungstransformatoren* zum Anschluss der Versorgungsnetze an Verteilnetze. [2]

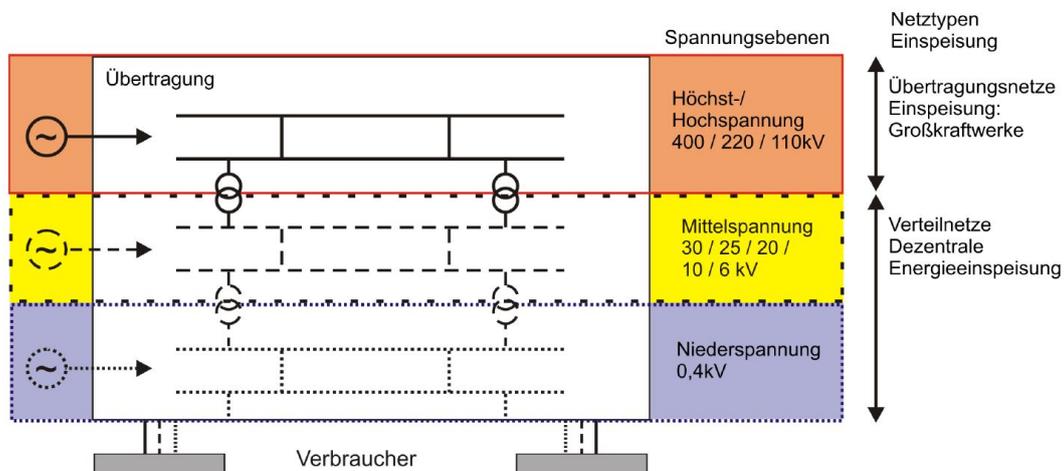


Abbildung 2.1.: Ebenen der Energieübertragung im österreichischen Netz. Die Spannungsebenen reichen von 400kV im Höchstspannungsnetz über 30kV im Mittelspannungsnetz bis hin zu 0,4kV auf der Niederspannungsebene. Quelle: [1]

2.2. Funktionsweise und Aufbau

Funktionsweise

Ein Einphasentransformator besteht im Wesentlichen aus einem Eisenkern und zwei galvanisch getrennten Wicklungen. Der Eisenkern dient zur magnetischen Kopplung beider Wicklungen, in denen der Hauptfluss ϕ fließt. Im Idealfall verlaufen die magnetischen Feldlinien ausschließlich im Eisen, welche den Hauptfluss charakterisieren. Real ergeben sich auch geringe Streuflüsse, die sich über andere Materialien wie Luft schließen und dadurch Transformationsverluste hervorrufen. Das gleiche Funktionsprinzip kann auch auf Mehrphasentransformatoren angewendet werden. Bei Transformatoren höherer Leistung wird Öl als Kühl- bzw. Isoliermaterial aufgrund des größeren Wärmeübertragungswertes und der besseren Wärmeleitfähigkeit gegenüber gasförmigen Medien bevorzugt. [2]

Aufbau

Bei der Bauform von Drehstromtransformatoren unterscheidet man zwischen Kerntyp und Manteltyp, welche Abbildung 2.2 zeigt. Die Ober- und Unterspannungswicklungen der drei Phasen befinden sich auf den Schenkeln, die durch Joche den Magnetisierungskreis schließen. Der Manteltyp besitzt, im Gegensatz zum Kerntyp, zwei weitere, wicklungsfreie Schenkel, die dem magnetischen Fluss als Rückfluss dient. Der Vorteil der Manteltyp-Bauform ist, dass dieser Transformatoraufbau eine geringere Bauhöhe aufweist. Hochleistungsdrehstromtransformatoren werden manchmal auch als Einphasenmodule geliefert. Der Vorteil des leichteren Transports übertrifft dabei den Nachteil von höheren Materialkosten. [1], [2], [3]

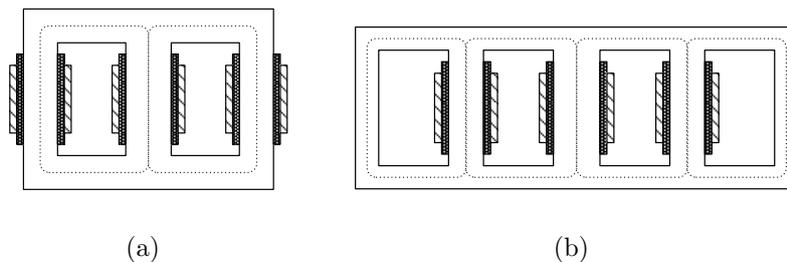


Abbildung 2.2.: Unterschiedliche Bauformen von Drehstromtransformatoren. (a) Kerntyp, 3phasig (b) Fünfschenkelmanteltyp, 3phasig. Quelle: [2]

Transformatorschaltgruppen

Die Ober- und Unterspannungswicklungen von Drehstromtransformatoren können auf 3 unterschiedliche Arten miteinander verbunden werden, welche als Schaltgruppen bezeichnet werden: Stern, Dreieck oder Zick-Zack-Schaltung. Die Schaltgruppe hat Einfluss auf: [1], [2]

- Phasenverschiebung zwischen Über- und Unterspannung
- Übersetzungsverhältnis \ddot{u}
- Art der Sternpunktbehandlung (isoliert, mittel,- oder niederohmig geerdet)
- Übertragung von Oberschwingungen

Tabelle 2.1.: Schaltarten der Wicklungen. [2]

	Oberspannung	Unterspannung
Dreieckschaltung	D	d
Sternschaltung	Y	y
Zick-Zack-Schaltung	Z	z
Offene Schaltung	III	iii

Die Schaltung der Oberspannungswicklung kennzeichnen Großbuchstaben, jene der Unterspannungswicklung Kleinbuchstaben. Ist der Sternpunkt bei Stern- oder Zick-Zack-Schaltung zugänglich, ist dies durch den Buchstaben N bzw. n vermerkt. Neben den *Kennbuchstaben* gibt die *Kennzahl* das Vielfache von 30° an, um das der Spannungszeiger dem Spannungszeiger der Oberspannung naheilt. Je nachdem, welche Schaltungskombination verwendet wird, verändert sich das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} um die Faktoren 1, $\sqrt{3}$ oder $1/\sqrt{3}$. Auf die Zick-Zack-Schaltung wird nicht näher eingegangen, weil diese keine Verwendung in der Energieversorgung findet. [2], [3]

Welche Schaltgruppe zum Einsatz kommt, hängt von den Betriebsbedingungen, Sternpunktbehandlung, etc. ab. Sternschaltungen werden bei hohen Spannungen aus Isolationsgründen bevorzugt, weil die Isolation der Wicklung nur für die Strangspannung ausgelegt werden muss. Der Nachteil ist, dass der Nullstrom nicht auf die andere Seite übertragen werden kann. Dieser Nachteil tritt bei Dreieckschaltungen nicht auf, weil die Nullströme im Kreis fließen können. [2], [3]

Schaltgruppe	Zeigerbild		Schaltungsbild		Übersetzungsverhältnis
	OS	US	OS	US	
Yy0					$\frac{w_1}{w_2}$
Dy5					$\frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}$
Yd5					$\frac{\sqrt{3}w_1}{w_2}$
Yz5					$\frac{2w_1}{\sqrt{3}w_2}$

Abbildung 2.3.: Häufig verwendete Schaltgruppen mit Zeigerbild, Schaltungsbild und Übersetzungsverhältnis ü. [2]

Bei den Transport- bzw. Verteilnetzen wird zumindest eine Seite des Transformators in Stern geschaltet und starr geerdet. Wenn das Netz unsymmetrisch belastet wird, fließt aufgrund der starren Erdung ein Ausgleichstrom über den Transformator, da die vektorielle Addition der Leiterströme nicht mehr Null ergibt. Dieser Strom wird in weiterer Folge als *Transformatorsternpunktstrom* bezeichnet.

2.3. Ersatzschaltbild

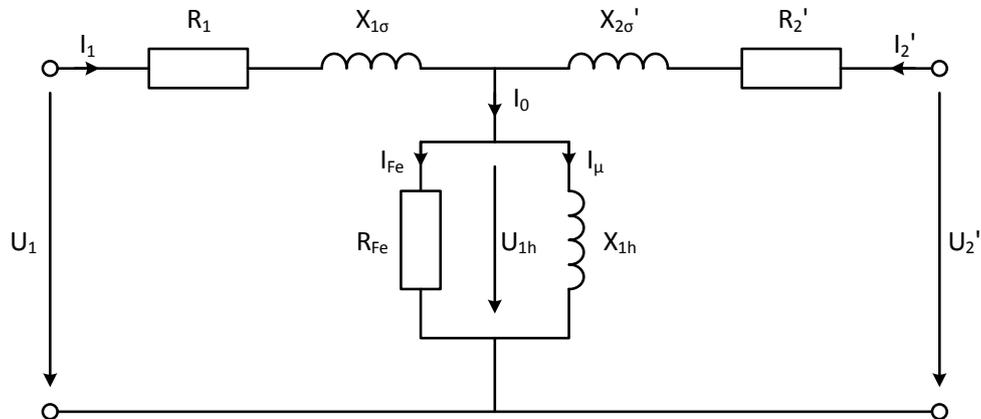


Abbildung 2.4.: Einphasiges Ersatzschaltbild eines Transformators.

I_1	Primärstrom
I_2'	Sekundärstrom
I_0	Nullstrom
I_{Fe}	Stromverluste
I_μ	Magnetisierungsstrom
R_1	Primärer Wicklungswiderstand
R_2'	Sekundärer Wicklungswiderstand
R_{Fe}	Eisenverluste
X_1	Primäre Induktivität
X_2'	Sekundäre Induktivität
X_{1h}	Hauptinduktivität
U_1	Primäre Spannung
U_2'	Sekundäre Spannung
U_{1h}	Induzierte Spannung

Die Wirkkomponente I_{Fe} spiegelt die Eisenverluste (Hysteresis- und Wirbelstromverluste) wider, die Blindkomponente I_μ dient zum Aufbau des magnetischen Flusses. [2]

Die Angaben auf der Sekundärseite beziehen sich immer auf die Primärseite und können mit dem Übersetzungsverhältnis \ddot{u} umgerechnet werden.

$$\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2} \tag{2.1}$$

$w_{1,2}$ Primäre bzw. Sekundäre Windungszahl

2.4. Hystereseschleife

Die Hystereseschleife wird über die Parameter B für die *magnetische Flussdichte* und H für die *magnetische Feldstärke* definiert, welche mittels *Permeabilität* μ ineinander umgerechnet werden können. Die *relative Permeabilität* μ_r ist von der magnetischen Feldstärke abhängig und weist daher unterschiedliche Werte auf (Materialabhängig). [4]

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu \cdot H \quad (2.2)$$

B	Magnetische Flussdichte, $[T = \frac{Vs}{m^2}]$
μ_0	Permeabilität vom luftleeren Raum, $[4\pi 10^{-7} \frac{Vs}{Am}]$
μ_r	Relative Permeabilität vom ferromagnetischen Material, dimensionslos
μ	Magnetische Permeabilität, $[\frac{Vs}{Am}]$
H	Magnetische Feldstärke, $[\frac{A}{m}]$

Die Permeabilität kann auch als magnetischer Leitwert verstanden werden und gibt an, wie gut sich das magnetische Feld im verwendeten Material ausbreitet. Für den Transformatorbau werden ferromagnetische Stoffe wie Eisen verwendet, da diese eine sehr hohe Permeabilitätszahl μ_r aufweisen. [4]

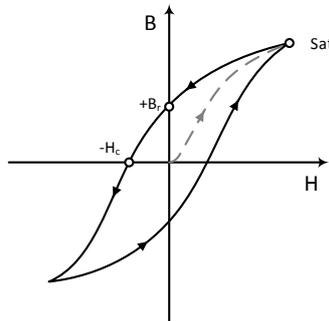


Abbildung 2.5.: Hystereseschleife eines ferromagnetischen Materials.

Sat	Sättigung
$+B_r$	Remanenz
$-H_c$	Koerzitivfeldstärke

Die grau strichlierte Linie in Abbildung 2.5 zeigt den Verlauf beim erstmaligen Magnetisieren des Eisenkerns. Ist der Eisenkern einmal vormagnetisiert, befindet man sich grundsätzlich nur mehr auf dem äußeren Kurvenverlauf. Wird der Transformator abgeschaltet bzw. ist keine magnetische Feldstärke mehr vorhanden, bleibt eine gewisse Restmanenz $\pm B_r$ vorhanden. [4]

Je schmaler die Hystereseschleife ist, desto leichter ist das Eisen zu magnetisieren und wird als weichmagnetisch bezeichnet. Bei hartmagnetischem Eisen ist die Magnetisierungskurve wesentlich breiter. [4]

2.4.1. Sättigung

Über die Magnetisierungskennlinie kann der Zusammenhang zwischen dem *magnetischen Fluss* Φ und dem *Magnetisierungsstrom* i einfach dargestellt werden.

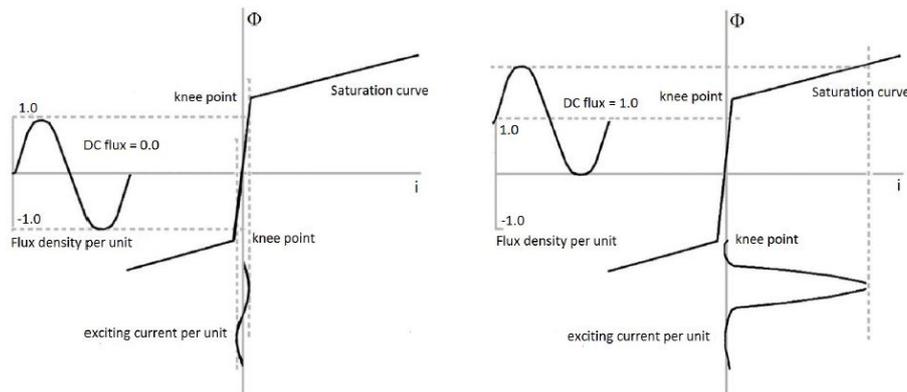


Abbildung 2.6.: Magnetisierungskennlinie eines Transformators ohne (links) und mit (rechts) Sättigungserscheinungen. Quelle: [5]

Auf der linken Seite der Abbildung 2.6 ist zu erkennen, dass der Transformator im linearen Bereich der Magnetisierungskennlinie arbeitet und dieser maximal ausgenutzt wird. Der Transformator ist so ausgelegt, dass die magnetische Flussdichte zu keiner Zeit den Knickpunkt (knee point) überragt. Verfolgt man die Amplitudenspitze der Flussdichte zum linearen Verlauf der Magnetisierungskennlinie, kann daraus der Magnetisierungsstrom (exciting current) auf der Ordinate reproduziert werden. Dieser Magnetisierungsstrom ist wesentlich geringer als der Laststrom. [5]

Im rechten Teil der Abbildung 2.6 wird die magnetische Flussdichte durch einen positiven DC-Offset nach oben verschoben. Durch diesen Offset befindet sich die positive Halbwelle der Flussdichte im Sättigungsbereich des Eisenkerns. Verfolgt man wiederum den Verlauf der Flussdichte über die Magnetisierungskennlinie und bildet den Magnetisierungsstrom ab, ergibt sich ein wesentlich höherer Betragswert als in der linken Abbildung ohne DC-Offset. Aufgrund dieser Tatsache steigt der Blindleistungsbedarf des Transformators rapide an. [5]

Auswirkungen von DC-Strömen

- **Mechanische Vibrationen, Geräusche**

Im Idealfall treten infolge des Produktes von Magnetfeld und Strömen Kräfte mit der doppelten Netzfrequenz und ganzzahligem Vielfachen der doppelten Netzfrequenz (geradzahlige Oberschwingungen) auf. Diese Kräfte führen zu Vibrationen und entsprechenden Geräuschemissionen. Bei Vorhandensein einer DC-Komponente im Feld oder Strom ergeben sich durch die Multiplikation zusätzliche Kraftkomponenten mit Netzfrequenz und ganzzahligen Vielfachen (Oberschwingungen). Es ist daher speziell ein Anstieg der ungeradzahligen Oberschwingungen im Geräuschspektrum ein Anzeichen für eine DC-Vormagnetisierung, da diese Komponenten im Normalfall nicht oder nur in sehr geringem Maß auftreten.

- **Verluste**

Es kommt zu erhöhten Wirbelströmen, die lokale Erwärmungen im Eisenkern hervorrufen und infolgedessen Wärmeverluste verursachen. Auf diese Weise verschlechtert sich der Wirkungsgrad des Transformators bzw. verringert sich die Lebensdauer wegen erhöhter thermischer Beanspruchung. [5]

- **Netzurückwirkungen**

Bei starker Sättigung kann es aufgrund der Verzerrung des Magnetisierungsstromes zu einer hohen Oberschwingungsemission kommen. [5]

3. Messsystem

In diesem Kapitel wird das verwendete Messsystem beschrieben. Dieses besteht im Prinzip aus einer Stromzange, einem Tiefpassfilter und einem Datenlogger. Zuerst werden Informationen mittels Literaturrecherche gesammelt. Danach werden die Anforderungen an das Messsystem formuliert, um daraus die benötigten Messkomponenten ableiten zu können.

Ein weiterer wichtiger Teil ist die Untersuchung von äußeren Einflüssen wie Oberschwingungen, magnetische Beeinflussung oder Temperaturabhängigkeit und deren Auswirkungen auf das Messsystem, welche in Kapitel 3.5 näher erläutert werden.

Im Anschluss daran wird veranschaulicht, welche systematischen Messfehler im System zu berücksichtigen sind. Infolgedessen wird der maximale Messfehler einzelner Komponenten sowie der Gesamtfehler der Messkette berechnet.

3.1. Literaturrecherche

Zu Beginn wird eine Literaturrecherche durchgeführt, welche Systeme für Transformatorsternpunktmessungen am Markt vorhanden sind und welche Eigenschaften und Spezifikationen diese Messsysteme besitzen. Aufbauend auf diesen Daten ergeben sich zusätzliche Anforderungen an das System. Aus dieser Auflistung lassen sich die benötigten Messkomponenten ableiten. Es zeigt sich, dass Angaben für ein praktikables Messsystem im Zusammenhang mit dem Thema "Geomagnetisch Induzierte Ströme (GIC)" vorliegen. Vor allem in den Ländern Nordamerika, Skandinavien und den nord-westlichen Teilen Russlands beschäftigt man sich über dieses Thema. Unter dem Projekt "EURISGIC" [6] findet man eine Beschreibung eines solchen Messsystems:

*"Equipment for measurements at each substation is the same and consist of the **current pincers with Hall sensor, data conversion block and data collection system**. Current pincers are installed at the grounded neutral lead of transformer. Sample of the analog signal from pincers is digitized each 100ms and after Fourier transformation transmitted to the collecting PC. Once per hour data files are transmitted to the main server in PGI by GSM modem. Time synchronization is tested before data transmission by GPS signal."*[6]

Aus der obigen Angabe lassen sich die Rahmenbedingungen für das Messsystem erarbeiten. Daraus gliedert sich das Kernstück des Messsystems: Messtechnik, Signalverarbeitung und Datenspeicherung, welches auf diese Arbeit Einfluss hat.

3.2. Eigenschaften des Messsignals

Die Schwierigkeit für das Messsystem ist, dass die Messgröße im Bereich von 0A bis 1A, die Frequenz unter 1Hz liegt und von viel höherfrequenten Störgrößen (Grundschiwingung und Oberschwingungen des Drehstromnetzes und des Bahnstromnetzes) mit bis zu zehnfacher Amplitude überlagert wird. Im Detail sind folgende Komponenten im Messsignal vorhanden:

- DC und niederfrequenter Wechselanteil
- 16,7Hz Bahnfrequenz
- 50Hz-Netzfrequenz und Oberschwingungen

Als Oberschwingungen bezeichnet man Frequenzanteile im Signalspektrum, die ein Vielfaches der Grundschiwingungsfrequenz von 50Hz darstellen. Sie entstehen durch nicht-sinusförmige Einspeisung, nichtlineare Verbraucher oder Leistungsimpedanz, Leistungselektronik, Stromrichter etc., die zu Verzerrung von Spannung und Strom führen. [7]

Aufgrund der Symmetrieeigenschaften des Signals treten in der Praxis für die Spannungsspektren die Oberschwingungen mit geraden Ordnungszahlen nicht in Erscheinung. Unter Symmetrie wird die gleiche Form von positiver und negativer Halbwelle, abgesehen vom Vorzeichen, verstanden. [7]

$$f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right) \quad (3.1)$$

T Periodendauer

In der Energieversorgung wird zwischen der Grundschiwingung, Oberschwingungen, Zwischenharmonische und Subharmonische Schwingungen unterschieden. [7]

- *Grundschiwingung* (Fundamental) sind jene bei 16,7Hz, 50Hz oder 60Hz.
- *Oberschwingungen* (Harmonics) entsprechen einem ganzzahligen Vielfachen ν der Netzfrequenzen (z.B. $\nu \cdot 50\text{Hz}$).
- *Zwischenharmonische* (Interharmonics) bezeichnen jene Signalanteile, die nicht ein ganzzahliges Vielfache der Grundschiwingung sind.
- Unter *Subharmonische* (Subharmonics) bezeichnet man Frequenzen unterhalb der Netzfrequenz.

3.3. Anforderungen an das Messsystem

Aufgrund der Tatsache, dass nur der DC- bzw. ein sehr niederfrequente Wechselanteil vom Messsystem erfasst werden soll, wird ein Filter gegen die höherfrequenten Wechselanteile (Bahnfrequenz, Netzfrequenz, Oberschwingungen) verwendet.

Das Messsystem wird im Umspannwerk direkt neben der Transformatorsternpunktterdung installiert. Diese Nähe zum Umspanner sowie zu spannungsführenden Leitungen führt dazu, dass das Messsystem einer Beeinflussung durch Magnetfelder ausgesetzt ist.

Weiters muss auf den Temperaturunterschied während der Messung geachtet werden, um nachvollziehbare Ergebnisse zu erzielen. Vor allem die Stromzangen haben einen großen Temperaturkoeffizienten, welcher die Messung beeinflusst.

Für die Aufzeichnungsdauer der Messwerte wird 1 Woche gewählt, wobei diese Grenze vom endlichen Speicher des verwendeten Datenloggers festgelegt wird. Zudem muss die vorhandene, batteriebetriebene Versorgungsspannung der Stromzange durch eine externe Stromversorgung ersetzt werden.

Zusammenfassung der wichtigsten Kriterien/Anforderungen:

- Messgröße: Gleichstrom bis niederfrequenter Wechselstrom¹ (0-1A, 0-0,05Hz)
- Filter wegen Bahn- und Netzfrequenz-Komponenten (Störgrößen)
- Auswirkung magnetischer Beeinflussung auf das Messsystem
- Temperaturabhängigkeit der Stromzangen
- Langzeitmessung: 1 Woche
- Externe Stromversorgung der Stromzange

3.4. Komponenten des Messsystems

In diesem Unterkapitel werden die Komponenten des Messsystems beschrieben. Das Messsystem besteht aus einer *Stromzange zur Signalerfassung*, einen *Tiefpassfilter gegen höherfrequenten Wechselanteil* und zwei unipolaren *Datenlogger zur Messaufzeichnung*. Da die zum Einsatz vorgesehenen Datenlogger nur positive Spannungen aufzeichnen können, werden zwei Datenlogger antiparallel geschaltet. Bei der Auswertung müssen die Messaufzeichnungen vorzeichenrichtig ausgelesen und verarbeitet werden.

¹Wird in weiterer Folge zusammenfassend als DC-Transformatorsternpunktstrom bezeichnet.

Kenndaten der Stromzange:

- Messbereich: 0 bis $\pm 30\text{A}$
- Auflösung: $\pm 1\text{mA}$
- Ausgangsempfindlichkeit: 100mV/A
- Minimale Last: $>100\text{k}\Omega$ und $< 100\text{pF}$

Kenndaten des Tiefpassfilters:

- Filterordnung: 2
- Grenzfrequenz f_g : $0,66\text{Hz}$

Kenndaten des Datenloggers:

- Speicherkapazität: 64.000 Werte
- Abtastintervall: 1s bis 10 Tage
- Messbereich: 0 bis 200mV DC
- Auflösung: $0,8\text{mV}$

Für ausführlichere Informationen zu den verwendeten Komponenten siehe Anhang A.



Abbildung 3.1.: Messsystem mit den verwendeten Komponenten: Stromzange, Tiefpassfilter, Datenlogger.

Um diese Komponenten gegen Witterungseinflüsse zu schützen, werden sie in einem mobilen *Schaltschrank* untergebracht. Dieser Schaltschrank ist mit einer Heizung ausgestattet, um die Innentemperatur annähernd konstant zu halten.

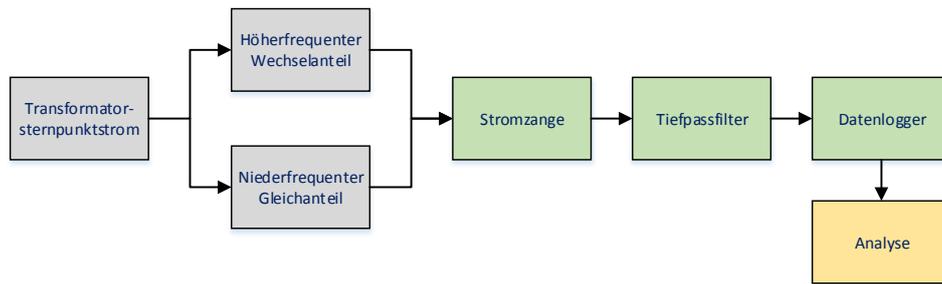


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung des Messsystems.

In Abbildung 3.2 ist der Ablauf der Messung schematisch dargestellt. Die nieder- sowie höherfrequenten Ströme werden von der Stromzange detektiert und mittels BNC-Kabel als Spannung an den Tiefpassfilter weitergegeben. Am Ausgang des Filters steht das gefilterte Signal zur Verfügung, welches vom Datenlogger erfasst wird. Die Aufzeichnung des Datenloggers dient dann für weitere Analysen, welche im Kapitel 4.3 behandelt werden.

3.5. Externe Einflüsse auf das Messsystem

Die größten physikalischen Störfaktoren, die das Messsystem ausgesetzt ist, sind neben dem höherfrequenten Wechselanteil, das magnetische Feld und der Temperatureinfluss. Daher liegt das Hauptaugenmerk auf diesen Größen. Andere Witterungseinflüsse (außer Temperatur) werden nicht näher betrachtet.

3.5.1. Höherfrequenten Wechselanteil

Am Anfang des Kapitels wird erwähnt, dass die Schwierigkeit des Messsystems darin liegt, sehr kleine niederfrequente Eingangsgrößen mit großen höherfrequenten Störgröße zu messen. Für eine sinnvolle Messung ist daher die gesuchte Eingangsgröße von der Störgröße zu trennen. Damit die höherfrequenten Wechselströme keinen Einfluss auf die Messungen haben, wird ein Tiefpassfilter zwischen Stromzange und Datenlogger verwendet.

Abtasttheorem von Shannon

Für die digitale Weiterverarbeitung eines Signals ist es unabdingbar, ein kontinuierliches Signal in zeitdiskrete Werte überzuführen. Daher wird die Signalform von einer Messeinheit mit einer bestimmten Frequenz abgetastet (Samples). Um aus diesen diskreten Werten wieder das ursprüngliche Signal generieren zu können, muss bei der Abtastung

eine definierte Frequenz verwendet werden. Dies ist unter dem Begriff *Abtasttheorem von Shannon* bekannt. [8]

$$f_{Abtast} \geq 2 \cdot f_{max} \quad (3.2)$$

f_{Abtast} Abtastfrequenz
 f_{max} Höchste Frequenz im Signal

Dieses Theorem besagt: Die Abtastfrequenz ist so zu wählen, dass sie minimal doppelt so hoch ist, wie die maximal auftretende Frequenz im Signal.

Wird mit einer zu geringen Frequenz abgetastet, kommt es zum sogenannten *Aliasing*-Effekt. Dabei kann die ursprüngliche Signalform nicht wieder hergestellt werden. Es kann sich aber bei der Wiederherstellung trotzdem eine Signalform ergeben. Dieses besitzt im ersten Anschein die gleiche Form, schwingt aber mit einer anderen Frequenz. Dadurch kann es zu Fehlinterpretationen kommen. [8]

Filter

Unter einem *passiven Filter* versteht man einen Filter der nur mit passiven Bauteilen wie Widerständen, Kondensatoren Spulen oder Quarzen realisiert wird. Die Vorteile sind ein geringes Rauschverhalten und es wird keine externe Spannungsversorgung benötigt. Als wesentlicher Nachteil ist zu erwähnen, dass sich die Ausgangsspannung bei Belastung ändert. [9]

Die *aktiven Filter* werden meist mit Hilfe von Operationsverstärker (OPV) oder auch mit Transistoren aufgebaut. Der Ausgang des Filters wird durch den Operationsverstärker gepuffert und kann daher entsprechend der Dimensionierung des OPV belastet werden, ohne dass sich die Ausgangsspannung ändert. Weiters werden sie eingesetzt, wenn bei tiefen Frequenzen die berechneten Spulen nicht mehr realisierbar (wirtschaftlich, Größe) sind. Auf der Kontra-Seite werden benötigte Versorgungsspannung sowie thermisches Rauschen (Widerstand, Verstärker) angeführt. [9]

Für diese Arbeit wird ein passiver Filter wegen der einfachen Realisierung verwendet. Das Problem der Änderung der Ausgangsspannung bei Belastung mit dem Datenlogger wurde mit einem Korrekturfaktor behoben. Offensichtlich stimmt der tatsächliche Eingangswiderstand des Datenloggers mit den Angaben im Datenblatt nicht überein. Für den Messbereich von 0mA bis 1000mA ergab sich ein annähernd linearer Verlauf des Spannungsabfalls am Filterausgang, aus dem der Korrekturwert berechnet wurde. Der Korrekturfaktor beträgt 1,15 ($\hat{=}$ Messwert + 15%).

Funktionsweise und Eigenschaften des RC-Tiefpassfilters 1. Ordnung

Frequenzen der Eingangsspannung die unterhalb der Grenzfrequenz f_g liegen, werden im Idealfall ungedämpft an den Ausgang übertragen. Grund dafür ist, dass bei niedrigen Frequenzen der Wechselstromwiderstand X_C vom Kondensator sehr hoch gegenüber dem Widerstand R ist. Der Spannungsabfall ist daher an X_C wesentlich größer als an R , was zur Folge hat, dass die Eingangsspannung auch am Ausgang anliegt. Entspricht die Frequenz genau der Grenzfrequenz f_g , wird das Signal mit $\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{=} -3dB$ gedämpft.

Ist die Frequenz höher als die Grenzfrequenz, übernimmt der frequenzabhängige Kondensator eine bedeutende Rolle. Der Wechselstromwiderstand X_C wird gegenüber R sehr klein. Dies bewirkt einen höheren Spannungsabfall an R gegenüber X_C und verursacht die Ableitung des Signals gegen Erde. Die Verminderung des Ausgangssignals wird auch als Dämpfung bezeichnet. Je größer die Frequenz, desto stärker ist die Dämpfung und desto geringer wird die Ausgangsspannung. Bei Filter 1. Ordnung beträgt die Dämpfung -20dB pro Dekade.

Übertragungsfunktion des RC-Tiefpassfilters 2. Ordnung

Für einen steileren Kennlinienabfall nach der Grenzfrequenz wird ein Filter 2. Ordnung durch Kaskadierung von zwei Filtern 1. Ordnung mit den gleichen Parameter R und C realisiert (siehe Abbildung 3.3). Dadurch erhöht sich die Dämpfung auf -40dB pro Dekade.

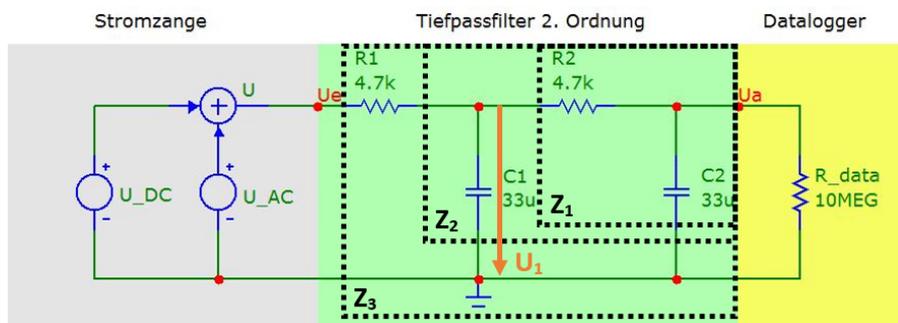


Abbildung 3.3.: Simulation eines Tiefpassfilters 2. Ordnung mit Micro-Cap. Die Eingangsspannung U am Filter ergibt sich aus dem zu messenden Gleichspannungssignal U_{DC} sowie einem höherfrequenten Störsignal U_{AC} .

Die Berechnung der Übertragungsfunktion (im unbelasteten Fall) kann entweder mittels Vierpoltheorie oder über die komplexe Rechnung erfolgen. In dieser Arbeit wird letztere Methode verwendet und näher erläutert. Die Übertragungsfunktion ist wie folgt definiert:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{U_a}{U_1} \cdot \frac{U_1}{U_e} \quad (3.3)$$

Zur Vereinfachung werden die Wirkwiderstände $R = R_1 = R_2$ und Kondensatoren $C = C_1 = C_2$ zusammengefasst. Für die zur Berechnung benötigten komplexen Impedanzen \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 und \underline{Z}_3 ergeben sich:

$$\underline{Z}_1 = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (3.4)$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{1}{\underline{Y}_2} = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}}} = \dots = \frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{2 + j\omega RC} \quad (3.5)$$

$$\underline{Z}_3 = R + \underline{Z}_2 = \dots = \frac{3R + j\omega R^2 C + \frac{1}{j\omega C}}{2 + j\omega RC} \quad (3.6)$$

Die komplexen Impedanzen können nun entsprechend der Spannungsteiler Regel eingesetzt werden.

$$\frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\underline{Z}_1} = \dots = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (3.7)$$

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_e} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \dots = \frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{3R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega R^2 C} \quad (3.8)$$

$$\frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_1} \cdot \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_e} = \dots = \frac{1}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + j3\omega RC} \quad (3.9)$$

Durch Einsetzen von $\omega_g = \frac{1}{RC}$ in die Gleichung 3.9 ergibt sich:

$$\frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2 + j3\frac{\omega}{\omega_g}} \quad \text{mit } \omega_g = \frac{1}{RC} \quad (3.10)$$

Die wesentliche Anforderung an den Filter ist die ausreichende Dämpfung der, im Vergleich zu der DC-Komponente, großen Bahnstrom- und Netzfrequenzkomponente. Um auch mit einem Filter niedriger Ordnung eine entsprechende Dämpfung erreichen zu können, wird die Grenzfrequenz vergleichsweise niedrig angesetzt. Durch Kaskadierung von zwei Filtern 1. Ordnung mit jeweils einer Grenzfrequenz von 1Hz ergibt sich ein Filter 2. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 0,66Hz. Damit ergibt sich bei 16,7Hz eine Dämpfung von -48dB bzw. bei 50Hz eine Dämpfung von -67dB. Die interessierende DC-Komponente wird praktisch ungedämpft übertragen.

Für den Kondensator wird ein Wert von $33\mu\text{F}$ gewählt. Daraus ergibt sich ein berechneter Widerstandswert für R von 4822Ω . Da dieser Wert nicht der Norm entspricht, wird der nächstliegende Bauteilwert von $4,7\text{k}\Omega$ verwendet. Die Grenzfrequenz verändert sich dadurch nur geringfügig.

Der Verstärkungsfaktor V wird mit folgender Formel berechnet:

$$V_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{U_a}{U_e} \right) \quad (3.11)$$

V_{dB}	Verstärkungsfaktor, [dB]
U_a	Ausgangsspannung, [V]
U_e	Eingangsspannung, [V]

Die Berechnung des Dämpfungsfaktors d erfolgt durch umformen der Gleichung 3.11 und ist ein Maß dafür, wie hoch die Eingangsspannung abgeschwächt wird und am Ausgang anliegt. Der Wertebereich reicht dabei von 1 bis 0. Bei $d = 1$ tritt keine Dämpfung auf (die Ausgangsspannung entspricht der Eingangsspannung). Im Gegensatz dazu bedeutet $d = 0$, dass die Ausgangsspannung Null ist.

$$d = \left(\frac{U_a}{U_e} \right) = 10^{\frac{V_{dB}}{20}} \quad (3.12)$$

Aus dem Bodediagramm (Abbildung 3.4) lässt sich der Tiefpasscharakter eindeutig herauslesen.

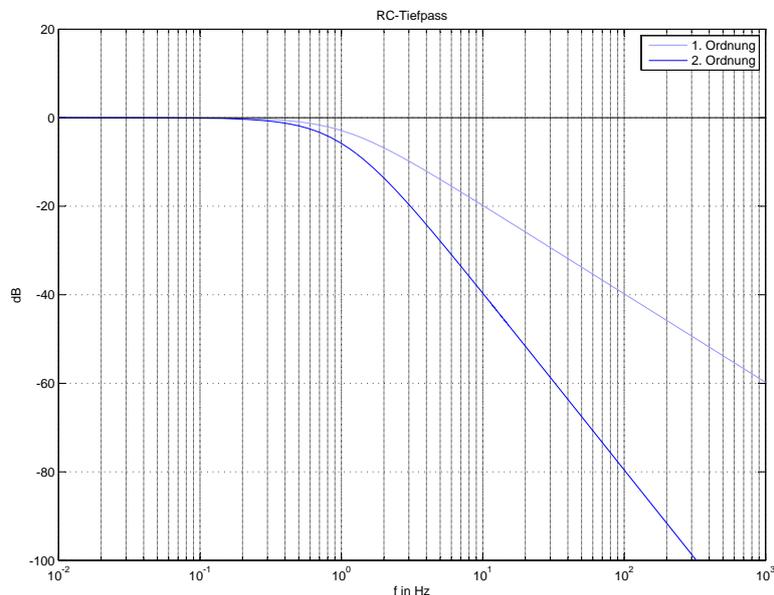


Abbildung 3.4.: Frequenzgang vom Tiefpassfilter 2. Ordnung bei einer Grenzfrequenz $f_g = 0,66\text{Hz}$ und einem Abfall der Gerade von -40dB pro Dekade

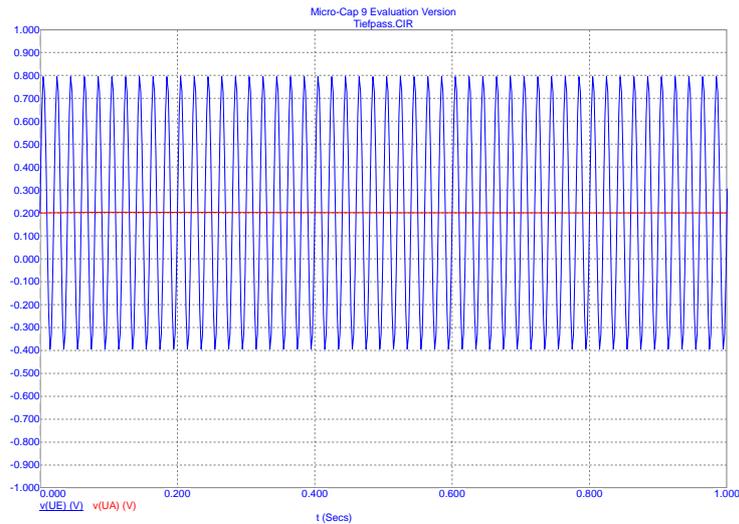


Abbildung 3.5.: Transiente Simulationsanalyse: Die zu messende Eingangsspannung UDC von 200mV (0Hz) wird mit einer Störspannung UAC von 600mV (50Hz) überlagert. Die Störspannung wird gefiltert und am Ausgang liegt nur das DC-Signal an.

Folgendes lässt sich aus der Abbildung 3.4 und Tabelle 3.1 ableiten: Die zu messenden niederfrequenten Signale werden nahezu ungedämpft an den Ausgang des Filters weitergegeben. Signale um die Grenzfrequenz von 1Hz werden mehr als 50% gedämpft. Bei der Bahnstromfrequenz gelangen nur mehr 4‰ und bei der Netzfrequenz sogar nur 0,4‰ an den Ausgang.

Tabelle 3.1.: Verstärkungsfaktor V sowie Dämpfung d vom Tiefpassfilter 2.Ordnung und Grenzfrequenz bei $f_g = 0,66\text{Hz}$. Die dB-Werte wurden aus Abbildung 3.4 entnommen.

	gemessen	berechnet
f	V	d
Hz	dB	-
0,1	-0,082	0,9906
0,3	-0,712	0,9213
1	-5,790	0,5135
2	-13,620	0,2084
10	-39,640	0,0104
16,7	-48,460	0,0038
50	-67,510	0,0004
100	-79,550	0,0001

Von Interesse ist auch die sogenannte *Ladezeitkonstante* τ vom Filter in Bezug auf die maximale Abtastung des Datenloggers. Aus der Theorie ist bekannt, dass sich die Spannung am Kondensator nicht sprunghaft ändern kann.

Die *Ladezeitkonstante* τ berechnet sich aus

$$\tau = RC \qquad \tau = 155,1ms \qquad (3.13)$$

und gibt an, wie schnell die Ausgangsspannung ihren Sollwert erreicht. Der Vorgang gleicht einer Exponentialfunktion und kann nach 5τ als abgeschlossen angesehen werden.

3.5.2. Magnetisches Feld

Um die Größenordnung des magnetischen Feldes zu kennen, in dem sich das Messsystem befindet, wurde eine Feldmessung vor Ort durchgeführt. Dabei wurde die Messsonde direkt am Messort platziert und ein breitbandiges Frequenzspektrum des magnetischen Feldes in Raumkoordinaten aufgenommen.



Abbildung 3.6.: Veranschaulichung des Messorts für spätere Feldmessungen am Transformatorsternpunkt. Die Magnetfeldmessung wurde an einem 300MVA Transformator im Süden Österreichs durchgeführt.

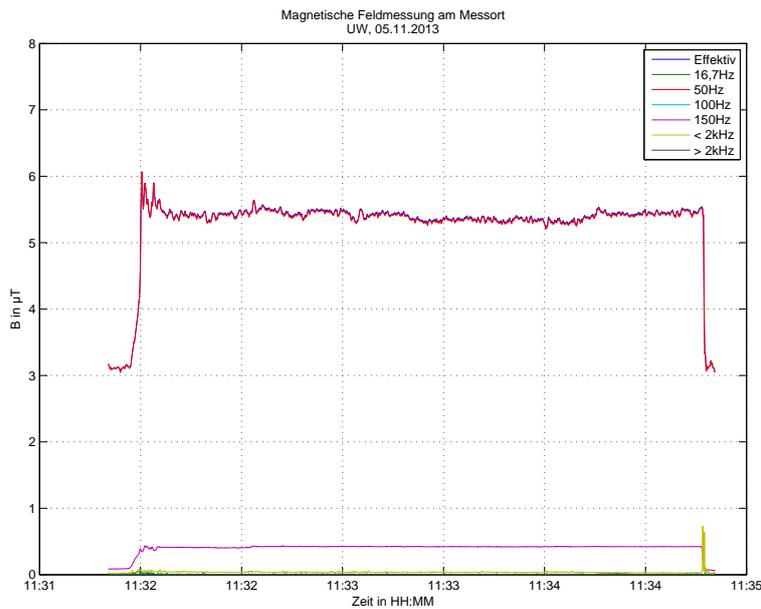


Abbildung 3.7.: Das magnetische Feld am Messort aufgegliedert in dessen Frequenzanteile.

Aus Abbildung 3.7 sowie Tabelle 3.2 ist ablesbar, dass am Messort ein effektives magnetisches Feld von mehr als $5\mu\text{T}$ gemessen wurde, welches vorwiegend aus der 50Hz Komponente besteht. Die 150Hz Komponente beträgt weniger als 10% vom effektiven Wert und kann (wie auch die restlichen Frequenzanteile) für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden.

Tabelle 3.2.: Tabellarische Darstellung der Frequenzen vom Magnetfeld am Messort. Die Frequenzanteile in % beziehen sich auf den effektiven Messwert.

	gemessen	berechnet
Frequenz	B	B
Hz	μT	%
Effektiv	5,42	-
16,7	0,00	0,0
50	5,40	99,6
100	0,00	0,0
150	0,41	7,6
< 2k	0,04	0,7
> 2k	0,00	0,0

Untersuchungen an Stromzange und Datenlogger auf Einwirkungen vom magnetischen Feld

Aufgrund der vorigen Erkenntnisse werden mögliche Einwirkungen des magnetischen Feldes auf das Messsystem getestet. Dafür wird im Labor ein Versuchsaufbau¹ realisiert, mit dem Stromzange, Filter und Datenlogger einem magnetischen Feld ausgesetzt werden können. Für die Tests wird ein Magnetfeld mit $17\mu\text{T}$ (dreidimensional: x(50%), y(20%), z(30%)) generiert. Dies liegt deutlich über den in der Praxis registrierten Werten. In der nachfolgenden Abbildung 3.8 ist ein solcher Versuchsaufbau dargestellt. Die gesamte Messbox samt Stromzange sowie ein Teil der Leiterschleife befinden sich im Magnetfeld. Als Messgröße für die Tests wurden die in Tabelle 3.3 dargestellten Gleichströme eingepreßt.

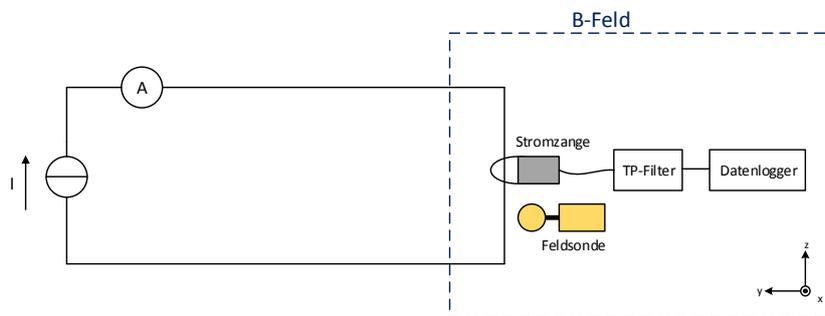


Abbildung 3.8.: Laboraufbau zur Untersuchung auf Einwirkung des magnetischen Feldes auf das Messsystem. Die Stromquelle erzeugt ein DC-Signal mit unterschiedlicher Polarität und Amplitude.

¹Verwendete Geräte im Anhang.

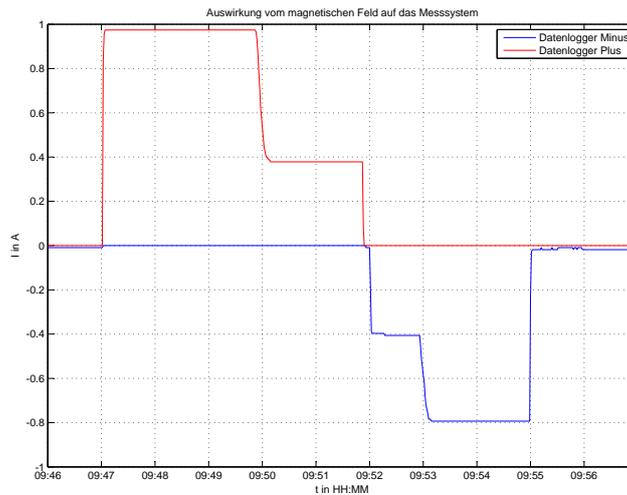


Abbildung 3.9.: Laborversuch zur Messaufzeichnung eines definierten Stromes unter Einwirkung des magnetischen Feldes auf das Messsystem (Stromzange, Filter, Datenlogger).

Tabelle 3.3.: Auswertung der Auswirkung vom Magnetfeld auf das Messsystem sowie deren Abweichung zum Sollwert.

eingestellt		gemessen	berechnet	
I	B-Feld	$U_{Stromzange}$	I	Abweichung
A	μT	mV	mA	%
1	17,38 (50Hz)	97,4	974,0	2,6
0,4	17,38 (50Hz)	37,8	378,0	5,5
-0,4	17,38 (50Hz)	-40,6	-406,0	-1,5
-0,8	17,38 (50Hz)	-79,4	-794,0	0,8
-0,8	17,38 (150Hz)	-79,4	-794,0	0,8

Aufgrund der Messergebnisse kann keine Beeinflussung durch das magnetische Feld auf das Messsystem festgestellt werden. Die registrierten Messfehler treten sowohl mit als auch ohne Magnetfeld auf und sind auf die Messungenauigkeiten¹ der verwendeten Komponenten zurückzuführen.

3.5.3. Temperaturabhängigkeit

Während der Messung kann der Temperaturunterschied am Tag mehrere °C betragen. Infolgedessen muss auf die Temperaturabhängigkeit der Stromzange geachtet werden. Beim Datenlogger konnte keine Temperaturabhängigkeit festgestellt werden.

¹Siehe Kapitel 3.6

Der Temperaturdrift wird im Labor getestet. Zuerst wird die Stromzange auf eine Temperatur von $10,3^{\circ}\text{C}$ abgekühlt. Bevor die Messung beginnt, wird der Nullpunkt kalibriert. Nach dem Kalibrieren beginnt die Messung eines Sollwert-Stromes von konstant $0,4\text{A}$ DC, während sich die Stromzange langsam erwärmt, bis die Raumtemperatur von ca. 20°C erreicht ist.

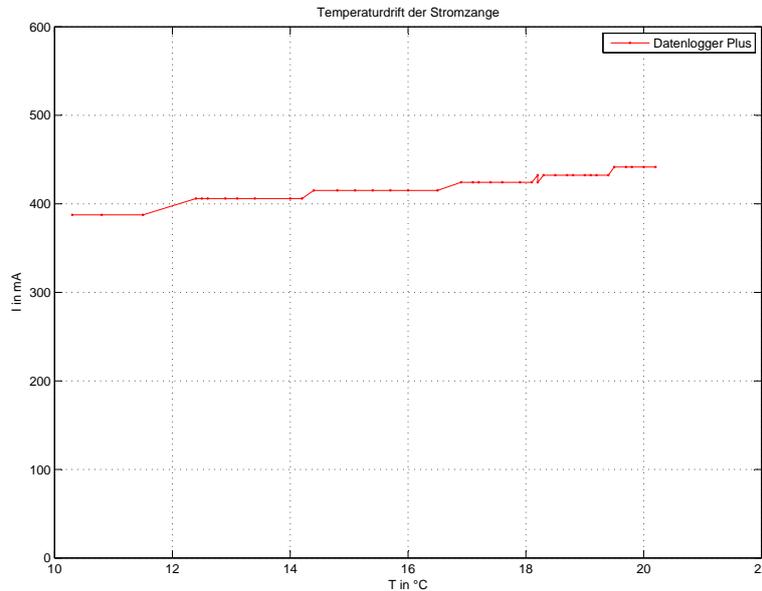


Abbildung 3.10.: Temperaturabhängigkeit der Stromzange bei einem Sollwert von DC $0,4\text{A}$. Aus dem Diagramm ist ein starker Temperaturdrift der Stromzange zu erkennen.

Die einzelnen Stufen im Diagramm ergeben sich aus der Auflösung des Datenloggers, der mit $0,8\text{mV}$ ($\hat{=}$ 8mA) angegeben ist. Für die Berechnung des *Temperaturkoeffizienten* ϑ wird die Differenzenbildung angewendet:

$$\vartheta = \frac{\Delta I}{\Delta T} \approx \frac{0,44\text{A} - 0,38\text{A}}{20,2^{\circ}\text{C} - 10,3^{\circ}\text{C}} \approx 6\text{mA}/^{\circ}\text{C} \quad (3.14)$$

ϑ Temperaturkoeffizient

Es ist daher erstrebenswert, die Temperatur im Schaltschrankinneren möglichst konstant zu halten, um Messfehler durch den Temperaturdrift der Stromzange ausschließen zu können. Der Datenlogger an sich weist keine Temperaturabhängigkeit auf.

3.6. Messabweichung und Fehlerabschätzung

Von Interesse ist auch eine Fehlerabschätzung des gesamten Messsystems. Um dies berechnen zu können, werden die Genauigkeitsangaben der einzelnen Komponenten aus dem Datenblatt entnommen.

Zur Ermittlung der Genauigkeit der verwendeten Messeinheit wird eine sogenannte Fehlerabschätzung durchgeführt. Dabei werden die verschiedenen Auswirkungen, die durch externe und interne Störeinflüsse bewirkt werden, sowie Einschränkungen, welche durch das Messsystem bedingt sind, näher untersucht.

3.6.1. Zufällige und systematische Messabweichung

Als *zufällige Messabweichungen* bezeichnet man Fehler, die in Betrag und Vorzeichen statistisch schwanken. Sie rufen eine Streuung um den wahren Wert hervor. Durch statistische Verfahren kann aber auch hier eine Angabe über den wahren Wert gemacht werden. [10]

Systematische Abweichungen sind jene Fehler, die bei wiederholtem Messen immer gleichen Betrag und Vorzeichen aufweisen. Diese können im konkreten Fall durch Temperatur, magnetische Felder, falsche Handhabung der Messgeräte etc. entstehen. Systematische Fehler können durch vorher ermittelte Korrekturfunktionen kompensiert werden. [10]

Fehler digitaler Messgeräte, welche durch unvermeidbare Quantisierungsfehler entstehen, können aus dem Datenblatt entnommen werden. Bei der A/D-Umsetzung wird der Unsicherheitsbereich vom digitalen Ergebnis mit ± 1 Quant (digit) = ± 1 LSB¹ angegeben. [10]

Folgende Fehlerangaben sind bei digitalen Messgeräten üblich: [10]

- prozentueller Fehler vom Messwert
- prozentueller Fehler vom Messbereichsendwert (Quantisierungsfehler)
- prozentueller Fehler vom Messwert ± 1 (Messquanten) ± 1 LSB
- prozentueller Fehler vom Messbereichsendwert ± 2 (Messquanten) ± 2 LSB

Stromzange

Die verwendete Ausgangsempfindlichkeit der Stromzange beträgt 100mV/A. Zudem wird die DC-Genauigkeit mit $\pm 1\%$ vom Messwert ± 2 mA angegeben. Aus den Laborversuchen ergab sich ein Temperaturkoeffizient von 6mA/°C.

¹Least Significant Bit

Tiefpassfilter

Die Widerstände und Kondensatoren des Tiefpassfilters sind gewissen Toleranzen unterworfen. Laut Herstellerangaben hat der Kohleschichtwiderstand eine Bauteiltoleranz von 5% des Nominalwertes ($4,7k\Omega$) und der Keramik-Y Kondensator eine Toleranz von 10% des Nominalwertes ($33\mu F$).

Datenlogger

Der verwendete Datenlogger besitzt eine Auflösung von $0,8mV$ mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ des Messwerts $\pm 1mV$. Die Abtastintervalle reichen von $1s$ bis zu 10 Tagen. Um eine Messaufzeichnung von einer Woche zu realisieren, müssen die Abtastintervalle auf 10 Sekunden gesetzt werden, welches durch die begrenzte Speicherkapazität von 64.000 Messwerten vorgegeben ist. Laut Shannonschen Abtasttheorem (siehe Gleichung 3.2) ergeben sich daraus folgende Bedingungen:

$$1s \text{ Abtastung} : f_{Abtast} = 1Hz \rightarrow f_{max} = 0,5Hz$$

$$10s \text{ Abtastung} : f_{Abtast} = 0,1Hz \rightarrow f_{max} = 0,05Hz$$

3.6.2. Messunsicherheiten

Da die Messabweichungen der verwendeten Komponenten im Messsystem aufgezeigt wurde, gilt im nächsten Schritt anzugeben, inwieweit sich die Einzelabweichungen der Messgröße auf das Messergebnis niederschlägt. [10]

Messabweichungen

Dabei unterscheidet man zwischen absolute und relative Messabweichungen. Diese Abweichungen gehören zu den exakten Fehlerberechnungen. [10]

$$\text{Absolute Messabweichung} : \Delta Y_F = Y_A - Y_W \quad (3.15)$$

$$\begin{array}{ll} Y_A & \text{Angezeigter Wert} \\ Y_W & \text{Wahrer Wert} \end{array}$$

$$\text{Relative Messabweichung} : \Delta F_R = \frac{\Delta Y_F}{Y_W} \hat{=} \frac{Y_A - Y_W}{Y_W} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

Fehlerfortpflanzung

Das *totale Differential* wird für *kleine systematische Abweichungen* in Bezug auf die Messgröße $\Delta Y_j \ll Y_j$ verwendet, deren Betrag und Vorzeichen bekannt sind. Diese Berechnungsmethode beruht auf der Taylorreihenentwicklung und kann nach dem linearen Glied abgebrochen werden. [10]

$$\Delta Y_{Er} \approx \frac{\partial f}{\partial Y_1} \Delta Y_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial Y_\nu} \Delta Y_\nu = \sum_{j=1}^{\nu} \frac{\partial f}{\partial Y_j} \Delta Y_j \quad (3.17)$$

ΔY_{Er} Absoluter Ergebnismessfehler
 ΔY_j Systematische Einzelabweichungen
 Y_j Messgrößen, vorzeichenbehaftet

In der Praxis ist von der Messeinrichtung zumeist nur die Fehlergrenze angegeben, in dem die Messwerte liegen können. Da das Vorzeichen nicht bekannt ist, muss die Gleichung 3.17 um die Addition der Beträge der einzelnen systematischen Abweichungen modifiziert werden. Dadurch wird der größtmögliche Gesamtfehler - Worst Case - von systematischen Abweichungen angegeben, ohne das Vorzeichen zu kennen. [10]

$$\Delta Y_{Er} \approx \pm \left(\left| \frac{\partial f}{\partial Y_1} \Delta Y_1 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial Y_\nu} \Delta Y_\nu \right| \right) = \pm \sum_{j=1}^{\nu} \left| \frac{\partial f}{\partial Y_j} \Delta Y_j \right| \quad (3.18)$$

Berechnungsbeispiel

Um den Bereich, in denen die Messwerte liegen, angeben zu können, wird als Berechnungsgrundlage Formel 3.18 verwendet. Es wird dabei von einem zu messenden Gleichstrom von 1A ausgegangen. Die Genauigkeiten der Messgeräte sind in Kapitel 3.6.1 angegeben. Die Temperatur wird als konstant angenommen.

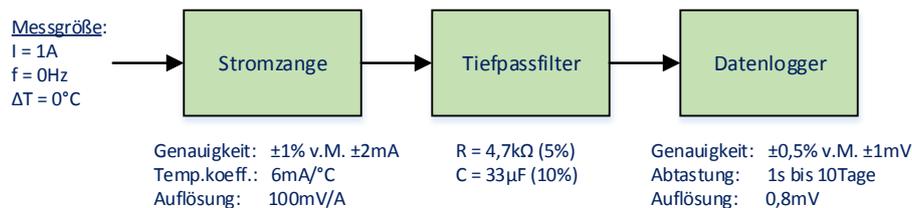


Abbildung 3.11.: Grafische Darstellung der Beispielangabe.

Beim Tiefpassfilter wird als *Funktionsgleichung* f der *Amplitudengang* verwendet und die einzelnen Ableitungen nach R und C gebildet. Der Amplitudengang im unbelasteten Fall lautet:

$$\begin{aligned} \frac{U_a}{U_e} &= \frac{|X_{C1}|}{\sqrt{R_1^2 + X_{C1}^2}} \cdot \frac{|X_{C2}|}{\sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}} \rightarrow \text{mit } R = R_1 = R_2, |X_C| = |X_{C1}| = |X_{C2}| \\ &= \frac{|X_C|^2}{R^2 + X_C^2} \rightarrow \text{mit } X_C = -\frac{1}{wC} \\ &= \frac{1}{1 + (wRC)^2} \end{aligned} \tag{3.19}$$

$$\frac{\partial f}{\partial R} = \frac{\partial \frac{U_e}{1+(wRC)^2}}{\partial R} = -U_e \cdot \frac{2w^2RC^2}{[1 + (wRC)^2]^2} \tag{3.20}$$

$$\frac{\partial f}{\partial C} = -U_e \cdot \frac{2w^2R^2C}{[1 + (wRC)^2]^2} \tag{3.21}$$

Tabelle 3.4.: Absolute und relative Messabweichungen beim Tiefpassfilter bei einer Eingangsspannung $U_e = 100mV$ für unterschiedliche Frequenzen.

		eingestellt	berechnet		
f	d	U_a	$\Delta U_{a,F}$	$\Delta U_{a,R}$	
Hz	-	mV	mV	%	
0	1	100,00	0	0	
0,1	0,9906	99,06	0,28	0	
0,3	0,9213	92,13	2,36	0	
1	0,5135	51,29	14,61	0,3	

Aufgrund der Tatsache, dass der Gleichstrom die Frequenz Null besitzt, ergeben sich dadurch theoretisch keine Abweichungen. Bei höheren Frequenzen ist der relative Fehler nicht mehr zu vernachlässigen. Jedoch haben diese Fehler kaum mehr Auswirkungen auf das Messergebnis, da ihre Dämpfung schon sehr hoch und die Auflösung des Datenloggers zu gering ist.

Berechnung des absoluten und relativen Messfehlers

$$\begin{aligned}
 \Delta I_{mA,F} &\approx \pm \left(\underbrace{\left| \frac{\partial f}{\partial I} \Delta I \right|}_{\text{Stromzange}} + \underbrace{\left| \frac{\partial f}{\partial R} \Delta R \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial C} \Delta C \right|}_{\text{Tiefpassfilter}} + \underbrace{\left| \frac{\partial f}{\partial U} \Delta U \right|}_{\text{Datenlogger}} \right) \quad (3.22) \\
 &= \pm \left(\underbrace{|I \cdot 1\% + 2mA| \cdot 0,1 \frac{mV}{mA}}_{\text{Stromzange}} + \underbrace{\Delta U_{a,F}}_{\text{Tiefpassfilter}} + \underbrace{|U \cdot 0,5\% + 1mV|}_{\text{Datenlogger}} \right) \cdot 10 \frac{mA}{mV} = \\
 &= \pm (1,2mV + 0mV + 1,5mV) \cdot 10 \frac{mA}{mV} = \\
 &= \pm 27mA
 \end{aligned}$$

$\Delta I_{mA,F}$	Absolute Messabweichung vom Transformatorsternpunktstrom, [mA]
I	Transformatorsternpunktstrom (DC), [mA]
R	Widerstand Tiefpassfilter, [k Ω]
C	Kapazität Tiefpassfilter, [μF]
U	Eingangsspannung, [mV]

$$\begin{aligned}
 \Delta I_{mA,R} &= \frac{\pm \Delta I_{mA,F}}{I_{mA}} \cdot 100\% \quad (3.23) \\
 &= \frac{\pm 27mA}{1000mA} \cdot 100\% = \pm 2,7\%
 \end{aligned}$$

$\Delta I_{mA,R}$	Relative Messabweichung vom Transformatorstrom, [%]
-------------------	---

Wenn man die Fehlerkurven für den absoluten und relativen Fehler in Abbildung 3.12 vergleicht, ist festzustellen, dass bei kleinem Messströmen der relative Fehler stark ansteigt.

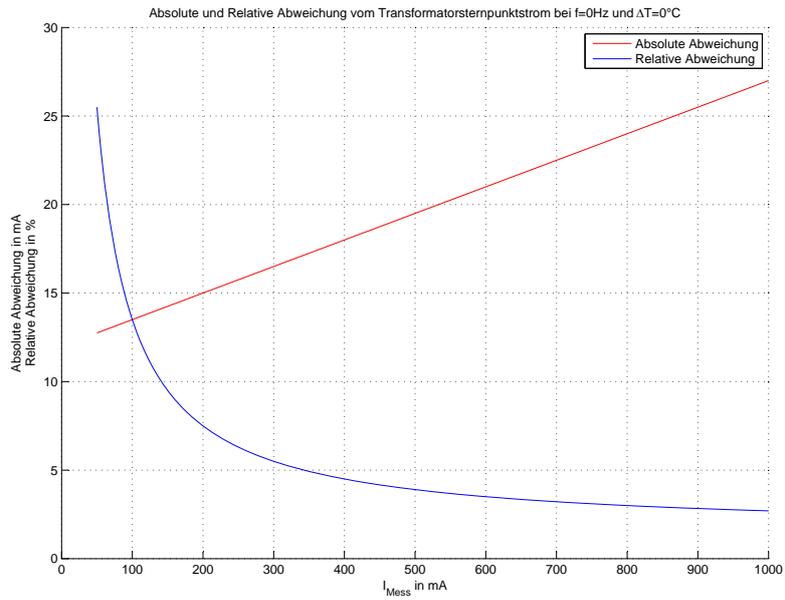


Abbildung 3.12.: Grafische Darstellung der Messabweichung vom Messsystem bei reinen DC-Strömen I_{Mess} und konstanter Temperatur.

4. Praktische Sternpunktstrommessungen

In diesem Kapitel wird näher auf die Sternpunktstrommessung eingegangen. Es wird erläutert, wie das Messsystem im Umspannwerk installiert wird. Das Hauptaugenmerk liegt aber auf den Auswertungen der Strommessung im AC- und DC-Bereich. Zuletzt wird der Einfluss vom Erdmagnetfeld auf den Sternpunktstrom untersucht.

4.1. Installation des Messsystems

Der Transformatorsternpunkt ist über einen Erdungstrenner mit der Umspannwerkserdung verbunden und darf unter keinen Umständen während des Betriebes geöffnet werden. Aus diesem Grund wird zusätzlich eine flexible Erdungsgarnitur mit ausreichendem Querschnitt verwendet. Im ersten Schritt wird im Betriebszustand über die Erdungsgarnitur der Transformatorsternpunkt parallel zu dem Erdungstrenner zusätzlich geerdet. Im Anschluss kann der Erdungstrenner des Transformators geöffnet werden, da der Sternpunkt nun über die parallele Erdungsgarnitur mit der Erde verbunden ist. Der Öffnungsquerschnitt der Stromzange reicht aus, um die Erdungsgarnitur vollständig zu umfassen.

Zusätzlich zu dem eigentlichen Messsystem werden die Ströme am Transformatorsternpunkt mit einer eigenen Messzange und einem hochauflösenden Power Netzwerk Analysator separat zu Testzwecken gemessen. Aufgabe des Power Netzwerk Analysator¹ ist es, auch die höherfrequenten Komponenten aufzuzeichnen.

Vorzeichenfestlegung:

Jene Gleichstromrichtung, die vom Transformatorsternpunkt über die Erdungsgarnitur in das Erdreich fließt, wird als positiv definiert.

Die Funktionsweise der Versuchsmessung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Dabei wird der Sternpunktstrom, der über die Erdungsgarnitur fließt, von beiden Stromzangen detektiert und in eine Spannung umgewandelt. Um zu überprüfen, ob Abweichungen zwischen den Stromzangen auftreten, werden beide Signale an den Power Netzwerk Analysator (PNA) geführt. Zusätzlich wird die Innentemperatur des Schaltschranks sowie die Außentemperatur aufgezeichnet, um Korrekturen vornehmen zu können.

¹Dewetron DEWE 3010

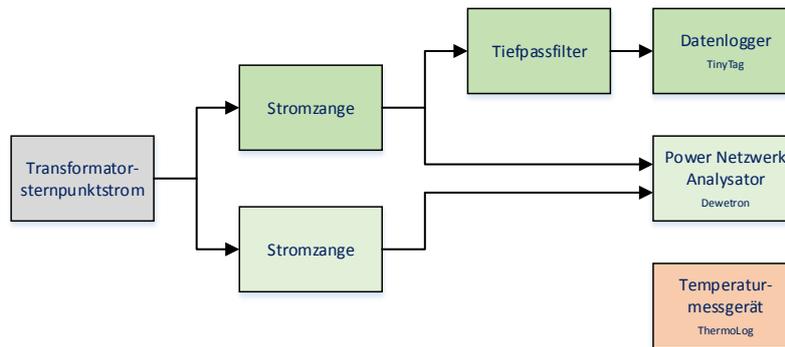


Abbildung 4.1.: Darstellung der (Versuchs-)Feldmessung und deren Komponenten.

4.2. Messung

Insgesamt wurden drei Messungen in Umspannwerken durchgeführt. Das Ziel bei allen Messungen war das Sammeln erster Daten, der Test auf Praxistauglichkeit und die Überprüfung der Messung mittels hochauflösenden Power Netzwerk Analysator.

Für alle Feldmessungen gilt generell: Am Beginn der Messung erfolgt ein Offset-Abgleich der Stromzangen. Nach dem Erreichen eines stationären Temperaturniveaus im Schaltschrank wird der Nullabgleich der Stromzangen erneut durchgeführt.

1. Versuchsmessung in einem Umspannwerk im Nordosten Österreichs - UW 1
2. Versuchsmessung in einem Umspannwerk im Osten Österreichs - UW 2
3. Wochenmessung in einem Umspannwerk im Osten Österreichs - UW 2

4.2.1. Versuchsmessung - UW 1

Das System wurde am 17.12.2013 in einem Umspannwerk im Nordosten Österreichs an einem 380/220kV-Transformator mit einer Leistung von 300MVA installiert. Die Außentemperatur betrug $T_A = 1^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ und die Innentemperatur des Schaltchranks $T_I = 17^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$.



(a) Messsystem mit den verwendeten Komponenten: Stromzangen, Datenlogger, Power Netzwerk Analysator und Temperaturmessgerät. (b) Anschluss der parallel geführten Erdungsgarnitur am Transformatorsternpunkt für die Messung.

Abbildung 4.2.: Aufbau des Messsystems in der Praxis.

Aufzeichnung

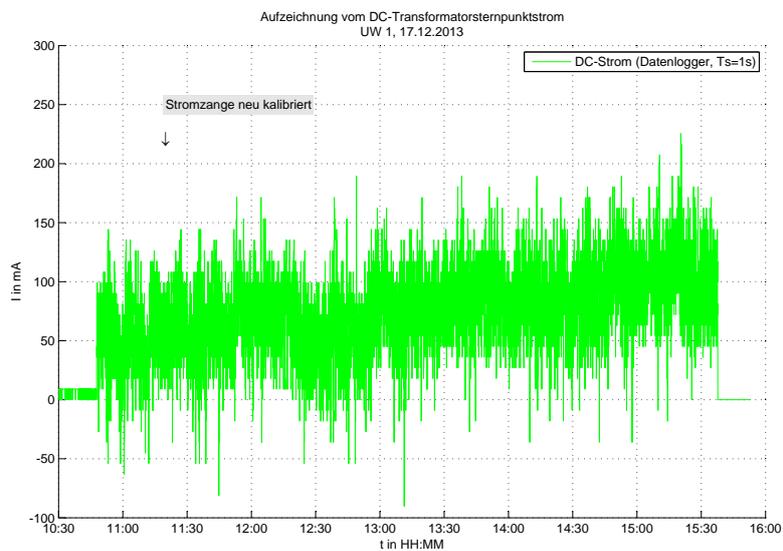


Abbildung 4.3.: DC-Transformatorsternpunktstrom bei der 1. Versuchsmessung im UW 1, aufgezeichnet mit einer Abtastrate von 1Hz durch den Datenlogger.

4.2.2. Versuchsmessung - UW 2

Die zweite Versuchsmessung fand am 09/10.01.2014 in einem Umspannwerk im Osten Österreichs an ebenfalls an einem 380/220kV-Transformator mit einer Leistung von 200MVA statt. Die Außentemperatur betrug $T_A = 4^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ und die Innentemperatur des Schaltschranks $T_I = 27^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Aufzeichnung

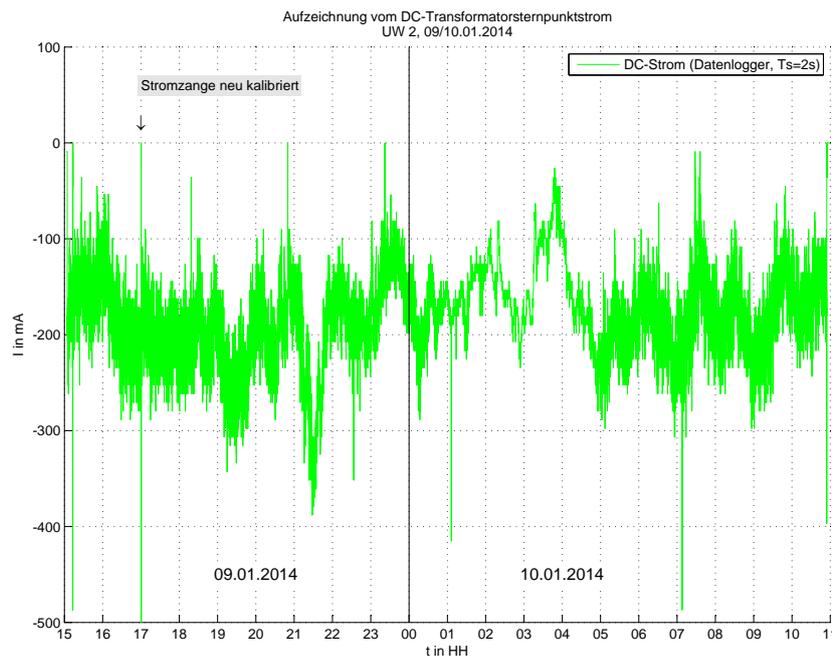


Abbildung 4.4.: DC-Transformatorsternpunktstrom bei der 2. Versuchsmessung im UW 2, aufgezeichnet mit einer Abtastrate von 0,5Hz durch den Datenlogger.

4.2.3. Wochenmessung - UW 2

Es wird am gleichen Transformator mit der gleichen Erdungsgarnitur wie bei der Versuchsmessung im UW 2 gemessen, jedoch mit einer Aufzeichnungsdauer von 1 Woche. Die Außentemperatur betrug $T_A = 5^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ und die Innentemperatur des Schaltschranks $T_I = 26^\circ\text{C} \pm 4^\circ\text{C}$.

Wochenaufzeichnung

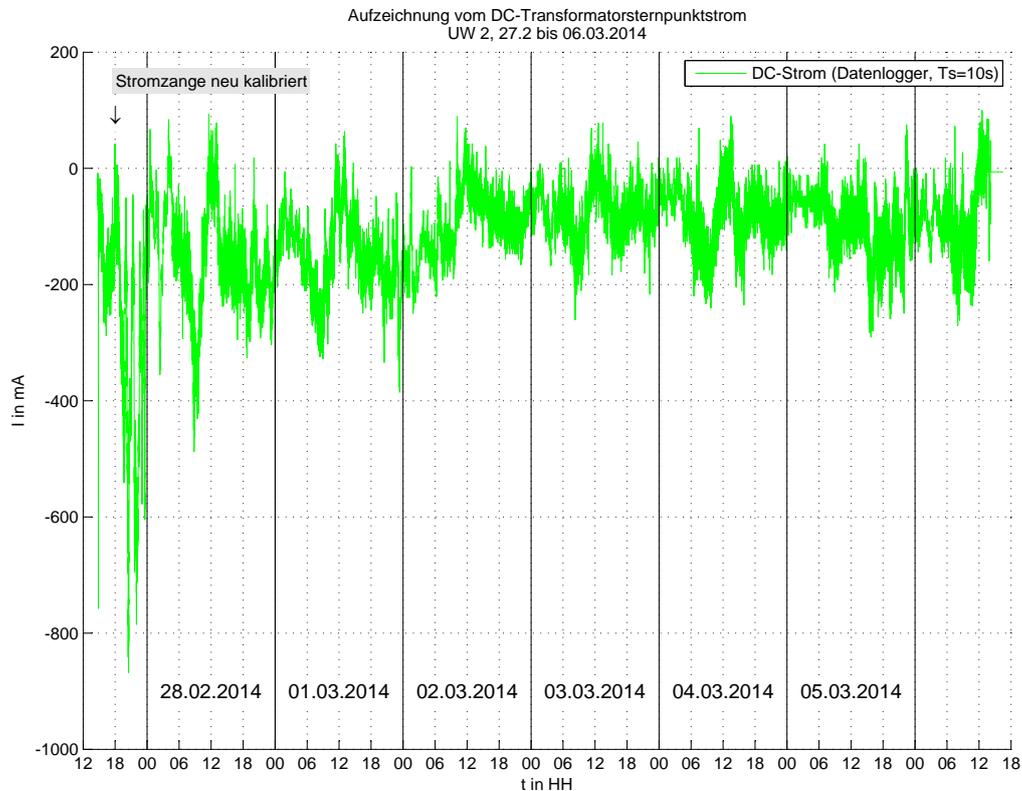


Abbildung 4.5.: DC-Transformatorsternpunktstrom bei der Wochenmessung im UW 2, aufgezeichnet mit einer Abtastrate von 0,1Hz durch den Datenlogger.

4.3. Auswertung der Messung

Zu Beginn wird näher auf die Analyseverfahren für die Messauswertung eingegangen. Im Anschluss daran wird der Transformatorsternpunktstrom näher analysiert. Von Interesse dabei ist, welche Frequenzen wie stark und ab welchem Zeitpunkt in Erscheinung getreten sind.

Danach fokussiert man sich ausschließlich auf den DC-Anteil vom Transformatorsternpunktstrom. Zuerst wird überprüft, wie genau die Aufzeichnung vom Datenlogger (DC) ist. Dazu werden die Daten vom Datenlogger mit jenen vom Power Netzwerk Analysator verglichen. Anschließend werden die grafischen Darstellungen vom DC Transformatorsternpunktstrom näher betrachtet.

Zuletzt wird eine Korrelation zwischen der Veränderung des Erdmagnetfelds und dem

DC-Transformatorsternpunktstrom untersucht.

4.3.1. Analysemethoden

4.3.1.1. Fourier-Transformation

Um die verschiedenen Frequenzen eines verrauschten Signals herausfiltern zu können, wird als Analysemethode die Fouriertransformation verwendet. Bei der Berechnung ist zu berücksichtigen, ob es sich um ein endliches oder unendliches Signal handelt, damit die richtige Formel zur Analyse herangezogen werden kann. Aufgrund der Tatsache, dass endliche Werte eines Signals verwendet werden, liegt der Fokus bei der *Diskreten Fourier Transformation* (DFT). [8]

Ein abgetastetes Signal $x_{[n]}$ mit einer endlichen Länge N wird um die Basisfunktion W_N^{kn} mit der Länge N erweitert. [8]

$$x_{[n]} = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\langle \{x_{[n]}\} | W_N^{kn} \rangle}{\|W_N^{kn}\|^2} W_N^{kn} \quad (4.1)$$

Dabei ist W_N^{kn} wie folgt definiert: [8]

$$W_N = e^{j\frac{2\pi}{N}} \quad (4.2)$$

Nach einsetzen von $\|W_N^{kn}\|^2 = \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{kn} W_N^{-kn} = N$ erhalten wir die Definitionen von *DFT*¹ und der *Inversen Diskreten Fourier Transformation (IDFT)* [8]

$$DFT : X_{[k]} = \sum_{n=0}^{N-1} x_{[n]} \cdot W_N^{-kn} \quad (4.3)$$

$$IDFT : x_{[n]} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{[k]} \cdot W_N^{-kn} \quad (4.4)$$

Aufgrund der Eulerschen Formel kann die Exponentialfunktion in eine trigonometrische Funktion mit Sinus und Cosinus Anteil umgewandelt werden. [8]

$$X_{[k]} = \sum_{n=0}^{N-1} x_{[n]} \left(\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right) \quad (4.5)$$

¹In Matlab wird die DFT mit der Funktion *fft(...)* realisiert.

Der Index k bezieht sich auf die Basisfunktion W_N^{kn} mit der Frequenz $\theta = \frac{2\pi k}{N}$. Daher ergibt sich k als Index für die diskrete Frequenz. [8]

Für nähere Informationen zum Thema Signalverarbeitung siehe [8].

4.3.1.2. Korrelation

Um eine Relation zwischen zwei statistischen Signalverläufen feststellen zu können, behilft man sich in der Signalverarbeitung mit den Methoden der Statistik. Die bekannten Methoden sind dabei die *Kreuzkorrelation* und die *Autokorrelation*.

Autokorrelationsfunktion AKF

Bei der Autokorrelation wird das Signal mit sich selbst verglichen. Dabei wird das Signal $x(t)$ schrittweise um τ verschoben, mit dem Signal zum Zeitpunkt t multipliziert und anschließend der Mittelwert gebildet. Damit lassen sich periodische Anteile im stark verrauschten Signal finden. Das Maximum liegt bei $\tau = 0$. [10]

$$r_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t - \tau) dt = \overline{x(t) \cdot x(t - \tau)} \quad (4.6)$$

Kreuzkorrelationsfunktion KKF

Bei der Kreuzkorrelation werden zwei unterschiedliche Signale $x(t)$ und $y(t)$ miteinander verglichen. Dabei wird das zu untersuchende Signal $y(t)$ um τ verschoben und mit dem bekannten Signal $x(t)$ multipliziert. Im Anschluss wird aus dem Produkt der Mittelwert gebildet. Das Maximum muss nicht bei $\tau = 0$ liegen. [10]

$$r_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t - \tau) dt = \overline{x(t) \cdot y(t - \tau)} \quad (4.7)$$

Korrelationskoeffizient r

Der *Korrelationskoeffizient* r ist eine dimensionslose Zahl und gibt den Zusammenhang beider Signale $x(t)$ und $y(t)$ an. Der Koeffizient¹ kann Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Der positive Wert zeigt an, dass die Signale vollständig gleichphasig sind. Beim negativen Wert sind beide Signale gegenphasig zueinander. Hingegen beim Wert 0 ist kein statistischer Zusammenhang feststellbar. [10]

Für nähere Informationen zum Thema Korrelation siehe [10].

¹In Matlab wird der Korrelationskoeffizient mit der Funktion `corr()` berechnet.

4.3.2. Analyse des AC-Transformatorsternpunktstromes

Als Basis dienen dabei die Aufzeichnungen des ungefilterten Signals mittels Power Netzwerk Analysators. Zuerst wird das gesamte AC-Signal betrachtet und über Teilabschnitte eine Spektralanalyse gemacht. Wenn alle unterschiedlichen Frequenzen detektiert sind, werden sie einzeln betrachtet und analysiert. Aus diesen Untersuchungen lassen sich die Störsignale in 4 signifikante Erscheinungsformen charakterisieren:

- 50Hz-Komponente und deren Oberwellen
- Häufiges Auftreten von Strömen bei 16,7Hz (Bahnfrequenz)
- Transiente Ströme
- Rundsteuersignal mit einer Frequenz von 720Hz

Bei der Darstellung des Wechselanteils vom Transformatorsternpunktstrom wird eine Hüllkurve verwendet, die das Minimum/Maximum vom AC-Signal widerspiegelt. Zudem wird auch der DC-Wert in das Diagramm eingezeichnet, um die Verschiebung des Wechselanteils leichter erkennen zu können.

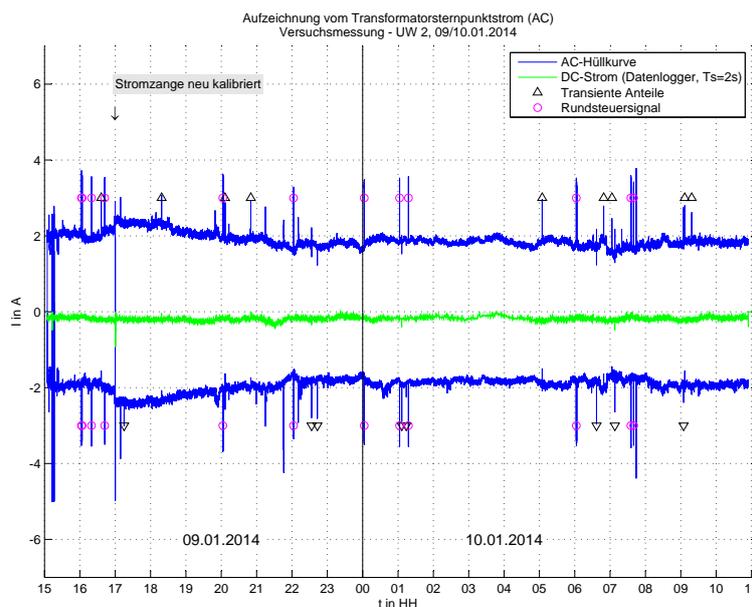


Abbildung 4.6.: Die auftretenden Störsignale sind eindeutig vom restlichen Signal unterscheidbar und werden mit farblichen Symbolen markiert.

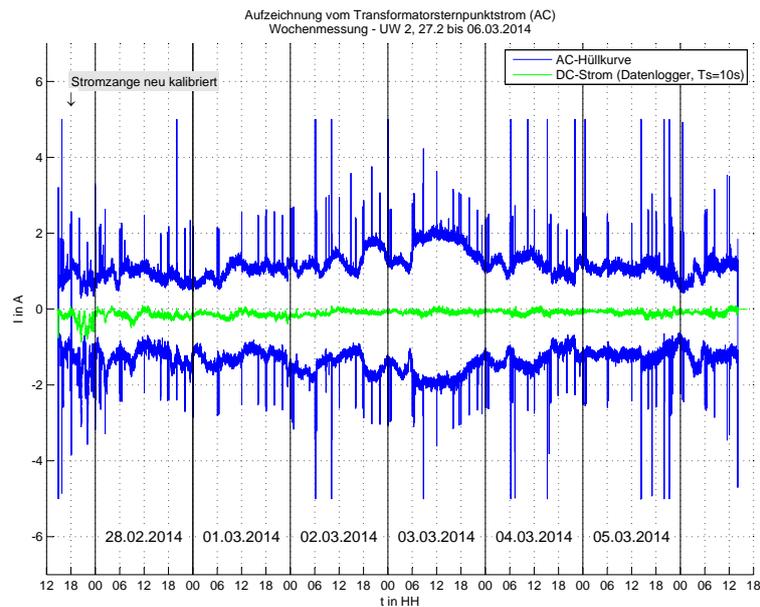


Abbildung 4.7.: Bei der Wochenmessung wird auf die Markierung von Störsignalen verzichtet. Der Messbereich (AC) wurde mit 5V festgelegt. Aus diesem Grund werden jene Impulse, die höher liegen, abgeschnitten.

Im Allgemeinen besitzt der Transformatorsternpunktstrom als Grundschwingung die 50Hz Komponente. Diese Grundwelle wird jedoch von Oberschwingungen mit ungerader Ordnungszahl, welche zeitlich variable Amplituden besitzen, überlagert. Vor allem die 3. Oberschwingung, welche eine Amplitudenhöhe der halben Grundschwingung besitzt, tritt dabei deutlich hervor. Sichtbar gegenüber den anderen harmonischen Oberschwingungen ist auch jene bei 450Hz. Beide erwähnten Oberschwingungen bilden üblicherweise ein Nullsystem.

In der Drehstromtechnik findet man häufig die Angaben von symmetrischen Komponenten. Sie sind ein beliebtes Werkzeug für die Behandlung von unsymmetrischen Erscheinungen in symmetrischen Netzen. Vorteil dieser Anwendung ist, dass die einzelnen Komponenten entkoppelt sind und sich daher nicht gegenseitig beeinflussen. [11]

Das Mitsystem beschreibt den ungestörten Systemzustand (gleiche Phasenfolge), mit Hilfe des Gegensystems (Phasenfolge verdreht) werden Schiefasten beschrieben und das Nullsystem bezieht sich auf Ströme über Erde. Daher ist das Nullsystem im Sternpunktstrom deutlich sichtbar. [11]

- ⁰Nullsystem: gleichphasiges System
- ¹Mitsystem: symmetrisches System mit gleichem Umlaufsinn
- ²Gegensystem: symmetrisches System mit gegenläufigen Umlaufsinn

Das gleiche System kann auch für die Oberschwingungen im Drehstromsystem angewendet werden. Voraussetzung dafür ist, dass es sich um symmetrische Spannungsverhältnisse in Drehstromsystemen handelt (Spannungen mit gleicher Form, Phasenverschiebung 120° zwischen den Grundschwingungen der Spannungen). [7]

- ⁰Nullsystem: Oberschwingungen der Ordnung $n=3k$, ($n=3,6,9,\dots$)
- ¹Mitsystem: Oberschwingungen der Ordnung $n=3k+1$, ($n=4,7,10,\dots$)
- ²Gegensystem: Oberschwingungen der Ordnung $n=3k-1$, ($n=5,8,11,\dots$)

Ein besonderes Augenmerk gilt auch der subharmonischen 16,7Hz Komponente, die ausschließlich im Bahnnetz Verwendung findet. Dieses Signal wird ebenfalls über Netzknoten in das Höchstspannungsnetz übertragen und spiegelt sich im Strom des Sternpunkts vom Transformator wider.

In Abbildung 4.8 werden die im Messsignal vorhandenen Frequenzkomponenten in Form eines Spektrums dargestellt.

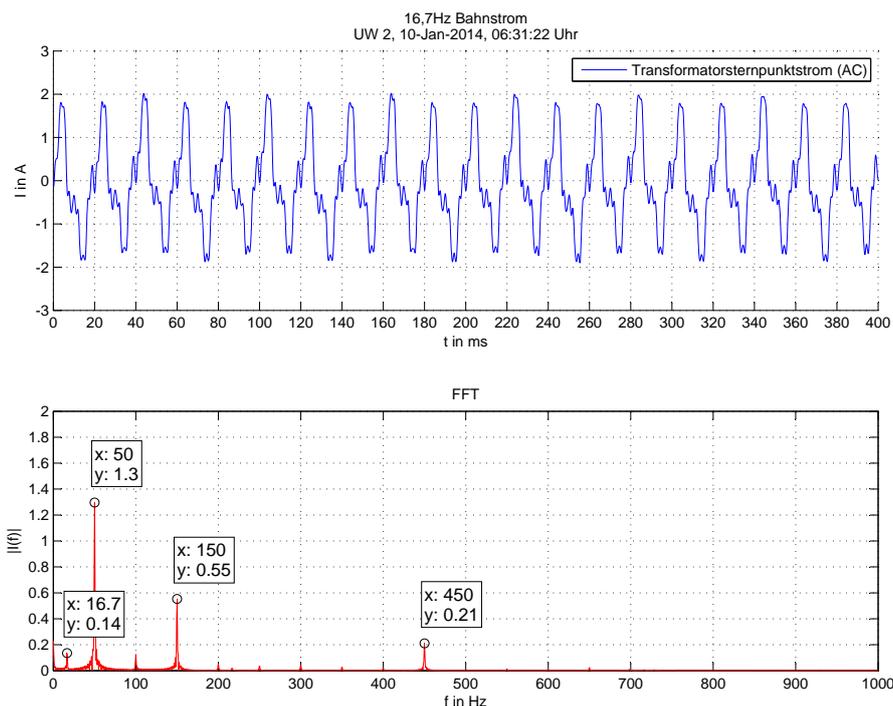


Abbildung 4.8.: Bild oben: Ausschnitt aus dem gemessenen Zeitverlauf (ungefiltert, mit Power Netzwerk Analysator aufgezeichnet).
 Bild unten: Fouriertransformation (Intervall = 1s).

Mittels Leistungsschalter werden in Höchstspannungsnetzen Schalthandlungen realisiert. Mit ihnen können Lastströme, Kurzschlussströme, kapazitive Ströme sowie induktive Ströme geschaltet werden. Infolge dieser Schalthandlungen treten transiente Stromverläufe in Erscheinung. Grund dafür ist, dass es zu einer un stetigen Änderung des Wechselstromes kommt. In einem induktiven Stromkreis kann sich der magnetische Fluss nicht sprunghaft, sondern nur stetig ändern. Zur Kompensation dieses sprunghaften Verhaltens tritt ein transientes Gleichstromglied auf.

Wie schnell die Gleichstromkomponente abklingt, ist von den Netzelementen abhängig. Bei einem kleinen Widerstand bleibt die Auswirkung vom Gleichstrom über mehrere Perioden bestehen.

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{4.8}$$

Der ungünstigste Fall des Schaltens ist im Spannungsnulldurchgang, da zu diesem Zeitpunkt die Spannung den größten Gradienten besitzt. Folge dessen ist auch das Gleichstromglied am Größten, welches sich durch einen sehr hohen Gleichstromanteil zu Beginn auswirkt.

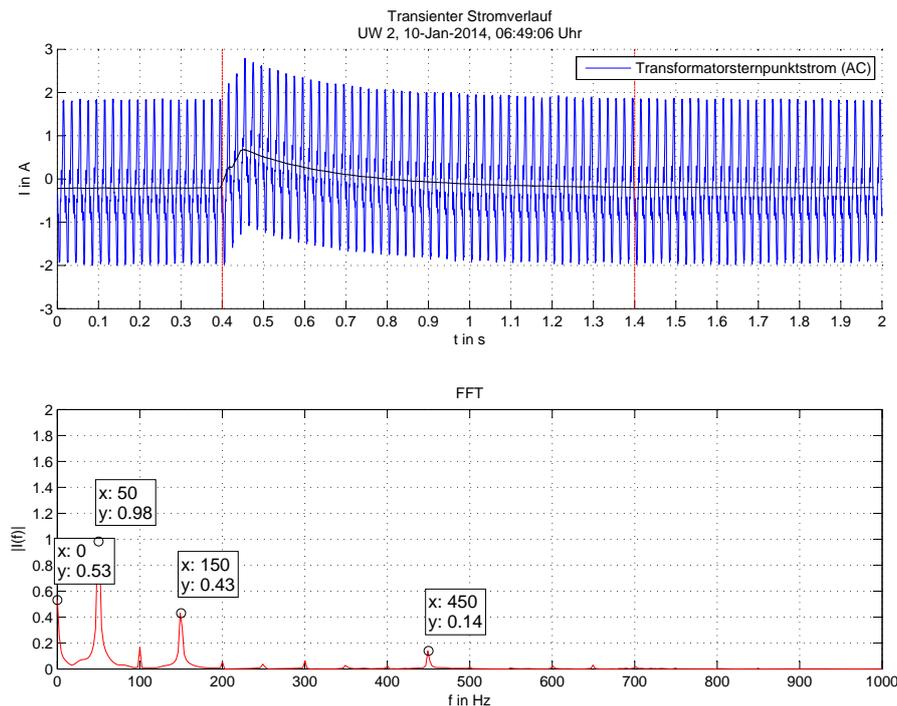


Abbildung 4.9.: Bild oben: Verlauf des transienten Verhaltens im Transformatorsternpunkt.
Bild unten: Fouriertransformation (Intervall = 1s).

Im Signalverlauf des Transformatorsternpunktstromes (AC) werden nun jene Bereiche markiert, in denen diese transienten Ströme auftreten. Zugleich werden diese transienten Punkte in der Aufzeichnung vom Messsystem eingetragen, welches den niederfrequenten Transformatorsternpunktstrom (DC) entspricht.

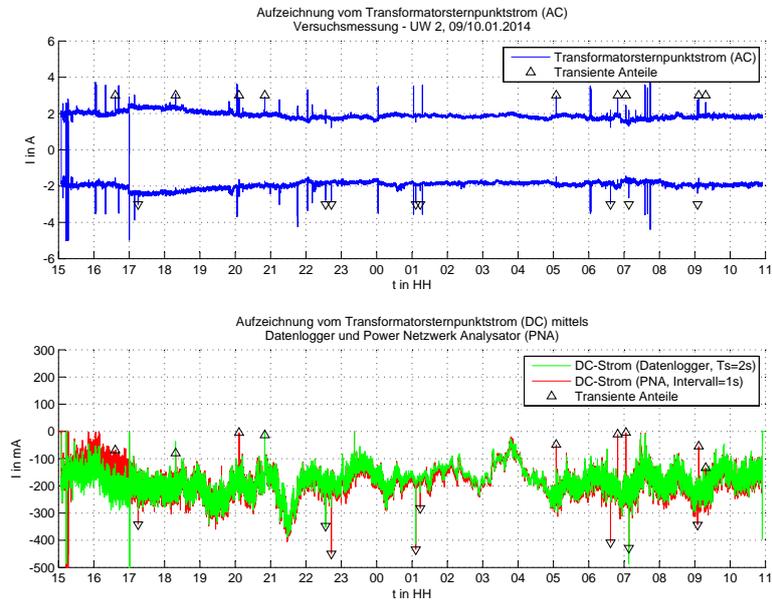


Abbildung 4.10.: Darstellung der transienten Verläufe im Signal des Transformatorsternpunktstromes. Bild oben: AC-Transformatorsternpunktstrom. Bild unten: Messaufzeichnung vom Messsystem und der berechneten FFT-Werte vom Power Netzwerk Analysator.

Der transiente Verlauf besitzt, wie bereits erwähnt, einen sehr hohen Gleichstromanteil, welcher vom Messsystem erfasst werden kann. Die einzelnen Amplitudenspitzen in der Messaufzeichnung vom DC-Strom (Abbildung 4.10, Bild unten) können eindeutig mit den transienten Verläufen von den Schaltvorgängen assoziiert werden.

Bei der weiteren Analyse des Messsignals wurden auch Frequenzkomponenten mit 720Hz detektiert. Diese Komponente ist eindeutig einer Rundsteueranlage zuzuordnen.

Tabelle 4.1.: Auflistung der österreichischen EVUs, welche ein 725Hz Rundsteuersignal verwenden. Die Parallelankopplung der Rundsteueranlage an das 50Hz-Netz wird mit einem P symbolisiert. (Stand vom 28.09.2011, Quelle: [12])

EVU	Einspeiseebene kV
Stadtwerke Klagenfurt	P20, P5
Stadtwerke Feldkirch	P10
Stadtwerke Kufstein	P25, P6
Stadtwerke Hall/Tirol	P25
Gemeindewerke Telfs	P10, P5, P3
Stadtwerke Bad Radkersburg	-
Elektrizitätswerke Hofgastein	P10, P6

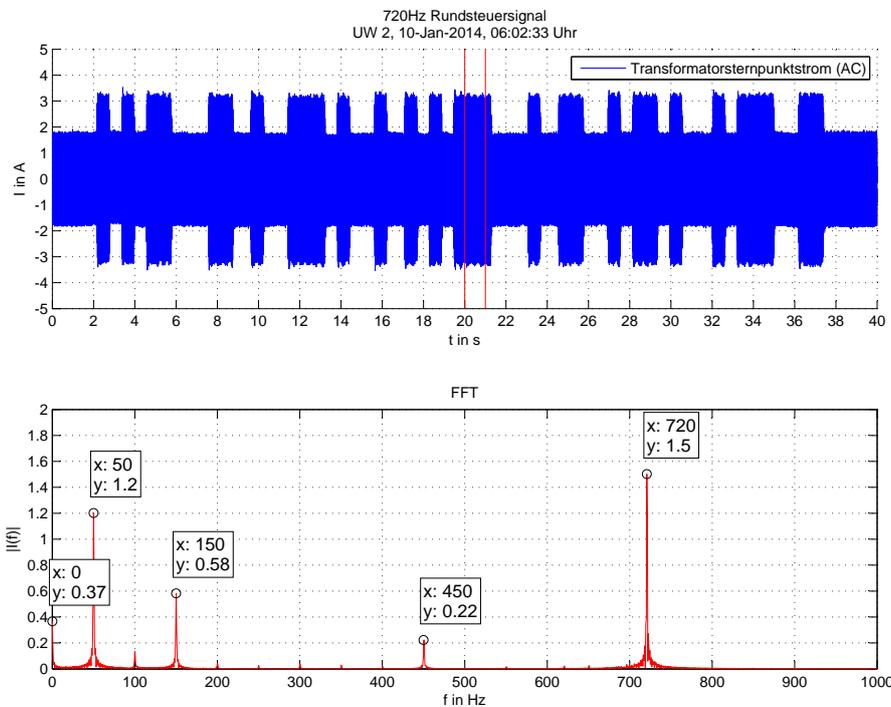


Abbildung 4.11.: Bild oben: Impulsfolge des Rundsteuersignals im Transformatorsternpunkt.
Bild unten: Fouriertransformation (Intervall = 1s).

Im oberen Bild aus Abbildung 4.11 ist die Impulsfolge des Rundsteuersignals klar erkennbar. Die Amplitude ist dabei immer die gleiche, jedoch können die einzelnen Impulsdauer variieren. Abhängig sind diese von dem zu übertragenden Code des Telegramms.

Mittels Fouriertransformation ist auch die Frequenz des Rundsteuersignals, welche hier bei 720Hz liegt, eindeutig identifizierbar. Der Unterschied zu den angegebenen Frequenzen in Tabelle 4.1 ist darauf zurückzuführen, dass diese Daten aus dem Jahr 2011 sind und seither neu angepasst wurden.

Ein interessanter Fall ergibt sich in Abbildung 4.12. Dabei treten vermehrt Oberschwingungen mit größerer Amplitude zwischen 300Hz bis 700Hz auf. Diese Erscheinung konnte keinem konkreten Ereignis zugeordnet werden. Möglicherweise handelt es sich um einen Schaltvorgang im Netz. Insbesondere das Schalten eines Transformators mit Inrush-Strom könnte für diese Oberschwingungen verantwortlich sein.

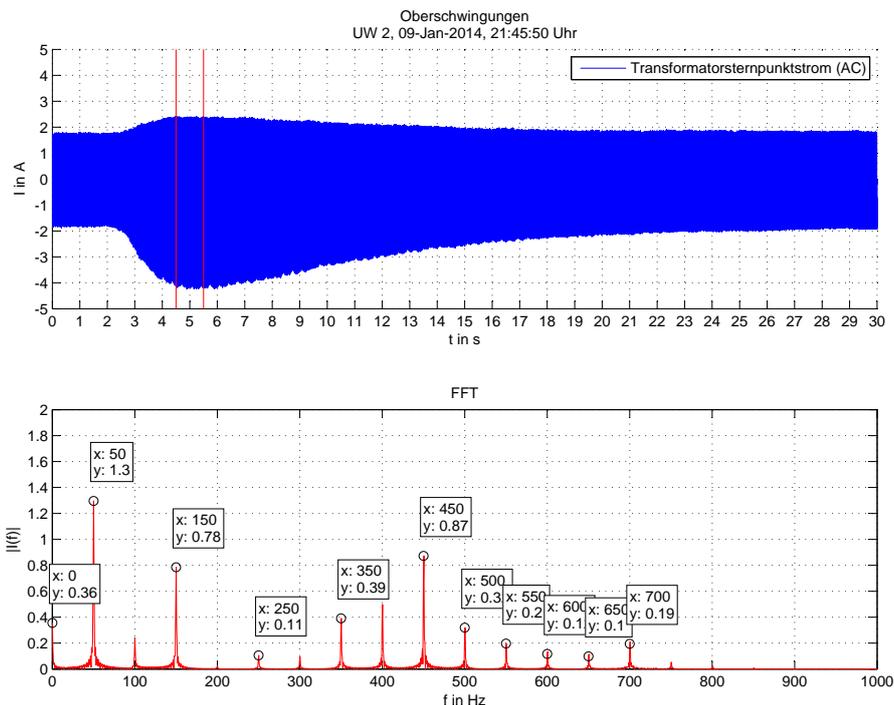


Abbildung 4.12.: Bild oben: Oberschwingungen im Transformatorsternpunkt.
Bild unten: Fouriertransformation (Intervall = 1s).

4.3.3. Genauigkeit der Datenaufzeichnung vom Messsystem (Datenlogger)

Die Genauigkeit und Plausibilität der DC-Messaufzeichnungen mittels Datenlogger ist die Ausgangsbasis, um richtige Aussagen tätigen zu können. Als Messsignal für den Vergleich dient (für den Datenlogger sowie dem Power Netzwerk Analysator) die obe-

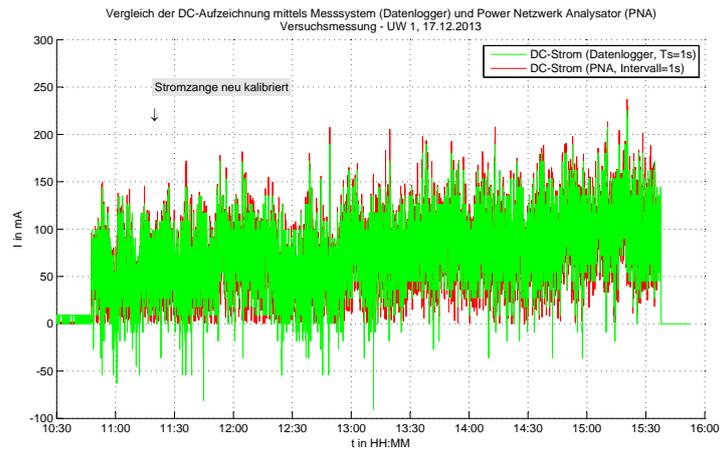
re Stromzange¹ in Abbildung 4.1. Infolgedessen wird die DC-Aufzeichnung vom Datenlogger mit den DC-Werten aus der Aufzeichnung vom Power Netzwerk Analysator verglichen. Dadurch kann auf eine korrekte Funktion des Messsystems rückgeschlossen werden.

Beschreibung der Durchführung des Datenvergleichs

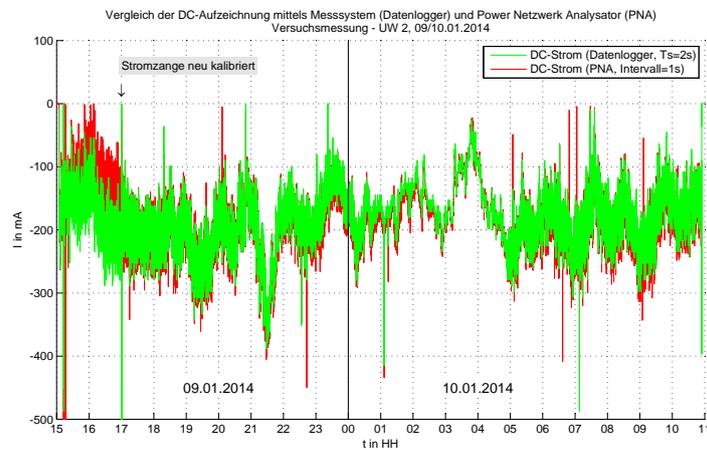
Mit Hilfe der Fouriertransformation werden die DC-Anteile aus der ungefilterten Aufzeichnung vom Power Netzwerk Analysator berechnet. Dabei wird jeweils für eine Länge von einer Sekunde (Intervalllänge) der Gleichstromanteil berechnet und abgespeichert. Dieser Vorgang wird für die gesamte Aufzeichnungsdauer (Signallänge) wiederholt. Danach können die DC-Werte, welche aus der Fouriertransformation berechnet wurden, mit der Aufzeichnung des DC-Transformatorsternpunktstromes vom Messsystem (Datenlogger) verglichen werden. (siehe Abbildung 4.13)

¹Ein Unterschied bei der Signalerfassung zwischen beiden Stromzangen konnte mit dem Power Netzwerk Analysator nicht festgestellt werden.

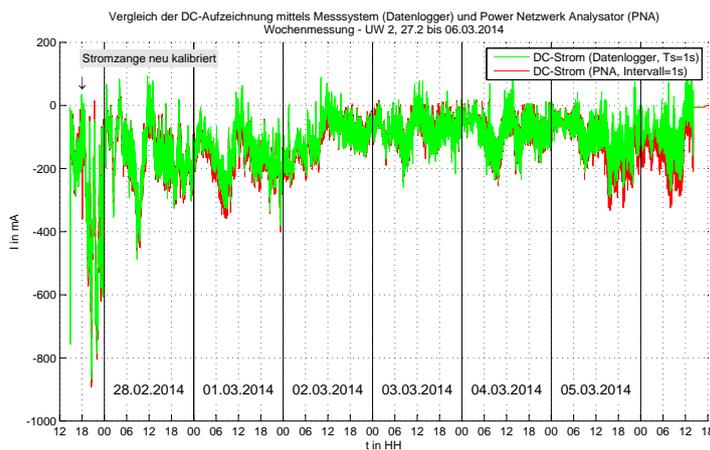
4. Praktische Sternpunktstrommessungen



(a) Versuchsmessung - UW 1



(b) Versuchsmessung - UW 2



(c) Wochenmessung - UW 2

Abbildung 4.13.: Vergleich der DC-Datenaufzeichnung an den Umspannwerken vom Datenlogger (grün) mit jenen vom Power Netzwerk Analysator, welche mittels Fouriertransformation berechnet wurden (rot). Es ist dabei auf die unterschiedliche Zeitachse zu achten.

Korrelation der DC-Transformatorsternpunktströme zwischen Messsystem (Datenlogger) und Power Netzwerk Analysator

Aus der Abbildung 4.13 ist zu erkennen, dass die DC-Transformatorsternpunktströme beinahe deckungsgleich sind. Es wird zusätzlich die Korrelation beider Ströme überprüft.

$$\begin{aligned}r_{UW1}^1 &= 0,94 \\r_{UW2}^2 &= 0,88 \\r_{UW2}^3 &= 0,95\end{aligned}$$

Damit ist die Plausibilität der Messaufzeichnung vom Messsystem (Datenlogger) gegeben. Die größere Abweichung zu Beginn in der Versuchsmessung UW 2 (Abbildung 4.13 (b)) ist darauf zurückzuführen, dass die Stromzangen unterschiedliche Temperaturniveaus besitzen und dadurch die Offsetspannung verschieden ist. Nach dem wiederholten Nullabgleich entspricht der DC-Transformatorsternpunktstrom dem realen Wert.

4.3.4. Analyse des DC-Transformatorsternpunktstromes

Als Basis zur Analyse bezieht man sich auf die grafischen Darstellungen von den Feldmessungen in den Umspannwerken, welche in den vorigen Abbildung 4.3, Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 dargestellt wurden. Aufgrund dieser Darstellungen lassen sich Aussagen über Polarität, typische Tagesprofile und Schwankungen des DC Transformatorsternpunktstromes treffen.

Polarität

Im direkten Vergleich der Umspannwerke ist erkennbar, dass die Ströme unterschiedliche Vorzeichen besitzen, welche den Richtungsfluss vorgeben. Im UW 1 geben die positiven Werte Aufschluss darüber, dass der Strom vom Sternpunkt des Transformators in das Erdreich fließt. Beim UW 2 besitzt der Strom hauptsächlich negatives Vorzeichen, was so viel bedeutet, dass der Strom vom Erdreich über den Sternpunkt in das Höchstspannungsnetz fließt. Interessant bei allen Messungen ist, dass sich sogar die Polarität des Gleichstromes während eines Tages umkehren kann.

¹Zeitraum: 11:00 Uhr bis 15:00 Uhr

²Zeitraum: 09.01.2014, 17:00 Uhr bis 10.01.2014, 10:00 Uhr

³Zeitraum: 27.02.2014, 15:00 Uhr bis 06.03.2014, 13:00 Uhr

Tagesprofil

Ausgangspunkt für die Tagesprofil-Analyse ist die Wochenmessung (siehe Abbildung 4.5). Wird diese Messung in Tagesabschnitten unterteilt, lassen sich daraus die Tagesstromverläufe miteinander vergleichen. Aus dieser Gegenüberstellung kristallisiert sich ein Tagesprofil für den DC-Transformatorsternpunktstrom heraus.

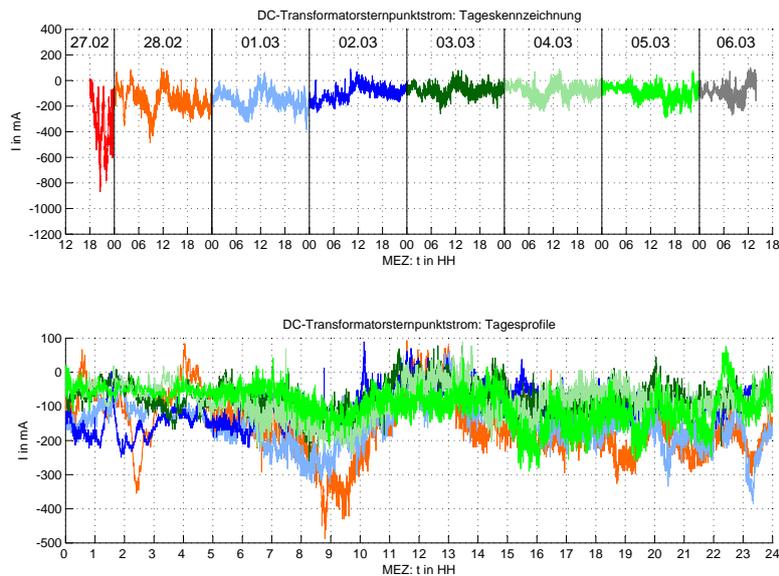


Abbildung 4.14.: Tagesprofil vom DC-Transformatorsternpunktstrom. Obiges Bild zeigt die farbliche Kennzeichnung der Tagesabschnitte der Wochenmessung. Im Bild darunter werden die DC-Ströme der einzelnen Messtage überlagert.

Fluktuation des DC-Transformatorsternpunktstromes

Bei der Wochenmessung ist eine hohe Betragsänderung vom Gleichstrom zwischen 100mA und 800mA innerhalb von Stunden, verglichen mit der Schwankung während der gesamten Wochenmessung, gegeben. Diese Fluktuation, welche in Abbildung 4.15 genauer dargestellt ist, konnte zunächst nicht plausibel begründet werden. Eine Erklärung dazu ergab sich erst später mit Hilfe der geomagnetischen Aktivität. (Siehe dazu Kapitel 4.3.5)

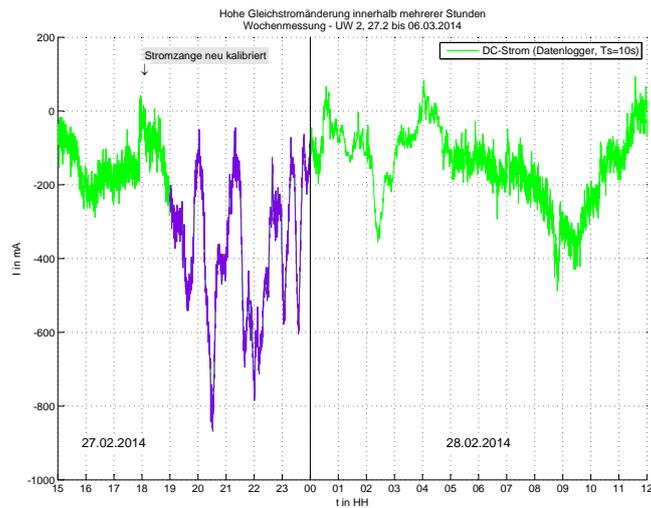


Abbildung 4.15.: Stunden-Fluktuation des Gleichstromes zwischen 19:00 und 24:00 Uhr (Violett) im Vergleich zur restlichen Messaufzeichnung.

Es lässt sich auch ein Unterschied in der Schwankung des DC-Stroms innerhalb von Minuten über den Tag feststellen. In der Zeit von 01:00 bis 05:00 Uhr in der Früh sind nur sehr geringe Schwankungen feststellbar. Während es im restlichen Tagesverlauf zu erheblichen Änderungen des Stromes von 50mA bis 100mA kommt. (Siehe Abbildung 4.14 und Abbildung 4.16)

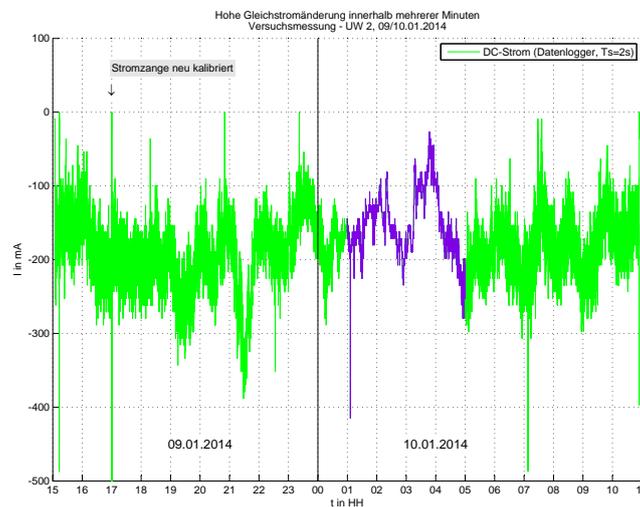


Abbildung 4.16.: Die Minuten-Fluktuation des Gleichstromes ist von 01:00 bis 05:00 Uhr (Violett) wesentlich geringer als im restlichen Tagesverlauf.

Periodische Anteile im DC-Transformatorsternpunktstrom

Im oberen Bild aus Abbildung 4.17 könnte man meinen, dass sich die Schwankungen im DC-Bereich nach einer gewissen Periodendauer wiederholen. Aus diesem Grund wird die DC-Messung des oberen Bildes (Fensterlänge = 5min) einer FFT unterzogen.

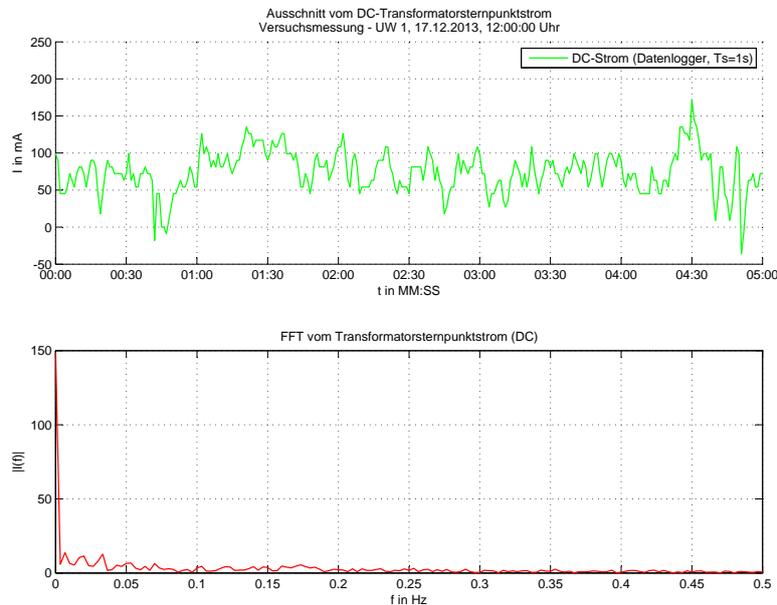


Abbildung 4.17.: Fouriertransformation vom DC-Transformatorsternpunktstrom. Im oberen Bild ein Ausschnitt der DC-Messung von 5 Minuten. Im unteren Bild ist die FFT aus dem obigen Fenster zu sehen.

Aus der FFT in Abbildung 4.17 ist nur das DC-Signal stark vertreten. Einen kleinen Anteil liefern auch Frequenzen von 0 bis 0,05Hz. Die restlichen Frequenzanteile haben keinen signifikanten Einfluss auf das Signal. Es kann daher von keiner Periodizität im DC-Signal ausgegangen werden.

4.3.5. Korrelation zwischen Erdmagnetismus und DC-Sternpunktstrom

In diesem Kapitel wird ein möglicher Zusammenhang zwischen dem Erdmagnetfeld und den DC-Strömen im Transformatorsternpunkt untersucht. Dabei werden die Aufzeichnungen über den Erdmagnetismus vom Conrad-Observatorium (ZAMG¹) mit jenen Werten vom Messsystem zum Vergleich herangezogen.

¹ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Erdmagnetismus

”Das Magnetfeld der Erde entsteht durch Dynamoprozesse im Erdkern und bildet einen Schutzschirm gegenüber energiereicher kosmischer und solarer Strahlung. Dieses Feld unterliegt jedoch kontinuierlichen Schwankungen in seiner Stärke und Richtung.” [13]

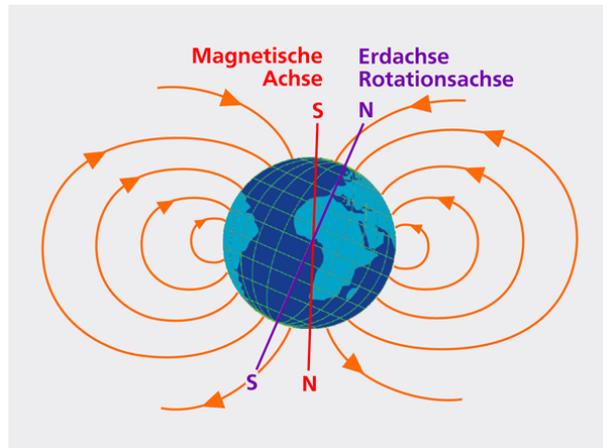


Abbildung 4.18.: Die magnetische Achse liegt nicht gleich wie die Rotationsachse der Erde. Sie kann sich im Laufe der Jahrzehnte und Jahrtausende anders ausrichten.

Quelle: <http://www.vitatec.com/grundlagen/einfluss-erdmagnetfeld>

Totalfeldstärke F

An Observatorien werden kontinuierlich die drei Komponenten des geomagnetischen Feldvektors aufgezeichnet. Aus diesen 3 Feldkomponenten berechnet sich der Gesamtbetrag der *magnetischen Flussdichte* oder auch *Totalfeldstärke F* des Erdmagnetfeldes genannt. [13]

K-Index

Der *lokale geomagnetische Aktivitätsindex K* gibt Auskunft über die *natürlichen geomagnetischen Störungen*, welche von solarer Partikelstrahlung ausgelöst werden. An den einzelnen Observatorien werden die Störungen aus den horizontalen Feldkomponenten berechnet. Dabei wird die Amplitude der am stärksten gestörten horizontalen Feldkomponente in einem Zeitintervall von drei Stunden (Differenz zwischen größten und kleinsten Messwert) gemessen. Vorher wird der ruhige Tagesgang aus dem Magnetogramm eruiert, was jedoch ein subjektives Verfahren darstellt. Im Anschluss kann die Amplitude in einen lokalen K-Index umgerechnet werden, welcher Werte zwischen 0 bis 9 auf einer quasi-logarithmischen Skala besitzt. Aufgrund der Tatsache, dass stationspezifisch die Werte der Häufigkeit des Auftretens von Störungen unterschiedlicher Stärke variieren, ist die Umrechnung mit der Häufigkeit der Störungen zu normalisieren. [14]

Tabelle 4.2.: Lokaler magnetischer Aktivitätsindex. Quelle: [13]

COBS K-Index	Magnetische Aktivität
0 - 3	schwach
4 - 6	mittel
> 6	stark

Mit Hilfe der Daten vom Erdmagnetfeld, welche vom Conrad-Observatorium zur Verfügung gestellt wurden, konnte die Feldverteilung des Erdmagnetismus nachgebildet werden. Aus dieser Aufzeichnung wird eine mögliche Relation zum Transformatorsternpunktstrom untersucht.

Versuchsmessung - UW 2

Am 08.01.2014 gab es eine größere Sonneneruption, welche zu einem vermehrten Ausstoß von geladenen Teilchen führte. Diese koronalen Massen können in den darauffolgenden Tagen auf das Erdmagnetfeld treffen und dieses stören. Laut Mitteilung seitens der ZAMG ist mit der höchsten Aktivität der magnetischen Stürme in Österreich am 09.01.2014 um ca. 16:00 Uhr Ortszeit² zu rechnen. Aus diesem Grund wurde eine Messung des Sternpunktstromes über einen Zeitraum von zwei Tagen im UW 2 veranlasst.

²Mitteleuropäische Zeit, MEZ = UTC + 1h

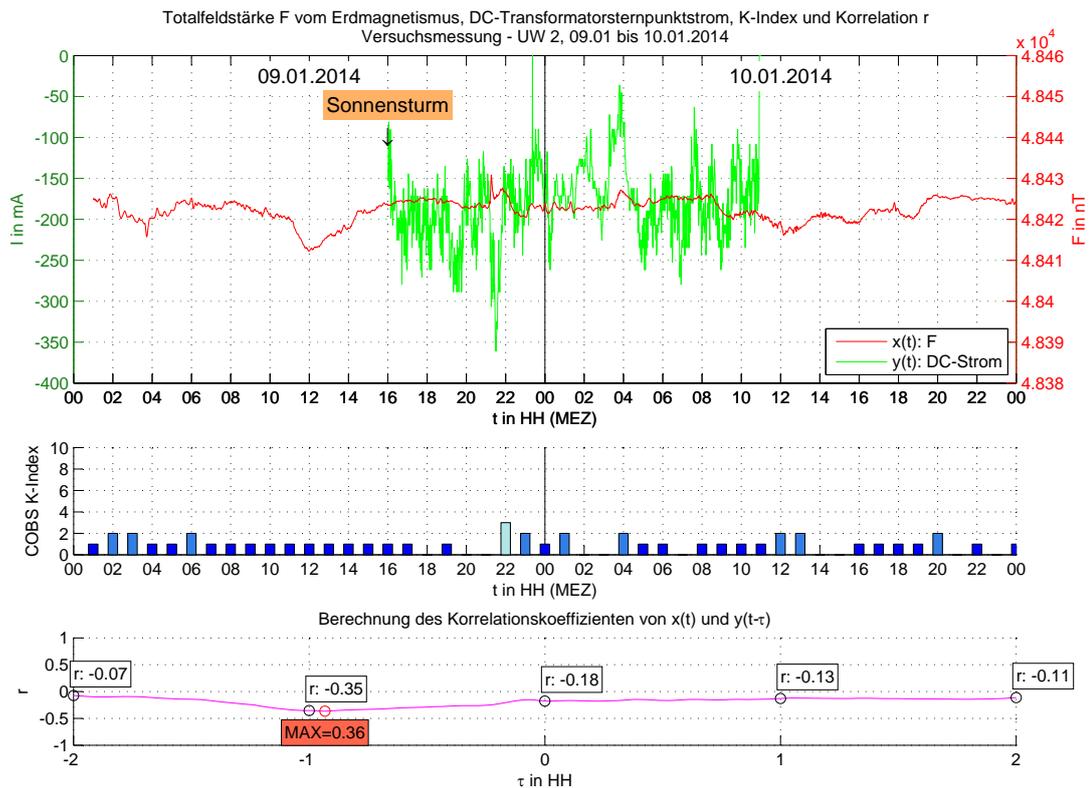


Abbildung 4.19.: Erdmagnetismus, DC-Transformatorstrom, COBS K-Index und Korrelation r während der Versuchsmessung im UW 2 beim Auftreffen eines Sonnensturms. Bild oben: Darstellung der Totalfeldstärke F sowie des DC-Transformatorsternpunktstromes im Intervall von 1min. Bild mitte: Angabe des COBS K-Aktivitätsindex über den beobachteten Zeitraum. Bild unten: Korrelationskoeffizient r zwischen Erdmagnetismus und DC-Sternpunktstrom mit der Verschiebung τ um $\pm 2h$.

Der Zeitraum für die Berechnung der Korrelationsfunktion vom Sternpunktstrom (DC) wird dabei zwischen 17:00 und 10:00 Uhr (entspricht einer Signallänge von 17 Stunden) definiert. Es wird der Strom, welcher als $y(t-\tau)$ festgelegt wurde, mittels Verschiebung τ um $\pm 2h$ gegen die Erdmagnetfeldfunktion horizontal verschoben, um Unterschiede in den verwendeten Messzeiten¹ auszugleichen. Der Zeitpunkt, wo $\tau = 0$ ist, wird als Startpunkt definiert. Die Schrittweite der Berechnungen liegt im Intervall von einer Minute. Der *Korrelationskoeffizient* r wird dabei über die gesamte Signallänge des Stromes und dem entsprechenden Teil des Erdmagnetfelds berechnet. (vgl. Formel 4.7)

Die Darstellung der Korrelationskoeffizienten im Diagramm weisen Berge und Täler im negativen Bereich auf, was eine Gegenphasigkeit der Signale bedeutet. Der maximale Absolutwert liegt bei 0,36. Keiner der r -Werte liegt über 0,7, was einen signifikanten

Zusammenhang ausschließt. Zudem kommt es im beobachteten Zeitraum der Versuchsmessung nur zu geringen Geoaktivitäten trotz Sonnensturm.

Wochenmessung - UW 2

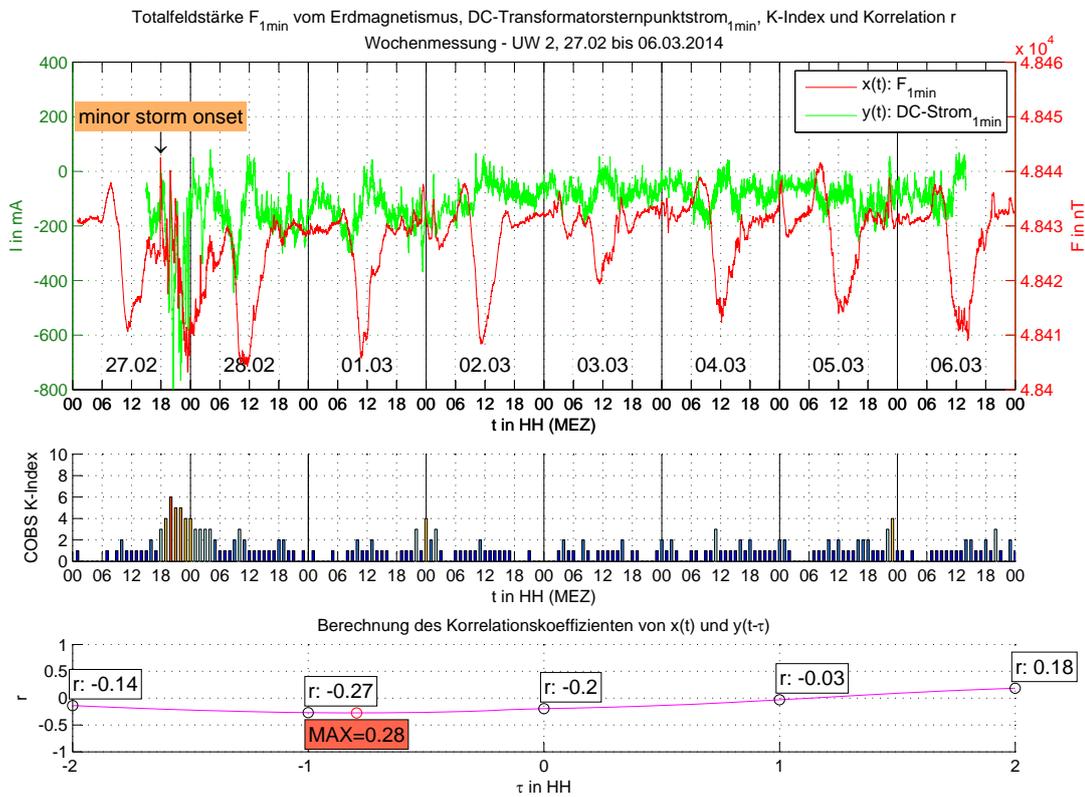


Abbildung 4.20.: Erdmagnetismus, DC-Transformatorstrom, COBS K-Index und Korrelation r während der Wochenmessung im UW 2. Auch hier tritt ein Sonnensturm in Erscheinung.

Bild oben: Darstellung der Totalfeldstärke F sowie des DC-Transformatorsternpunktstromes im Intervall von 1min.

Bild mitte: Angabe des COBS K-Aktivitätsindex über den beobachteten Zeitraum.

Bild unten: Korrelationskoeffizient r zwischen Erdmagnetismus und dem DC-Sternpunktstrom in der Zeit vom 01.03 bis 05.03 mit der Verschiebung τ um $\pm 2h$.

¹Zeitzone: UTC und MEZ

Am 27.02.2014 sind starke Schwankungen beim Transformatorstrom in der Zeit von 18:00 bis 00:00 Uhr zu erkennen. Diese Erscheinung konnte zuerst keiner Ursache zugeordnet werden. Wenn man die Aufzeichnungen vom COBS K-Index heranzieht, kann dieses Phänomen plausibel erklärt werden. Zu dieser Zeit gab es erhöhte Aktivität von solaren Stürmen ("minor storm"), die auf das Erdmagnetfeld wirkten. Wegen diesen Störungen kam zu starken Schwankungen des Erdmagnetismus, welche als Ursprünge der signifikanten Erhöhung des DC-Transformatorsternpunktstromes gelten.

Ableitung der Totalfeldstärke F des Erdmagnetfeldes

In der Zeit von 09:00 bis 11:00 Uhr kommt es zu täglichen Einbrüchen der Totalfeldstärke - zugleich bewirkt dies auch deutliche Änderungen im DC-Sternpunktstrom. Dieses Phänomen versucht man mittels Induktionsgesetz zu beschreiben.

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (4.9)$$

u_i Induzierte Spannung, [V]
 Φ Magnetischer Fluss, [Wb=Vs]

Zusammenhang zwischen Induktionsgesetz und DC-Transformatorsternpunktstrom:

$$u_{DC} = -\frac{dF}{dt} \quad (4.10)$$

$$I_{DC} = \frac{u_{DC}}{R_{DC}} \quad (4.11)$$

u_{DC} Induzierte Gleichspannung, [V]
 F Totalfeldstärke vom Erdmagnetfeld, [nT]
 I_{DC} Gleichstrom, [A]
 R_{DC} Gesamtwiderstand im Gleichstromkreis, [Ω]

Bevor die Ableitung des Feldes berechnet wird, werden zuerst die Kurven vom Magnetfeld sowie DC-Strom durch Mittelwertbildung (5 Minuten) geglättet. Daraus ergeben sich nicht so starke Schwankungen aus der Ableitung. Im Anschluss kann eine Korrelation von dF/dt und dem DC-Strom durchgeführt werden.

4. Praktische Sternpunktstrommessungen

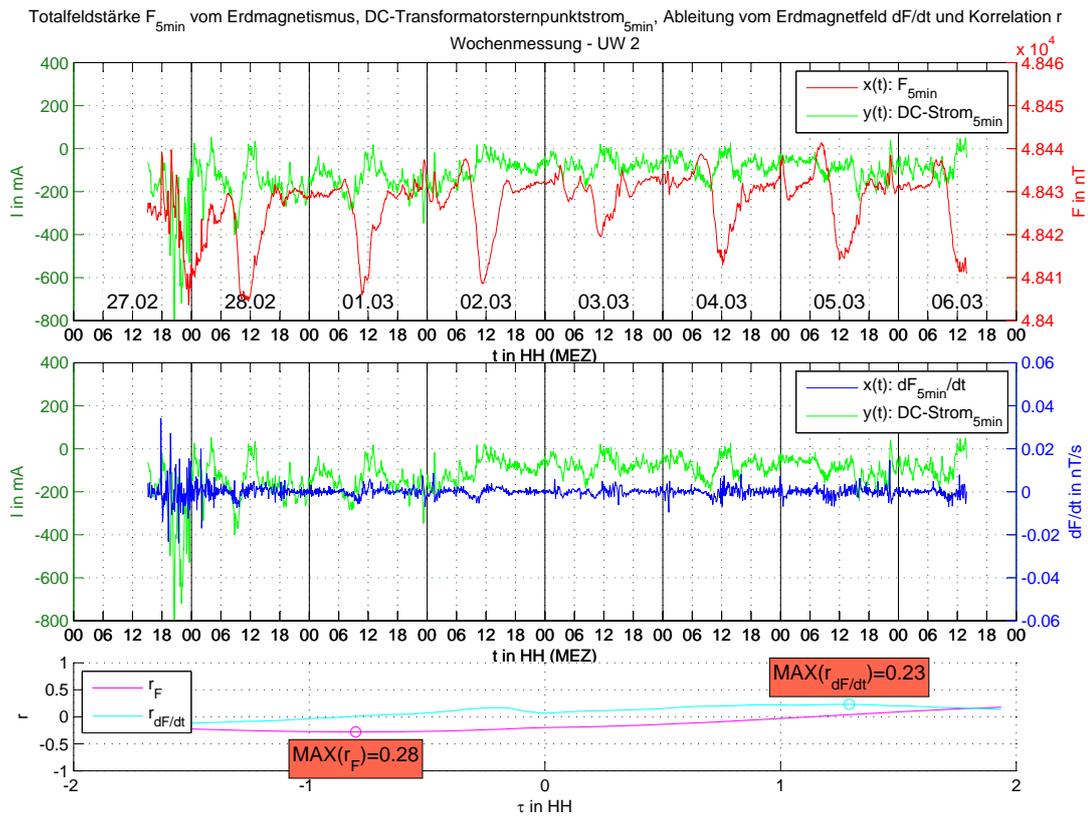


Abbildung 4.21.: Erdmagnetismus, DC-Transformatorstrom, Ableitung der Totalfeldstärke F und Korrelation r während der Wochenmessung im UW 2.
 Bild oben: Darstellung der Totalfeldstärke F sowie des DC-Transformatorsternpunktstromes bei 5 Minuten Glättung.
 Bild mitte: Ableitung von F und DC-Transformatorstrom.
 Bild unten: Korrelationskoeffizient r zwischen der Ableitung von F und dem DC-Sternpunktstrom in der Zeit vom 01.03 bis 05.03 mit der Verschiebung τ um $\pm 2h$.

Aus Abbildung 4.21 - mittleres Bild - ist die starke Schwankung des Magnetfelds eindeutig zu erkennen. Aus dem restlichen Verlauf kann keine zusätzlich neue Erkenntnis gewonnen werden. Zudem ist auch keine signifikante Korrelationssteigerung erkennbar.

Tagesprofil

Wenn der Tagesverlauf der Totalfeldstärke F vom Erdmagnetfeld näher betrachtet wird, ist auch hier ein Tagesprofil zu erkennen. Ein ähnliches, gespiegeltes Bild liefert auch die Aufzeichnung vom DC-Transformatorsternpunktstrom. (vgl. Abbildung 4.14)

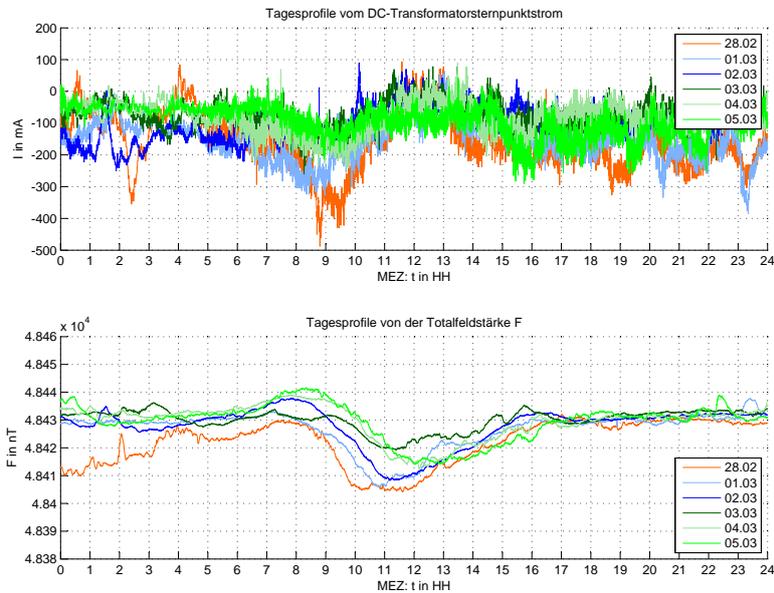


Abbildung 4.22.: Tagesprofil von der Totalfeldstärke F . Obiges Bild zeigt die farbliche Kennzeichnung der Tagesabschnitte bei der Wochenmessung. Im Bild darunter werden die Tages-Totalfeldstärken visuell miteinander verglichen.

5. Schlussfolgerung

Messsystem

Die Untersuchungen am entwickelten Messsystem zeigen, dass multifaktorielle Einflüsse unterschiedlich stark auf das System einwirken.

Die Problematik, eine sehr kleine Messgröße (Amplitude, Frequenz) von einer relativ großen Störgröße zu trennen, wurde mit einem passiven Tiefpassfilter 2. Ordnung gelöst.

Ein wesentlicher nicht zu vernachlässigbarer Aspekt ist die Temperaturabhängigkeit der Stromzange, welche im Labor nachgewiesen wird. Wenn über das ganze Jahr eine Messaufzeichnung veranlasst werden soll, kann ohne diese Berücksichtigung der Anschein erweckt werden, dass der Strom von den Jahreszeiten abhängig ist. Daher ist es ratsam, die Temperatur konstant zu halten oder zumindest über den Temperaturkoeffizienten auf den wahren Wert zu korrigieren. Im Versuchsaufbau wurde ein thermostatisch gesteuertes Heizelement in den Schaltschrank eingebaut.

Eine Beeinflussung des magnetischen Feldes auf die Stromzange sowie Datenlogger konnte nicht festgestellt werden, wodurch keine gesonderte Schirmung erforderlich ist.

Aus der Fehlerfortpflanzungsberechnung ist ersichtlich, dass der relative Fehler mit zunehmender Messgröße abnimmt.

Praktische Sternpunktstrommessung

Eine interessante Erkenntnis aus der AC-Aufzeichnung ist, dass sich nicht nur die Grundschwingungsfrequenz und deren Oberschwingungen im Transformatorsternpunkt wiederfinden, sondern auch die Bahnstromfrequenz (16,7Hz), diverse transiente Stromverläufe aus Schalthandlungen und Frequenzen der Rundsteuertechnik (720Hz) darin vorkommen.

Bei der *DC-Wochenmessung* ist ein *Tagesprofil* aus der Aufzeichnung zu erkennen. Angesichts der Messungen an örtlich verschiedenen Transformatoren ergeben sich unterschiedliche Gleichstromrichtungen. Zudem kann innerhalb eines Tages der Gleichstrom positive als auch negative Werte annehmen.

Des Weiteren ist die *Fluktuation* des DC-Transformatorsternpunktstromes über den Tagesverlauf nicht gleich. Die Minuten-Fluktuation ist in den frühen Morgenstunden ge-

ringer als im restlichen Tagesverlauf.

Wenn das DC-Signal in einem Zeitraum weniger Minuten betrachtet wird, hat es den Anschein, dass das Signal mit einer sehr niedrigen Frequenz ($<1\text{Hz}$) schwingt. Dies kann mittels FFT nicht bestätigt werden.

Erdmagnetismus

Die solaren Stürme haben nicht nur Einfluss auf den Erdmagnetismus, sondern spiegeln sich auch im gewissen Maße in den Übertragungsnetzen der Energieversorgung wider. Wenn die geomagnetische Aktivität hoch ist (K-Index > 4), hat dies Auswirkungen auf den Gleichanteil im Transformatorsternpunktstrom. Ist die geomagnetische Aktivität niedrig, bleibt ein DC-Offset von wenigen 100mA bestehen, dessen Ursprung in dieser Arbeit nicht erklärt werden konnte.

Wenn die beiden Tagesprofile vom DC-Transformatorsternpunktstrom und der Totalfeldstärke des Erdmagnetfeldes F miteinander verglichen werden, ergibt sich zumindest ein visueller Zusammenhang des Verlaufs. Die verwendete Korrelationsmethode widerlegt jedoch einen signifikanten Zusammenhang

Literaturverzeichnis

- [1] L. Fickert, *Grundlagen der elektrischen Energiesysteme*. Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2009.
- [2] A. Mütze, *Energiewandler*. Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen, TU Graz, 2010.
- [3] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme - Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Springer, 2012.
- [4] D. Zastrow, *Elektrotechnik*. Vieweg, 2000.
- [5] FEN, *Geomagnetically Induced Currents In The Swiss Transmission Network*. Research Centre for Energy Networks, ETH Zürich, 2013.
- [6] Polar Geophysical Institute. (05.02.2014). [Online]. Available: <http://eurisgic.org>
- [7] H. Renner and M. Sakulin, *Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit*. Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2008.
- [8] G. Kubin, *Signal Processing*. Signal Processing and Speech Communication Laboratory, TU Graz, 2008.
- [9] L. v. Wangenheim, *Analoge Signalverarbeitung*. Vieweg + Teubner, 2010.
- [10] G. Basseur, *Elektrische Messtechnik 1*. Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung, TU Graz, 2008.
- [11] L. Fickert and H. Renner, *Elektrische Energiesysteme 1*. Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2008.
- [12] G. Kirmse. (05.02.2014). [Online]. Available: www.rundsteuerung.de
- [13] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. (05.02.2014). [Online]. Available: <http://www.conrad-observatory.at>
- [14] GeoForschungsZentrum Helmholtz-Zentrum Potsdam. (15.05.2014). [Online]. Available: <http://www.gfz-potsdam.de>

A. Technische Daten der Messsystemkomponenten

A.1. CP 30 AC/DC Stromzange, GMC-I PROSyS

Allgemeine Daten

(Alle Werte gelten bei $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$)

Nennstrom I_n	$20AC_{eff}$ oder DC
Messbereich	0 bis $\pm 30A$
Allgemeine DC-Genauigkeit	$\pm 1\%$ vom Messwert $\pm 2mA$
Auflösung	$\pm 1mA$
Rauschen (typ.)	$200\mu V_{eff}$
Ausgangsempfindlichkeit .	$100mV/A$
Ansprechzeit	$< 1\mu s$
Betriebstemperatur	0°C bis $+50^{\circ}\text{C}$
Batterielebensdauer ...	30 Stunden (typisch)
Minimale Last	$> 100k\Omega$ und $\leq 100pF$

A.2. TGPR-1001 Tinytag, Gemini Data Loggers

Allgemeine Daten

Speicherkapazität .	64.000 Werte
Abtastintervall ..	1s bis 10Tage
Messbereich	0 bis 200mV DC
Maximale Spannung	500mV
Eingangsimpedanz	$> 10M\Omega$
Auflösung	0,8mV
Genauigkeit	$\pm 1mV \pm 0,5\%$ vom Messwert
Temperaturbereich	-40°C bis $+85^{\circ}\text{C}$

A.3. SK3107.000 Schaltschrank-Heizung, RITTAL

Allgemeine Daten

Dauerheizleistung (20°C)	130W
Versorgungsspannung .	230V
max. Temperaturbereich	+65°C ±5°C
Schutzart	IP40

B. Labormessung

B.1. Verwendete Geräte für magnetische Feldmessung im Labor

- Omicron CMC 256-6 (Stromversorgung Käfig)
- LTRONIX Power Supply B402
- EM Field Analyzer, WG EFA3 / BN 2245, Nr.: D-0008
- Amperemeter, FLUKE 177 True RMS Multimeter, Nr.: 15377-1
- CP 30AC/DC Stromzange, GMC-I PROSyS
- TGPR-1001 Tinytag, Gemini Data Loggers