

Mechanischer Aufbau und Erstinbetriebnahme eines Ringgitterprüfstandes

Matthias Karl Michael Tramšek

Masterarbeit

Technische Universität Graz
Fachbereich Maschinenbau

Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik
Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir

Betreuer:
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Emil Göttlich
Dipl.-Ing. Michael Steiner

Weiz, 07.06.2018



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere, als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert, sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Weiz, 07.06.2018

Ort und Datum

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Ramak', written over a horizontal line.

Unterschrift

GLEICHHEITSGRUNDSATZ

Um den Lesefluss nicht durch eine ständige Nennung beider Geschlechter zu stören, wird in dieser Arbeit ausschließlich die männliche Form verwendet. Dies impliziert aber immer auch die weibliche Form.

SPERRVERMERK

Diese Masterarbeit enthält vertrauliche Informationen und Daten der MTU Aero Engines AG, die der Geheimhaltung unterliegen. Diese Masterarbeit darf Dritten, mit Ausnahme der betreuenden Dozenten und den Mitgliedern des Prüfungsausschusses, ohne ausdrückliche Zustimmung der MTU Aero Engines AG nicht zugänglich gemacht werden. Veröffentlichungen oder Vervielfältigungen der Masterarbeit – auch nur auszugsweise – sind nicht gestattet.

Dieser Sperrvermerk gilt für 5 (fünf) Jahre nach Übergabe der Masterarbeit an die Hochschule.

DANKSAGUNG

Ich möchte mich in erster Linie ganz herzlich bei meinen beiden Betreuern Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Emil Göttlich und Dipl.-Ing. Michael Steiner bedanken, welche immer ein offenes Ohr für mich hatten, mir stets geduldig und zuvorkommend mit Rat und Tat zur Seite standen sowie meinen Horizont im Bereich der thermischen Turbomaschinen regelmäßig mit interessanten Hintergrundinformationen erweitert haben. Auch möchte ich den Herren Dipl.-Ing. Patrick Zeno Sterzinger, Fachoberinspektor Martin Haubehofer, Wolfgang Hirschl, Florian Plank, Julian Lederer und Philipp Triebel für ihre tatkräftige Unterstützung bei Arbeiten in der Werkstatt und am Prüfstand danken.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir für die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Institut im Rahmen einer geringfügigen Beschäftigung verfassen zu dürfen, und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Marn, der mich bereits bei meiner Bachelorarbeit betreut und mich für diese Masterarbeit vorgeschlagen hat, sowie meinem Arbeitgeber, der Fa. ELIN Motoren GmbH, für die Genehmigung einer entsprechenden Bildungskarenz.

Ich bedanke mich auch ganz herzlich bei meinen Eltern für die Ermöglichung dieses Studiums und dafür, dass sie mir immer den Rücken gestärkt haben, und möchte gleichzeitig auch die Gelegenheit ergreifen, um meiner langjährigen Freundin und Lebenspartnerin, Frau Mag. (FH) Birgit Adelman, einen ganz besonderen Dank für ihre bedingungslose Unterstützung und Geduld auszusprechen.

Ich möchte diese Masterarbeit meinem Vater widmen, Herrn Ing. Karl Michael Tramšek, der in mir die Leidenschaft für den Maschinenbau geweckt hat und mir von klein auf sowohl beruflich als auch menschlich stets ein großes Vorbild gewesen ist. Er hat mich selbst in schweren Zeiten tatkräftig dabei unterstützt, meinem Leben eine Richtung zu geben, und damit zu einem großen Teil den Mann geprägt, der ich heute bin. Danke für alles, Papa!

KURZFASSUNG

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit dem mechanischen Aufbau, der Instrumentierung und der Erstinbetriebnahme eines Prüfstandes zur experimentellen strömungsmechanischen Untersuchung von Turbinenübergangskanälen am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der Technischen Universität Graz. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit den industriellen Partnern General Electric (GE) und MTU Aero Engines durch das von der europäischen Union ins Leben gerufene Technologieprogramm ENOVAL (ENgine mOdule VALidators / Ultra High Bypass Ratio Aero Engines) ermöglicht.

Dieser Prüfstand, auch als Ringgitterkaskade bezeichnet, wird von der institutseigenen Verdichteranlage kontinuierlich mit Luft versorgt. Zur Gewährleistung einer ungestörten stationären Zuströmung wird der Luftstrom in einer Beruhigungskammer mit Lochblech gleichmäßig, bevor er über eine entsprechend ausgeformte Einlaufkontur in einen Ringquerschnitt übergeführt wird, um anschließend den Ringraum zu durchströmen. Die Flexibilität der Ringgitterkaskade erlaubt den Einbau von Turbinenübergangskanälen bzw. Triebwerkskomponenten unterschiedlicher Länge und damit gleichzeitig auch die Realisierung von verschiedenen Zuströmbedingungen sowie den Einsatz einer großen Vielfalt an Messtechnik. Im Zuge der Erstinbetriebnahme wird die Betriebspunktseinstellung und Initialmessung an einem „State-of-the-Art-Turbinenübergangskanal“ bei ungestörter stationärer Zuströmung mit vorgelagerten Vorleitschaufeln behandelt.

Diese Arbeit stellt im Endeffekt eine umfassende Dokumentation des mechanischen Aufbaus dar und verifiziert die Eignung des Prüfstandes für die weiterführenden aerodynamischen Untersuchungen.

ABSTRACT

The present thesis deals with the mechanical assembly, instrumentation and initial commissioning of a test rig for the experimental fluid dynamic investigation of intermediate turbine ducts at the Institute of Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics of the Graz University of Technology. The realization of this project with the collaboration of the industrial partners General Electric (GE) and MTU Aero Engines was enabled by the European Union's technology program ENOVAL (ENgine mOdule VALidators / Ultra High Bypass Ratio Aero Engines).

The test rig, also named annular cascade, is continuously supplied with air from the institute's compressor station. To ensure a clean inflow the airflow is firstly led through a settling chamber equipped with a perforated plate before entering the annular cross section formed by an appropriate inlet contour. The flexibility of the annular cascade provides the installation of intermediate turbine ducts or other aero engine components of different lengths. It allows the realization of different inflow conditions and the use of a great variety of measurement technologies. For the commissioning the operating point setting and the initial measurement are discussed for a "state-of-the-art intermediate turbine duct" with a stationary clean inflow and inlet guide vanes upstream of the duct.

The main results of this thesis are a comprehensive documentation of the mechanical assembly and the verification of the test rig's technical capability for further aerodynamic investigations.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 | PROBLEMSTELLUNG | 5 |
| 1.2 | AUFGABENSTELLUNG | 6 |
| 2 | THEORETISCHE GRUNDLAGEN | 7 |
| 2.1 | MASCHINENAUSRICHTUNG | 7 |
| 2.1.1 | Begriffsdefinition | 7 |
| 2.1.2 | Ausrichtgrößen | 8 |
| 2.1.3 | Ausrichtmethoden | 9 |
| 2.1.3.1 | Erkennung und Beseitigung vom Kippfuß | 9 |
| 2.1.3.2 | Doppelradial-Messuhrenverfahren | 10 |
| 2.1.3.3 | Radial-Axial-Messuhrenverfahren | 13 |
| 2.2 | GRUNDLEGENDE AERODYNAMIK IN EINEM TURBINENÜBERGANGSKANAL | 15 |
| 2.3 | GESTALTUNGSKRITERIEN FÜR DIE EINGESETZTEN MESSSONDEN | 21 |
| 2.4 | MESSUNSICHERHEIT | 23 |
| 2.4.1 | Grundbegriffe | 23 |
| 2.4.2 | Charakteristika der Ringgitterkaskade | 25 |
| 2.5 | MACHZAHLÄHNLICHKEIT | 27 |
| 3 | VERSUCHSEINRICHTUNG UND PRÜFSTANDSAUFBAU | 30 |
| 3.1 | VERDICHTERANLAGE AM INSTITUT FÜR THERMISCHE TURBOMASCHINEN | 30 |
| 3.2 | RINGGITTERKASKADE | 32 |
| 3.2.1 | Vorbereitungsarbeiten | 34 |
| 3.2.1.1 | Beruhigungskammer | 34 |
| 3.2.1.2 | Abluftrohr | 36 |
| 3.2.1.3 | Beweglicher Rahmen | 37 |
| 3.2.2 | Auslaufbereich | 42 |
| 3.2.2.1 | Lagermontage | 43 |
| 3.2.2.2 | Instrumentierung der Wanddruckröhrchen | 44 |
| 3.2.2.3 | Vervollständigung der Innenkontur | 44 |
| 3.2.2.4 | Transport zum Prüfstand | 46 |
| 3.2.2.5 | Koppelung mit dem Abluftrohr | 48 |
| 3.2.2.6 | Montage der thermischen Zentrierung | 49 |
| 3.2.2.7 | Abdichtung der Innenkontur und Durchziehen von Messleitungen | 50 |
| 3.2.3 | Mittelteil | 52 |
| 3.2.3.1 | Aufbau des Niederdruckbereichs | 52 |
| 3.2.3.2 | Montage des Turbinenübergangskanals | 60 |
| 3.2.3.3 | Spaltkontrolle und mögliche Abhilfemaßnahmen | 65 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.2.4 | Einlaufbereich | 67 |
| 3.2.4.1 | Aufbau der Einlaufkontur und Montage des Hochdruckstators | 68 |
| 3.2.4.2 | Spaltkontrolle und Schließen des Prüfstandes..... | 71 |
| 3.2.5 | Ausrichtung..... | 74 |
| 3.2.5.1 | Grobausrichtung..... | 74 |
| 3.2.5.2 | Feinausrichtung..... | 82 |
| 4 | MESSTECHNIK..... | 84 |
| 4.1 | SONDENBAU | 84 |
| 4.1.1 | Totaldruck- und Totaltemperatursonden..... | 84 |
| 4.1.2 | Grenzschichtkämme | 91 |
| 4.2 | KALIBRIERUNG..... | 92 |
| 4.3 | INSTRUMENTIERUNG | 94 |
| 4.3.1 | Planung und Umsetzung | 97 |
| 4.3.2 | Messebenen A und B1 | 100 |
| 4.3.3 | Messebene B0..... | 102 |
| 4.3.4 | Messebene B..... | 104 |
| 4.3.5 | Messebene C..... | 105 |
| 4.3.6 | Messebene D | 106 |
| 4.3.7 | Diffusor | 107 |
| 4.4 | DATENERFASSUNG UND –VERARBEITUNG | 108 |
| 5 | INBETRIEBNAHME UND INITIALMESSUNG | 112 |
| 5.1 | INBETRIEBNAHME UND BETRIEBSPUNKTEINSTELLUNG | 112 |
| 5.1.1 | Aero Design Point (ADP) der Ringgitterkaskade..... | 112 |
| 5.2 | INITIALMESSUNG | 115 |
| 5.2.1 | Messraster | 115 |
| 5.2.2 | Bewertung der Qualität der Zuströmung..... | 117 |
| 5.2.3 | Ermittlung vom TCF-Druckverlust | 121 |
| 5.2.4 | Bewertung der Güte vom Austrittsdiffusor..... | 127 |
| 5.2.5 | Darstellung des Anlagendruckverlaufs | 130 |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... | 132 |
| 7 | QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS..... | 133 |
| 8 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... | 135 |
| 9 | TABELLENVERZEICHNIS..... | 141 |
| 10 | ANHANG | 142 |

NOMENKLATUR¹

EINHEITEN

| | | | |
|------------|------|-----------------|---|
| Druck | Pa | „Pascal“ | $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ |
| | bar | „Bar“ | $1 \text{ bar} = 1000 \text{ mbar} = 100\,000 \text{ Pa}$ |
| | mbar | „Millibar“ | $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$ |
| Energie | J | „Joule“ | $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ |
| Frequenz | Hz | „Hertz“ | $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ |
| Kraft | N | „Newton“ | $1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ |
| Länge | m | „Meter“ | $1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$ |
| | mm | „Millimeter“ | |
| Leistung | W | „Watt“ | $1 \text{ W} = 1 \text{ J}/\text{s} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{s} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$ |
| Masse | kg | „Kilogramm“ | |
| Temperatur | K | „Kelvin“ | |
| | °C | „Grad Celsius“ | $0 \text{ °C} = 273,15 \text{ K}$ |
| Winkel | rad | „Radian“ | Bogenmaß = Gradmaß $\cdot 2\pi/360^\circ$ |
| | ° | „Grad“ | |
| Zeit | s | „Sekunden“ | $1 \text{ s} = 1000 \text{ ms}$ |
| | ms | „Millisekunden“ | |
| | min | „Minuten“ | $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$ |
| | h | „Stunden“ | $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$ |

LATEINISCHE SYMBOLE

| | | |
|-----------------------------------|----------------|---|
| <i>a</i> | m/s | Schallgeschwindigkeit |
| <i>b</i> | m | Breite |
| <i>A</i> | m ² | Fläche, Querschnitt |
| <i>A_R</i> | | Flächenverhältnis (Area Ratio) |
| <i>c</i> | m/s | Geschwindigkeit, Absolutgeschwindigkeit |
| <i>C</i> | m | Abstand |
| <i>c_p</i> | J/(kg·K) | spezifische isobare Wärmekapazität |
| <i>C_p</i> | | Druckbeiwert, Druckrückgewinn |
| <i>C_p[*]</i> | | maximaler Druckrückgewinn bei gegebenem dimensionslosen Verhältnis von Diffusorlänge zu Eintrittskanalhöhe |
| <i>C_p^{**}</i> | | maximaler Druckrückgewinn bei gegebenem dimensionslosen Diffusor-Flächenverhältnis von Austritt zu Eintritt |
| <i>c_v</i> | J/(kg·K) | spezifische isochore Wärmekapazität |
| <i>d, D</i> | m | Durchmesser, Abstand |
| <i>e</i> | (z.B. Pa) | Messabweichung |
| <i>f</i> | (z.B. Pa) | beliebige Funktion |

¹ Symbole und Indizes können sowohl unterschiedliche Bezeichnungen als auch (abhängig vom Kontext) unterschiedliche Bedeutungen haben, welche hier zusammengefasst angegeben und mit Hilfe des Satzzeichens Komma bzw. Beistrich (,) getrennt werden.

| | | |
|------------------|-------------------------|---|
| h | J/kg | spezifische Enthalpie |
| | m | Höhe, Kanalhöhe |
| F | N | Kraft |
| L | m | Länge |
| \dot{m} | kg/s | Massenstrom |
| \dot{m}_{corr} | kg/s | korrigierter Massenstrom |
| \dot{m}_{red} | (kg \sqrt{K})/(Pa.s) | reduzierter Massenstrom |
| Ma | | Mach-Zahl |
| n | 1/s | Drehzahl |
| N | | Anzahl der Messwerte |
| p | Pa | (statischer) Druck |
| P | Pa | statischer Druck (Schreibweise mit Sondenbezug) |
| p_t | Pa | Total- bzw. Gesamtdruck |
| PT | Pa | Totaldruck (Schreibweise mit Sondenbezug) |
| q | Pa | dynamischer Druck (Staudruck) |
| r | | Recovery-Faktor |
| r, R | m | Radius |
| R | J/(kg.K) | (spezifische) Gaskonstante (z.B. 287,1 J/(kg.K) für Luft) |
| s | m | Abstand |
| | (z.B. Pa) | empirische Standardabweichung |
| t | °C | (statische) Temperatur |
| T | K | (statische) Temperatur |
| T_t | K | Totaltemperatur |
| TT | K | Totaltemperatur (Schreibweise mit Sondenbezug) |
| u | m/s | Umfangsgeschwindigkeit |
| | (z.B. Pa) | Messunsicherheit |
| v | m ³ /kg | spezifisches Volumen |
| w | J/kg | spezifische Arbeit |
| x | m | horizontale Verschiebung, lokale Achsposition |
| | (z.B. Pa) | Messwert |
| \bar{x} | (z.B. Pa) | arithmetischer Mittelwert von Messwerten |
| X | (z.B. Pa) | Messergebnis |
| y | m | vertikale Verschiebung |
| | (z.B. Pa) | indirekter (berechneter) Messwert |

GRIECHISCHE SYMBOLE

| | | |
|------------------|------------|---|
| α (alpha) | ° bzw. rad | Gierwinkel (Yaw Angle) |
| Δ (Delta) | | Differenz, Änderung |
| η (eta) | | Wirkungsgrad |
| κ (kappa) | | Isentropenexponent |
| μ (my) | | Bypass- oder Nebenstromverhältnis, Erwartungswert |
| ω (omega) | rad/s | Winkelgeschwindigkeit |

| | | |
|------------------|-------------------|--|
| φ (phi) | | Strömungskoeffizient, Lieferzahl, Durchsatz- oder Förderziffer |
| | ° | Traversierwinkel |
| π (pi) | | Kreiszahl ($\approx 3,14159$) |
| π_{tot} | | Gesamtdruckverhältnis |
| ψ (psi) | | Stufenbelastungskoeffizient, Druck- oder Leistungsziffer |
| ρ (rho) | kg/m ³ | Dichte bzw. spezifische Masse |
| σ (sigma) | (z.B. Pa) | Standardabweichung |
| Θ (Theta) | ° | Winkel mit ALF-Konvention |

INDIZES

| | |
|----------|---|
| 0 | Ansaugzustand vom Triebwerk, 0:00 Uhr bzw. 12:00 Uhr, Standardzustand |
| 1 | Eintrittszustand, Zustand am Laufradeintritt, Zustand am TCF-Eintritt |
| I | Primär- oder Hauptstrom durch das Kerntriebwerk, Tag I |
| 2 | Austrittszustand, Zustand am Laufradaustritt, Zustand am TCF-Austritt |
| II | Sekundär- oder Nebenstrom durch den Bypass, Tag II |
| 3 | 3:00 Uhr |
| 6 | 6:00 Uhr |
| 9 | 9:00 Uhr |
| A | Axial, Planlauf, außen |
| abs | absolut |
| AMU | axiale Messuhr (Planlauf) |
| atm | atmosphärisch |
| ax | axial |
| b | bekannt |
| corr | korrigiert |
| D | Durchhang, Diffusor |
| E | berichtigt, evaluiert |
| Fan | Fan, Bläser |
| geom | geometrisch |
| ges | gesamt |
| HK | horizontale Klaffung |
| HV | horizontaler Versatz |
| i, I | innen |
| L | links |
| m | meridional, Mitten- oder Meridianschnitt, Mittelwert |
| M | mobil, beweglich, einstellbar |
| mean | gemittelt |
| meas | gemessen (engl.: measured) |
| n | Normzustand |
| ω | zentrifugal |
| p | Druck |
| r | zufällig (engl.: random) |

| | |
|----------|---|
| R | rechts, radial, Rundlauf, Ratio (Verhältnis), richtig |
| red | reduziert |
| ref | Referenz |
| RMU | radiale Messuhr (Rundlauf) |
| s | systematisch |
| S | stationär (unbewegliches Bauteil) |
| Schaufel | Schaufel allgemein |
| St | Stufe |
| t | Totalzustand |
| T | Turbine |
| u | tangential am Umfang, unbekannt |
| v | Volumen |
| V | Verlust |
| VK | vertikale Klaffung |
| VV | vertikaler Versatz |
| W | wahr |

ABKÜRZUNGEN

| | |
|----------|--|
| ADP | Aero Design Point |
| Aft, AFT | hinten |
| AIDA | Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics |
| ALF | Aft Looking Forward (Blick stromaufwärts): Falls nicht anders angegeben, werden Winkel positiv im Uhrzeigersinn angegeben, wobei der Ausgangswinkel 0° bei 0:00 bzw. 12:00 Uhr liegt. |
| AnCa | Annular Cascade (Ringgitterkaskade) |
| BDE | Betriebsdatenerfassung |
| BK | Brennkammer |
| bspw. | beispielsweise |
| Bwd, BWD | hinten (engl.: Backward) |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| CRIO | Compact Reconfigurable Input Output |
| CCW | Counter-Clockwise (gegen den Uhrzeigersinn) |
| CW | Clockwise (im Uhrzeigersinn) |
| DAQ | Data Acquisition (= Datenerfassung) |
| DC | Direct Current (= Gleichstrom) |
| DFS | Deutsche Flugsicherung |
| d.h. | das heißt |
| EIS | Entry Into Service |
| engl. | englisch |
| ENOVAL | ENgine mOdule VALidators / Ultra High Bypass Ratio Aero Engines |
| FHP | Five Hole Probe |
| FLA | Forward Looking Aft (Blick stromabwärts): Falls nicht anders angegeben, werden Winkel positiv im Uhrzeigersinn angegeben, wobei der Ausgangswinkel 0° bei 0:00 bzw. 12:00 Uhr liegt. |

| | |
|----------|---|
| FLS | Fünflochsonde |
| FPGA | Field Programmable Gate Array |
| Fwd, FWD | vorne (engl.: Forward) |
| HD | Hochdruck |
| HDT | Hochdruckturbine |
| HDV | Hochdruckverdichter |
| HP | Hochdruck (engl.: High Pressure) |
| HPT | Hochdruckturbine (engl.: High Pressure Turbine) |
| IFR | Instrument Flight Rules |
| IO | Input-Output (= Eingabe-Ausgabe) |
| ISA | International Standard Atmosphere (Normatmosphäre) |
| ITD | Intermediate Turbine Duct |
| ITTM | Institute of Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik |
| LabVIEW | Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench |
| LAN | Local Area Network |
| LDA | Laser-Doppler-Anemometrie |
| LP | Niederdruck (engl.: Low Pressure) |
| LPT | Niederdruckturbine (engl.: Low Pressure Turbine) |
| lt. | laut |
| ND | Niederdruck |
| NDT | Niederdruckturbine |
| NDV | Niederdruckverdichter |
| NI | National Instruments |
| o.a. | oben angeführt(e) |
| PC | Personal Computer |
| s.g. | so genannt(e) |
| SLM | Selektives Laserschmelzen |
| TCF | Turbine Center Frame |
| TTTTF | Transonic Turbine Test Facility |
| TU | Technische Universität |
| TUG | Technische Universität Graz |
| u.U. | unter Umständen |
| VI | Virtual Instrument (= Virtuelles Instrument) |
| WEZ | Wärmeeinflusszone |
| z.B. | zum Beispiel |

SCHALTZEICHEN



Elektromotor (Antriebsmaschine)



Schraubenverdichter



Turboverdichter (hier: Radialkompressor)



Kupplung



Absperrklappe



Absperrarmatur



Absperrarmatur, manuell betätigt



Wärmeübertrager, Kühler



Druckluftbehälter



Druckmessgerät, Manometer



Temperaturmessgerät, Thermometer

1 EINLEITUNG

Der Flugverkehr ist aus unserer heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Ob ein von einem Wiener Unternehmen kurzfristig anberaumtes Business-Meeting mit wichtigen Geschäftspartnern in New York (Distanz: ca. 6.800 km, Flugzeit: ca. 8½ Stunden, Zeitzonendifferenz: -6 Stunden) oder ein in Frankfurt gebuchter Last Minute Urlaubsflug nach Singapur (Distanz: ca. 10.300 km, Flugzeit: ca. 12½ Stunden, Zeitzonendifferenz: +7 Stunden), permanent verfügbare und vor allem flexible Mobilität über weite Strecken bei kurzer Reisezeit zu günstigen Preisen ist mittlerweile zu einem selbstverständlichen Grundbedürfnis geworden.

Seit dem Jahr 1996 verzeichnet der Luftverkehr in Deutschland ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 2 % (siehe Abbildung 1.1). Im Jahr 2016 lag das Wachstum gegenüber dem Vorjahr bei ca. +2,6 % und damit leicht unter dem Schnitt aller 28 EU-Mitgliedsstaaten (+3,1 %). Absolut gab es 2016 lt. der europäischen Flugsicherungsbehörde EUROCONTROL insgesamt ca. 9,21 Millionen Flüge, wobei Deutschland auch dank seiner zentralen Lage mit seinen ca. 3,11 Millionen kontrollierten IFR-Flügen (Flüge nach Instrumentenregeln) knapp über 30 % des Flugverkehrs im europäischen Luftraum abgefertigt hat. Im Februar 2017 wurde von EUROCONTROL in Bezug auf das Jahr 2016 ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 1,8 % für den europäischen Luftverkehr bis 2023 prognostiziert.²

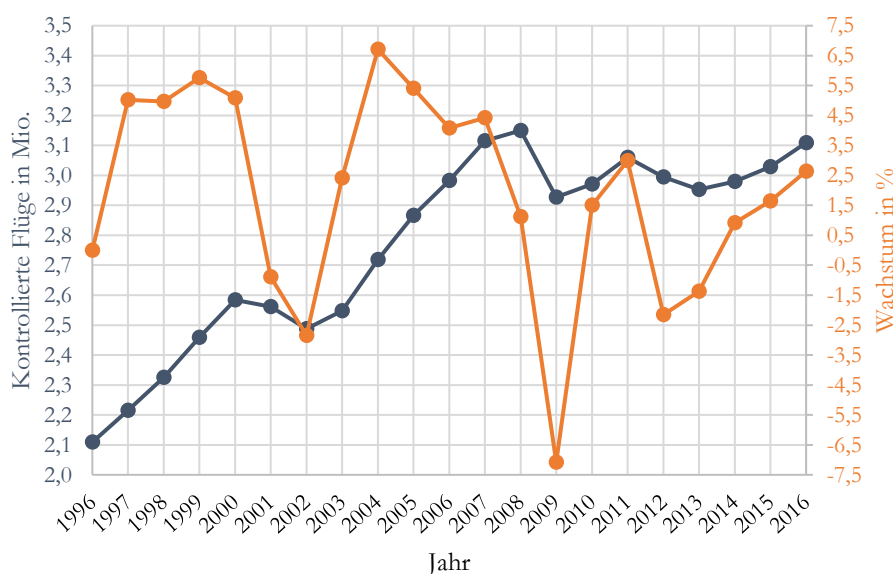


Abbildung 1.1: Langjährige Verkehrsentwicklung im deutschen Luftraum, Quelle: DFS (2016), S. 6, Onlinequelle [02.04.2018] (modifiziert).

Anhand dieser Zahlen wird einerseits deutlich, dass den bereits in der heutigen Zeit äußerst wichtigen Themen wie Flugsicherheit, Umwelt- und Lärmbelastung sowie Kraftstoffeinsparung auch in Zukunft erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Andererseits gehört der Triebwerksbau dank seiner Inanspruchnahme nahezu sämtlicher Disziplinen im Fachbereich Maschinenbau (Strömungsmechanik, Thermodynamik, Festigkeitslehre, Werkstoffkunde, etc.) im wahrsten Sinne des Wortes zu dessen Königsdisziplin bei einem gleichzeitig äußerst konservativen Verhalten

² Vgl. DFS (2016), S. 5ff, Onlinequelle [02.04.2018].

in Bezug auf die Einführung neuer Technologien. Und das aus gutem Grund, wenn man bedenkt, wie viele Menschenleben von der einwandfreien Funktionalität der im Einsatz befindlichen Flugzeugtriebwerke abhängen.

Die Hauptkomponenten eines modernen Zweistrom- bzw. Turbofan-Triebwerks im Bereich der zivilen Luftfahrt sind in Abbildung 1.2 am Beispiel des GP7000-Triebwerks dargestellt. Dabei handelt es sich konkret um den s.g. Fan (Bläser), hinter dem sich der Luftstrom in den Primärkreis durch das Kerntriebwerk und in den Sekundärkreis durch den Bypass aufteilt, den Niederdruckverdichter (NDV) oder Booster, den Hochdruckverdichter (HDV), die Ringbrennkammer (BK), die Hochdruckturbinen (HDT), die Niederdruckturbinen (NDT) und die Schubdüse. Mit Ausnahme der Fa. Rolls Royce, welche auf ein Dreiwellenkonzept setzt (zusätzliche Mitteldruckwelle für den Booster), werden i.d.R. die Triebwerke der anderen renommierten Hersteller mit einem Zweiwellenkonzept ausgeführt, bei dem die Hochdruckturbinen den auf der gemeinsamen Hochdruckwelle sitzenden Hochdruckverdichter antreibt und die Niederdruckturbinen die mit ihr auf der Niederdruckwelle laufenden Komponenten Fan und Booster. Das hier dargestellte Triebwerk hat eine Gesamtlänge von 4,75 m, ein Bypassverhältnis von 8,7 (Fan-Durchmesser: Ø2,96 m), ein Gesamt-Verdichterdruckverhältnis von 45,6 und entwickelt einen Maximalschub von 311 kN (56 kN in 11 km Reiseflughöhe).³ Es wurde im Rahmen des Joint Ventures Engine Alliance als gemeinsames Projekt von den Firmen MTU Aero Engines, General Electric (GE) und Pratt & Whitney (PW) ab 1998 entwickelt und hatte seinen „Entry Into Service“ (EIS) im August 2008 in Form des Serienmodells GP7270 als Triebwerk für den Airbus A380-800.

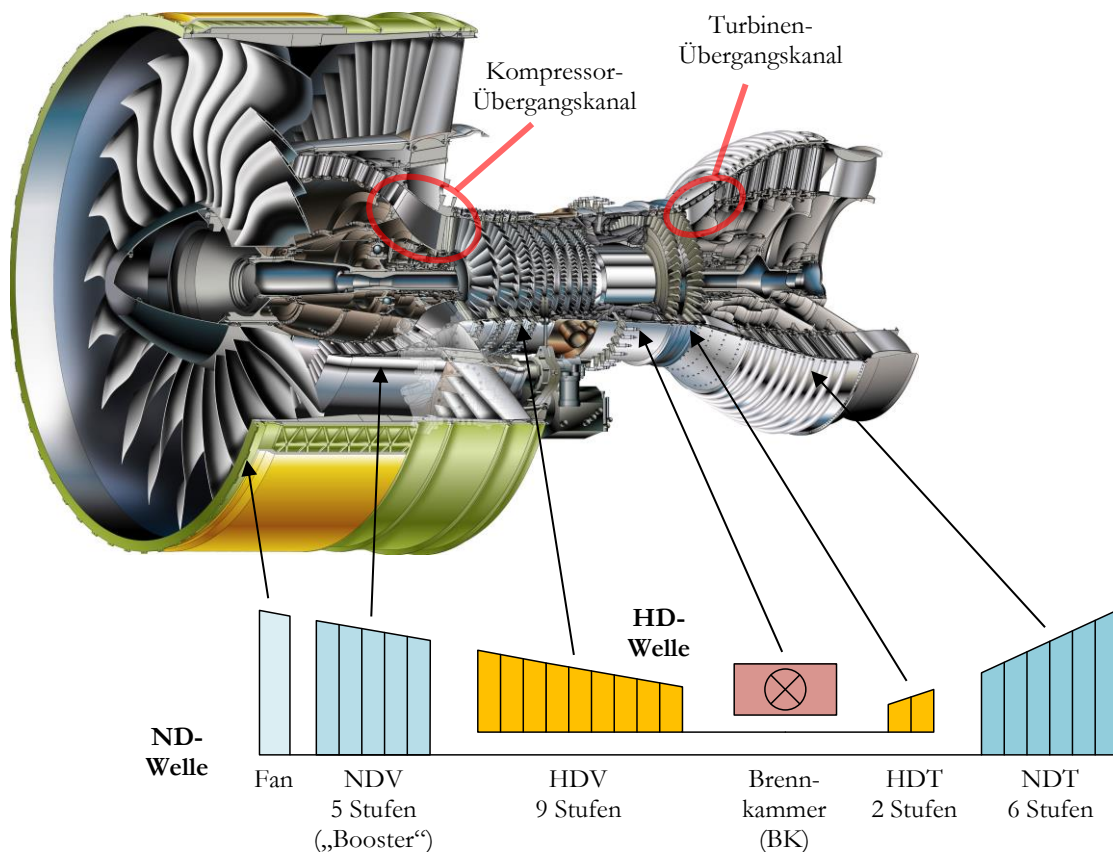


Abbildung 1.2: Zweiwellen-Fan-Triebwerk GP7000 von Engine Alliance, Quelle: <https://www.extremnews.com/images/full-af3e198c90daf36220c7d4a3e8cfbee4.jpg>, Onlinequelle [02.04.2018] (modifiziert).

³ Vgl. Bräunling (2009), S. 52.

Bei einem Turbofan-Triebwerk wird der wie ein ummantelter Propeller aussehende Fan, auch Bläser genannt, wie bereits zuvor erwähnt von der Niederdruckturbine angetrieben. Hinter dem Fan teilt sich der angesaugte Luftmassenstrom \dot{m}_0 in den Hauptstrom durch das Kerntriebwerk (Primärkreis) \dot{m}_I und den Nebenstrom (Sekundärkreis) \dot{m}_{II} auf, welcher außen am Mantel des Kerntriebwerks vorbeigeführt wird und sich erst wieder am Düsenaustritt mit dem austretenden Heißgas vermischt. Das Verhältnis dieser beiden Luftmassenströme wird auch als s.g. Bypassverhältnis $\mu = \dot{m}_{II}/\dot{m}_I$ bezeichnet. Dadurch können im Vergleich zu Turbojet-Triebwerken deutlich geringere Strahlgeschwindigkeiten im Primär- und Sekundärkreis realisiert werden, was in weiterer Folge zu einem verbesserten Vortriebswirkungsgrad und zu einer Verringerung der Lärmemission sowie des spezifischen Kraftstoffverbrauchs führt.⁴

Der Umstand, dass sowohl Lärm- als auch Kraftstoffreduktion mit dem Einsatz von Hochbypass-Triebwerken einhergeht, führt tendenziell zu immer höheren Bypassverhältnissen, welche bei modernen konventionellen Triebwerken heutzutage einen Wert von bis zu 10 annehmen. In Abbildung 1.3 sind nun zur Ermöglichung eines qualitativen Größenvergleichs zwei Ausführungen mit moderatem und hohem Bypassverhältnis einander gegenübergestellt.

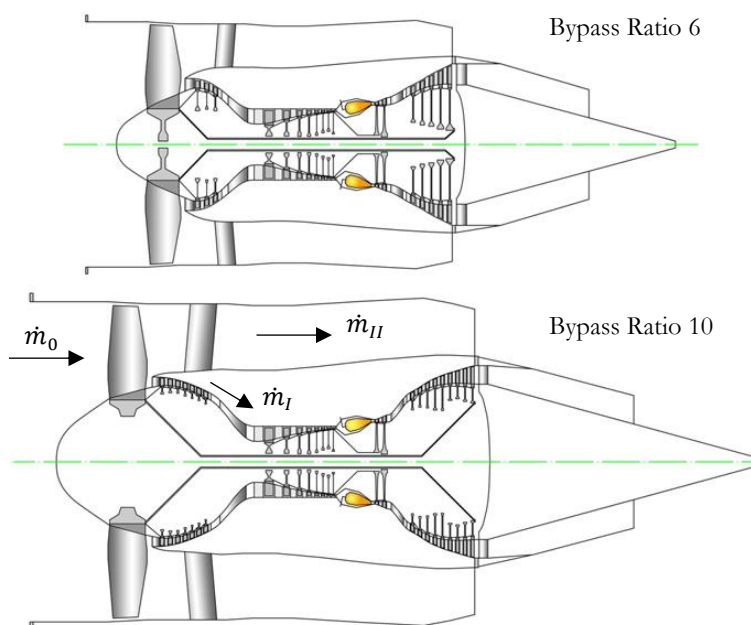


Abbildung 1.3: Gegenüberstellung der Schnittbilder zweier Turbofan-Triebwerke mit unterschiedlichen Bypassverhältnissen von 6 und 10, Quelle: Göttlich (2011), S. 251 (leicht modifiziert).

Daraus ist sehr gut ersichtlich, dass eine Erhöhung des Bypassverhältnisses teuer erkauft werden muss, da sich diese Änderung im Prinzip auf den gesamten Triebwerksaufbau auswirkt. Aus diesem Grund sollen die wichtigsten Einflüsse nun auf Basis des Smith-Diagramms in Abbildung 1.4 mit Fokus auf die Niederdruckturbine diskutiert werden. Streng genommen gilt dieses nur für rein inkompressible Fluide und eignet sich daher nicht für Optimierungsvorgänge, für eine Erstabschätzung reicht es hingegen vollkommen aus.

Darin ist auf der Abszisse der s.g. Strömungskoeffizient φ (auch als Lieferzahl, Durchsatz- oder Förderziffer bezeichnet) aufgetragen, welcher sich als Verhältnis von der meridionalen bzw. axialen Geschwindigkeit zur Umfangsgeschwindigkeit im Mittenschnitt am Laufradaustritt angeben lässt. Unter der Annahme, dass sich bei

⁴ Vgl. Bräunling (2009), S. 38f.

Änderung der Drehzahl auch der Durchsatz ähnlich ändert, stellt dieser Wert als Skalierungsfaktor für die Geschwindigkeitsdreiecke eine Ähnlichkeitsgröße dar.

$$\varphi = \frac{c_m}{u_2} = \frac{c_{ax}}{u_2} = \frac{c_{ax}}{D_2 \cdot \pi \cdot n} \quad (1.1)$$

Auf der Ordinate ist der s.g. Stufenbelastungskoeffizient ψ (auch als Druck- oder Leistungsziffer bezeichnet) aufgetragen, welcher das Verhältnis der Stufenarbeit (hier Euler'sche Turbomaschinenhauptgleichung für Turbinen) zum Quadrat der o.a. Umfangsgeschwindigkeit angibt (verschiedene Schreibweisen möglich).

$$\psi_T = \frac{w_{t,T,St}}{u_2^2} = \frac{\Delta h_{t,T,St}}{u_2^2} = \frac{u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}}{(D_2 \cdot \pi \cdot n)^2} \quad (1.2)$$

Ein typischer Wert für Niederdruckturbinen in konventionellen Flugantrieben ist 2. Die Kurvenscharen im Diagramm kennzeichnen Linien konstanten Wirkungsgrads.

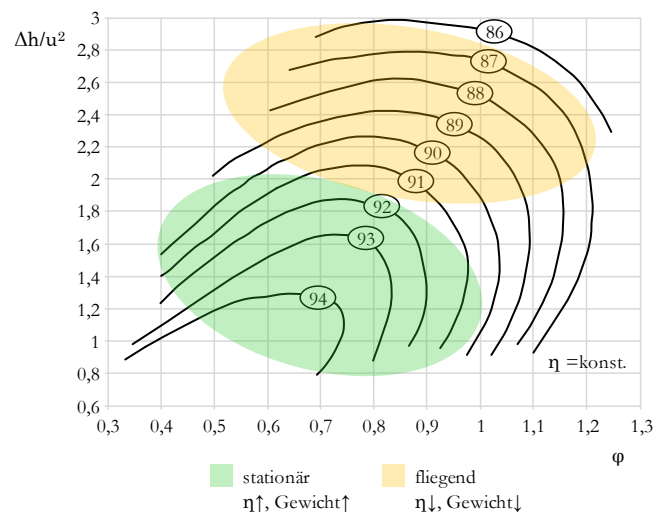


Abbildung 1.4: Smith-Diagramm mit farblicher Hervorhebung der üblichen Einsatzbereiche von stationären Gasturbinen und Flugantrieben, Quelle: Heitmeir (2015), S. 11.2-19 (modifiziert).

Um nun das Bypassverhältnis μ eines Turbofan-Triebwerks anheben zu können, ist eine Erhöhung des Fan-Durchmessers D_{Fan} notwendig. In weiterer Folge käme es, da der Fan nun mehr Leistung braucht, bei unveränderter Drehzahl zu einem Anstieg der notwendigen Stufenarbeit $\Delta h_{t,T,St}$ in der Niederdruckturbinen, was aber lt. obigem Diagramm zu deutlichen Wirkungsgradeinbußen η führen würde. Diese könnten zwar durch eine Erhöhung der Drehzahl n wieder kompensiert werden, allerdings würde es dann im Fan zu strukturmechanischen Problemen kommen, da die werkstoffbedingte zulässige Zugspannung in den Schaufelblattfüßen infolge der hohen Fliehkraftbelastung $F_\omega = m_{Schaufel} \cdot r_{Fan} \cdot \omega^2$ dann sehr schnell überschritten werden würde. Zusätzlich müssen beim Fan hohe Umfangsgeschwindigkeiten vermieden werden, da eine Annäherung der Geschwindigkeit in den Schaufelblattspitzen an die lokale Schallgeschwindigkeit bzw. deren Überschreitung zu einer hohen Lärmbelastung führt.

Daraus folgt nun unmittelbar, dass bei einer Vergrößerung des Fan-Durchmessers die Drehzahl an der Niederdruckwelle sogar sinken muss. Der daraus resultierende Anstieg des Stufenbelastungskoeffizienten ψ_T kann in weiterer Folge

durch eine Erhöhung des mittleren Radius R_m in der Niederdruckturbine und/oder eine Erhöhung der Anzahl der Turbinenstufen (Gewichtserhöhung) kompensiert werden. Für die Erzielung eines guten Wirkungsgrades muss in diesem Fall lt. obigem Diagramm natürlich auch der Ringraumquerschnitt durch eine Kombination von mittlerem Radius und Schaufelhöhe entsprechend angehoben werden (Gewichtserhöhung), um den Strömungskoeffizienten φ bei kleineren Werten zu halten. Dies alles führt dazu, dass nicht nur der Fan sondern auch die Niederdruckturbine und damit das gesamte Triebwerk größer bauen. Im konventionellen Turbofan-Triebwerksbau (Zweiwellenkonzept ohne Getriebe zwischen Niederdruckturbine und Fan) kann die Erhöhung des Bypassverhältnisses demnach nur bis zu einem gewissen Grad wirtschaftlich umgesetzt werden, da zum einen die Niederdruckturbine bei einem zu großen mittleren Radius bereits ungünstig in den Nebenstrom ragen würde und zum anderen der spezifische Kraftstoffverbrauch aufgrund des zu stark angestiegenen Gewichts einen Wendepunkt erreicht und folglich ansteigt.

1.1 PROBLEMSTELLUNG

Im Zuge des o.a. Trends in der Triebwerksoptimierung steht vor allem ein Strukturbauteil im Fokus der Entwicklung, und zwar der in Abbildung 1.2 gekennzeichnete Turbinenübergangskanal, welcher den Ringraum nach der Hochdruckturbine mit jenem der Niederdruckturbine verbindet. Zu seinen Hauptaufgaben zählen die Aufnahme des Hecklagers der Hochdruckwelle, die Kühlluft- und hydraulische Ölversorgung sowie die zuverlässige Anhebung des Ringraumes auf einen höheren mittleren Radius und die damit einhergehende optimale Überleitung der Strömung zur Niederdruckturbine bei möglichst geringen Verlusten.

Obwohl die Numerik im Maschinenbau vor allem durch den rasanten Fortschritt in der Informatik und dem damit einhergehenden deutlichen Anstieg von verfügbaren Computerressourcen wie Arbeitsspeicher und Rechnerleistung im letzten Jahrzehnt stark an Bedeutung zugenommen hat und mittlerweile auch dank einer umfangreichen Auswahl an (nicht-)kommerzieller Berechnungssoftware bereits im Alltagsgeschäft der Maschinenauslegung angekommen ist, ist sie vor allem im Zuge der Detailoptimierung und beim Auftreten neuartiger Problemstellungen nach wie vor auf die experimentelle Modellvalidierung anhand der Messtechnik angewiesen.

Die Strömung in einem Turbinenübergangskanal ist alles andere als trivial, da dieser infolge der Querschnittsanhebung zwangsläufig die Funktion eines Diffusors ausübt. Dies in Kombination mit hohen Reynoldszahlen und Turbulenzgraden, dem notwendigen S-förmigen Verlauf der Ringraumkontur, den strukturmechanisch sowie versorgungstechnisch erforderlichen Stützschaufeln und den von der Hochdruckturbine erzeugten zeitlich instationären Wirbelsystemen führt zu hochkomplexen Wirbelstrukturen und damit einhergehenden Verlustmechanismen. Im Bereich der Computational Fluid Dynamics (CFD) gibt es viele Möglichkeiten zur Modellierung von Turbulenzen, aber vor allem bei derart komplexen Strömungsphänomenen ist eine problemspezifische Adaptierung der Auslegungsparameter anhand von messtechnisch gewonnenen Erkenntnissen zwingend erforderlich.

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die numerische Berechnung von Turbinenübergangskanälen mittels CFD bereits bei stationärer Betrachtung einen zu hohen Wirkungsgrad vorhersagt bzw. den auftretenden Druckverlust unterschätzt. Die Gründe dafür können vielfältig sein, z.B. nicht erfasste Sekundärströmungen und/oder lokale Energetisierung von Wandgrenzschichten, und konnten bisher nicht geklärt werden.

1.2 AUFGABENSTELLUNG

Um die vorhandenen Auslegungsmethoden für Turbinenübergangskanäle anhand von Messergebnissen validieren und in weiterer Folge optimieren zu können, wurde von Seiten der Industrie (MTU und GE) mit dem Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der TU Graz im Rahmen des EU-Technologieprogramms ENOVAL⁵ (ENgine mOdule VALidators / Ultra High Bypass Ratio Aero Engines) ein gemeinsames Projekt gestartet, welches die Entwicklung und Realisierung eines geeigneten Prüfstandes zur experimentellen Untersuchung der in einem „state of the art“-Turbinenübergangskanal auftretenden Strömungsphänomene zum Ziel hat.

Die mit diesem Prüfstand ermittelten Ergebnisse müssen mit jenen von bereits an der Transonic Turbine Test Facility (TTTF) des Instituts durchgeführten Versuchen vergleichbar sein, was eine gewisse Ähnlichkeit sowohl von Geometrie als auch von Strömungsbedingungen voraussetzt. Im Gegensatz zum transsonischen Prüfstand, bei welchem dem Übergangskanal eine Hochdruckturbine vorgelagert ist, soll der neue Prüfstand eine speziell auf die o.a. Problemstellung ausgerichtete Flexibilität aufweisen, welche es ermöglicht, die einzelnen Verlustmechanismen herausfiltern und nach ihrem Einfluss gewichten zu können. Der auftretende Druckverlust im Turbinenübergangskanal soll dabei in folgende Hauptbestandteile zerlegt werden:

- bei stationärer beruhigter Zuströmung (engl.: Clean Inflow) mit und ohne direkt vorgelagertem Leitrad sowie
- bei instationärer Zuströmung infolge eines vorgelagerten Stäbchenlaufrades (engl.: Spoke Wheel), welches in der Lage ist, die Nachläufe (engl.: Wakes) vom Schaufelgitter der Hochdruckturbine zu simulieren.

Am Prüfstand, der im weiteren Verlauf als Ringgitterkaskade (zusammengesetzt aus den Begriffen Ringraum, Schaufel- bzw. Stabgitter und Kaskade bzw. Prüfstand) oder kurz „AnCa“ (engl.: Annular Cascade) bezeichnet wird, soll ein umfangreiches Spektrum an hochpräziser stationärer und instationärer Strömungsmesstechnik zum Einsatz kommen.

Diese Arbeit setzt chronologisch bereits beim mechanischen Aufbau des Prüfstandes an und endet nach der Durchführung der Initialmessung. Sie stellt eine betreute Masterarbeit im Rahmen der Dissertation von Steiner dar und umfasst mit der Erstinbetriebnahme ein geschlossenes Arbeitspaket des Projekts mit folgenden Hauptaufgaben:

1. Mechanischer Aufbau, Abdichtung und Ausrichtung des Prüfstandes in der stationären Konfiguration (ohne drehendes Speichenrad) auf einem vorgegebenen Fundament.
2. Endfertigung von Kammsonden (engl.: Rakes) für die Totaldruck- und Totaltemperaturmessung sowie von Grenzschichtkämmen und wandstatischen Druckbohrungen.
3. Instrumentierung der Sonden am Prüfstand und geeignete Messleitungsverlegung zu den Aufnehmern.
4. Inbetriebnahme des Prüfstandes und Betriebspunkteinstellung auf vorgegebenen ADP (Aero Design Point).
5. Initialmessung mit Hilfe der gefertigten Messsonden zur Verifizierung der Tauglichkeit des Prüfstandes.

An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass in dieser Arbeit aufgrund der Verschwiegenheitsverpflichtung gegenüber dem Projektpartner keine Absolutwerte aus den durchgeführten Messungen angegeben werden.

⁵ Nähere Informationen unter dem Link <http://www.enoval.eu/> (Stand: 08.05.2018).

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit jenen theoretischen Grundlagen, welche zur Durchführung der Aufgaben im Zuge dieser Arbeit unverzichtbar sind und auf welche im praktischen Teil an ausgewählten Stellen Bezug genommen wird. Zum Beispiel enthält das Unterkapitel 2.1 hilfreiche Methoden zum Ausrichten von bis zu drei Baugruppen zueinander, was auch auf den Prüfstand zutrifft, welcher Gegenstand dieser Arbeit ist. Im Unterkapitel 2.2 wird auf grundlegende strömungsmechanische Phänomene in einem Turbinenübergangskanal eingegangen, welche später zur Diskussion der Messergebnisse herangezogen werden. Hierbei wird das Augenmerk jedoch nicht auf die mathematische Beschreibung, sondern vielmehr auf das grundlegende Verständnis dieser Phänomene und der Ursache ihres Entstehens gelegt. Des Weiteren wird noch kurz auf die Themen Gestaltungskriterien für den Sondenbau (Unterkapitel 2.3), Berücksichtigung von Messfehlern (Unterkapitel 2.4) und Ähnlichkeitskenngrößen zur Einstellung eines stationären Betriebspunktes (Unterkapitel 2.5), welcher einen Vergleich zwischen Modell und realer Maschine ermöglicht, eingegangen.

2.1 MASCHINENAUSRICHTUNG

Die Festlegung von Form- und Lagetoleranzen für einzelne Komponenten sowie die Berücksichtigung sowohl von thermisch bedingten Wärmedehnungen der Materialien als auch von der Biegelinie infolge Eigengewicht von längeren Komponenten zwischen zwei Auflagern und deren Auswirkungen auf die Gesamtkonstruktion im Betrieb erfolgen bereits in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase eines Projekts. Die Einhaltung der geforderten Toleranzen wird entweder bei einer s.g. Wareneingangskontrolle oder im Zuge einer Abnahmeprüfung direkt vor Ort beim Hersteller mitsamt Übergabe der zugehörigen Maßprotokolle an den Auftraggeber sichergestellt.

Nach der Montage einzelner Baugruppen müssen diese miteinander zu einer Gesamtanlage verbunden werden. Hierbei kann es sich z.B. um einen Antriebsmotor mit zugehöriger Arbeitsmaschine oder, wie im Falle dieser Arbeit, um einen Prüfstand handeln, welcher auf der Zuluftseite mit einem feststehenden Einlaufrohr und auf der Abluftseite mit einem ebenso feststehenden Ablaufrohr verbunden werden muss. Und genau hier setzt die s.g. Maschinenausrichtung an.

An dieser Stelle sei jedoch ausdrücklich darauf verwiesen, dass sich die nachfolgend beschriebenen Inhalte speziell auf die Ausrichtung von Maschinenteilen ohne Drehmomentübertragung konzentrieren. Deshalb wird hier in Bezug auf die speziellen Anforderungen an eine s.g. Wellenausrichtung auf weiterführende Literatur verwiesen.

2.1.1 Begriffsdefinition

Beim Ausrichten von zwei bis drei feststehenden Maschinenteilen werden die einzelnen Baugruppen so zueinander positioniert, dass deren Achsen bei normalem Betrieb fluchten und in der Kontaktfläche eine Montage ohne lokale Verspannungen durchgeführt werden kann, wodurch die Betriebssicherheit erhöht wird.

2.1.2 Ausrichtgrößen

Da es sich bei der Maschinenausrichtung um einen iterativen Prozess handelt, bei welchem relevante Abweichungen zuerst gemessen werden müssen, um diese anschließend korrigieren zu können, bieten sich die Größen Parallel- und Winkelversatz sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung zur Quantifizierung des Ausrichtzustandes an (siehe Abbildung 2.1).⁶

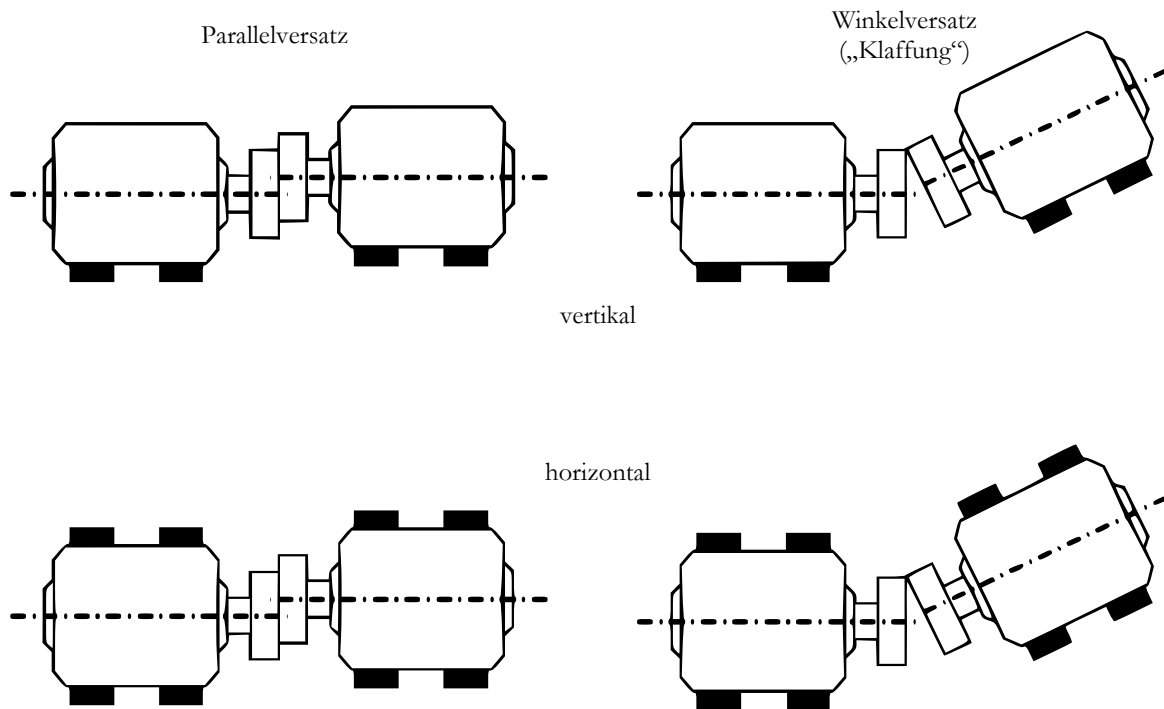


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Ausrichtgrößen, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 8, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert).

Während es sich beim Winkelversatz um den Winkel zwischen zwei Achsen handelt, der oft als Klaffung pro Durchmesser ausgedrückt wird, beschreibt der Parallelversatz den Abstand zwischen den Schnittpunkten zweier Achsen mit einer Ebene, welche zumindest auf eine der beiden Achsen senkrecht steht.⁷

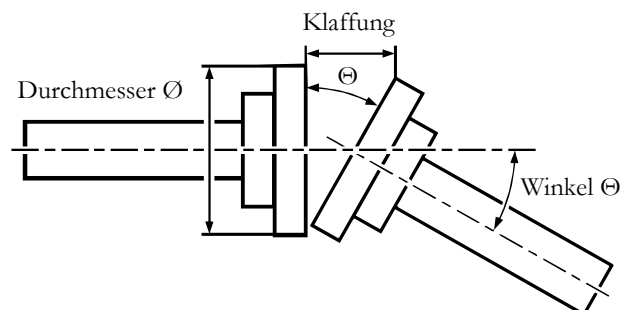


Abbildung 2.2: Winkelversatz, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 9, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert).

⁶ Vgl. PRÜFTECHNIK (2005), S. 7, Onlinequelle [19.09.2017].

⁷ Vgl. Ebd., S. 8f.

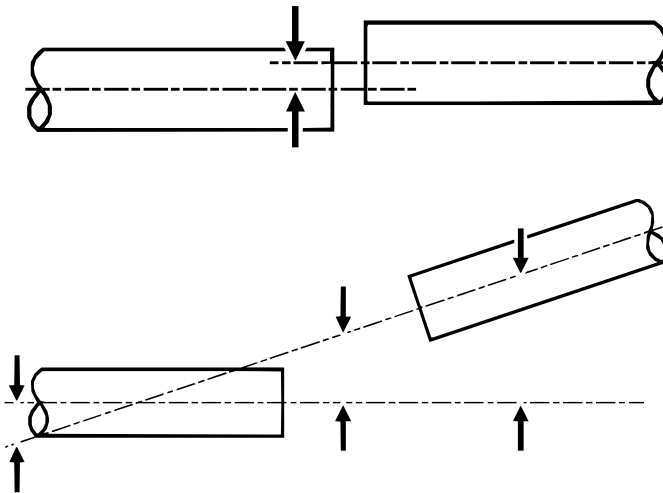


Abbildung 2.3: Axiale Positionsabhängigkeit des gemessenen Parallelversatzes bei zueinander parallelen Achsen (oben) bzw. bei zueinander windschiefen Achsen (unten), Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 10, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert).

2.1.3 Ausrichtmethoden

Unter der Voraussetzung, dass die auszurichtende Maschine die notwendigen Freiheitsgrade in den jeweiligen Richtungen aufweist, werden drei grundlegende Kategorien voneinander unterschieden:⁸

- Sicht- bzw. Tastkontrolle mit Hilfe eines Haarlineals und/oder einer Fühlerlehre,
- der Einsatz von Messuhren und
- der Einsatz von laseroptischen Ausrichtsystemen.

Da es jedoch mehrere Abwandlungen der einzelnen Kategorien gibt, werden im Folgenden nur jene besprochen, welche im Rahmen dieser Arbeit auch tatsächlich zur Anwendung gekommen sind, nämlich die Kippfußbestimmung, das Doppelradial-Messuhrenverfahren als Methode zur Feinausrichtung sowie das Radial-Axial-Messuhrenverfahren als Endkontrolle. Laseroptische Ausrichtsysteme kamen nur qualitativ in Form eines Kreuzlinienlasers (Kontrolle mit dem Auge ähnlich dem Haarlineal) zum Einsatz. Zur Sichtkontrolle ist generell anzumerken, dass sie zwar schnell und einfach durchzuführen ist, jedoch aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens des menschlichen Auges (ca. 1/10 mm) mit großen Ungenauigkeiten verbunden ist.

2.1.3.1 Erkennung und Beseitigung vom Kippfuß

Die Korrektur vom Kippfuß beugt sowohl Verspannungen in der Struktur als auch Federeffekten und daraus resultierenden Schwingungsproblemen vor und erhöht somit die Sicherheit und Lebensdauer der Maschine im Betrieb. Der Kippfuß kann nach dem Lösen des zu vermessenden Fußes entweder mit einer Fühlerlehre oder mittels Messuhr (Nullstellung erfolgt vor dem Lösen) messtechnisch erfasst werden. Nach der Vermessung aller vier Füße können etwaige Korrekturmaßnahmen abgeleitet werden. Man unterscheidet zwischen dem Parallelkippfuß, bei welchem die

⁸ Vgl. PRÜFTECHNIK (2005), S. 23, Onlinequelle [19.09.2017].

Unterseite des Maschinenfußes parallel zum Fundament verläuft, und dem Winkelkippsfuß, welcher sich durch einen Winkel zwischen Fundament und Maschinenfuß äußert (siehe Abbildung 2.4).⁹

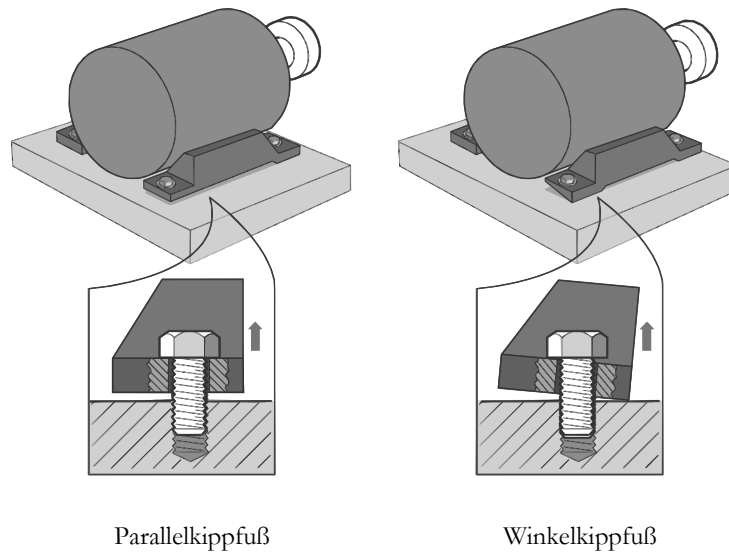


Abbildung 2.4: Kippfuß, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 25, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert).

Im ersten Fall empfiehlt es sich, den Kippfuß einfach durch das Unterlegen von Passplatten in der richtigen Stärke zu korrigieren, wobei jedoch unbedingt darauf geachtet werden muss, dass nicht durch zu dicke oder zu viele Passplatten ein neuer Federeffekt erzeugt wird. Im zweiten Fall kann entweder durch die Verwendung von abgestuften Passplatten (kurzfristige Lösung) oder durch ungleiches Abschleifen der Füße nach erfolgter Demontage (aufwendigere, dafür aber langfristige Lösung) Abhilfe geschaffen werden.¹⁰

2.1.3.2 Doppelradial-Messuhrenverfahren

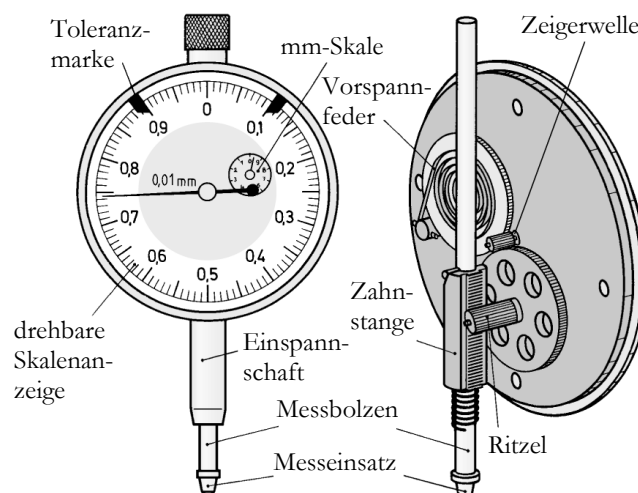


Abbildung 2.5: Mechanische Messuhr, Quelle: Dillinger, Josef u.a. (2007), S. 26 (leicht modifiziert).

⁹ Vgl. PRÜFTECHNIK (2005), S. 25f, Onlinequelle [19.09.2017].

¹⁰ Vgl. Ebd., S.26f.

Das Doppelradialverfahren wird wie das Radial-Axial-Verfahren mit Hilfe von bspw. zwei mechanischen Messuhren (siehe Abbildung 2.5) durchgeführt, wobei das Messprinzip grundlegend auf der Koaxialitätsmessung basiert und somit eine Erweiterung dieses Verfahrens auf zwei miteinander auszurichtende Baugruppen darstellt. Eine davon wird hierbei lagemäßig als fixiert angenommen, wodurch sich automatisch Lagekorrekturen für die andere ergeben. Grundvoraussetzung ist, dass die Aufnahme- und Messflächen in Umfangsrichtung verdrehbar sind. Dabei kann es sich z.B. um die Ausrichtung einer Turbomaschinenwelle zu einer Generatorwelle (mit Drehmomentübertragung) oder von zwei Traversiervorrichtungen einer Prüfstandsanlage (ohne Drehmomentübertragung) handeln.

Grundlegend sind beim Ausrichten mittels Messuhren folgende mögliche Fehlerquellen zu berücksichtigen:¹¹

- Durchhängen der Messuhrenhalterung,
- innere Reibung bzw. Hysterese,
- begrenztes Auflösungsvermögen von 1/100 mm,
- falsches Ablesen der Skala,
- Spiel in den Gelenken der Messuhrenhalterungen,
- schief bzw. schräg angebrachte Messuhren und
- axiales Spiel des Prüfobjekts.

Das Doppelradialverfahren stellt die aktuell modernste Methode zur Maschinenausrichtung mit Hilfe von Messuhren dar, einen typischen Versuchsaufbau zeigt die untere Abbildung. Sobald die Messuhren montiert sind, werden beide Wellen synchron zueinander in die gleiche Richtung verdreht, um den Einfluss von fertigungsbedingten Oberflächenfehlern im Rundlauf während der Messung auszuschalten. Die Messpositionen für den vertikalen Versatz liegen bei 12:00 und 6:00, jene für den horizontalen Versatz bei 3:00 und 9:00, wobei die Blickrichtung so festgelegt ist, dass sie immer von der einstellbaren bzw. beweglichen Baugruppe ausgehend zur stationären gerichtet ist.¹²

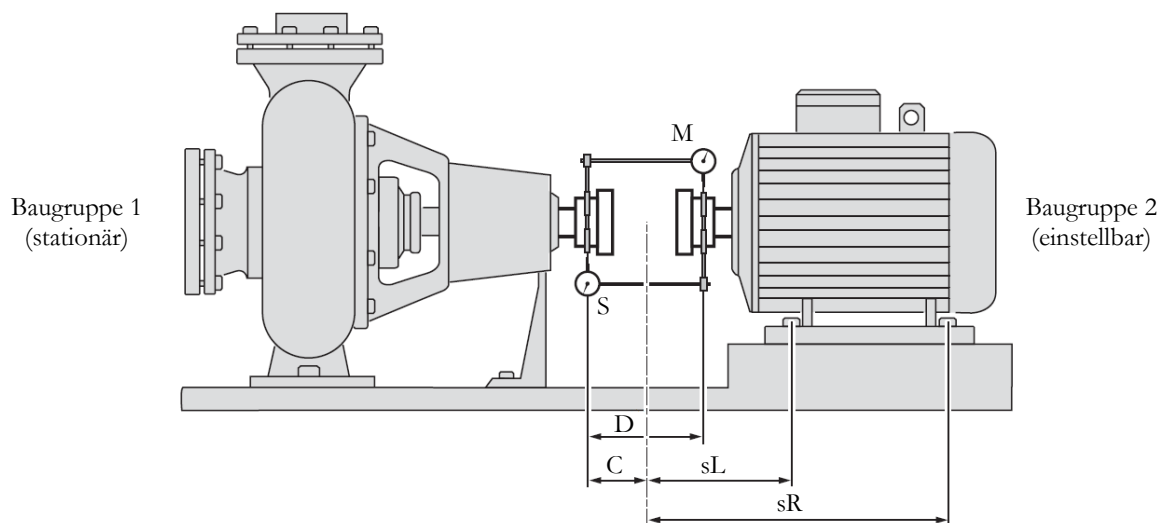


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung vom traditionellen Messuhrenaufbau beim Doppelradialverfahren, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 36, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert).

¹¹ Vgl. PRÜFTECHNIK (2005), S. 31f, Onlinequelle [19.09.2017].

¹² Vgl. Ebd., S.36.

In Abbildung 2.7 links ist die beispielhafte Messung von einem reinen Parallelversatz (eher selten) schematisch dargestellt und auf der rechten Seite die Messung des Winkelversatzes. Die Nullstellung erfolgt für die vertikale Messung bei 12:00 und für die horizontale bei 3:00. In beiden Fällen handelt es sich um einen positiven Versatz, d.h. der Messtaster der linken Messuhr an Position S (statisch) wird bei 6:00 bzw. 9:00 nach ihnen bewegt, wodurch die Skala i.d.R. einen positiven Wert anzeigt. Durch die spiegelbildliche Anordnung der Messuhren muss das Vorzeichen des angezeigten Werts der rechten Messuhr an Position M (mobil) umgekehrt werden. Des Weiteren entspricht der tatsächliche lokale Achsenversatz aufgrund der Nullstellung bei bereits vorhandenem Versatz nur der Hälfte des gemessenen Werts. Bei der senkrechten Messung an der Position 6:00 muss vor der Halbierung des Messwerts noch der zuvor gemessene Durchhang der Messuhrenhalterung hinzugezählt werden (entfällt bei der waagrechten Messung). Durch Verlängerung der durch die Versatzwerte S und M aufgespannten Geraden bis zu den Positionen der vorderen (VF) und der hinteren Maschinenfüße (HF) können die notwendigen Achskorrekturen abgelesen werden.¹³

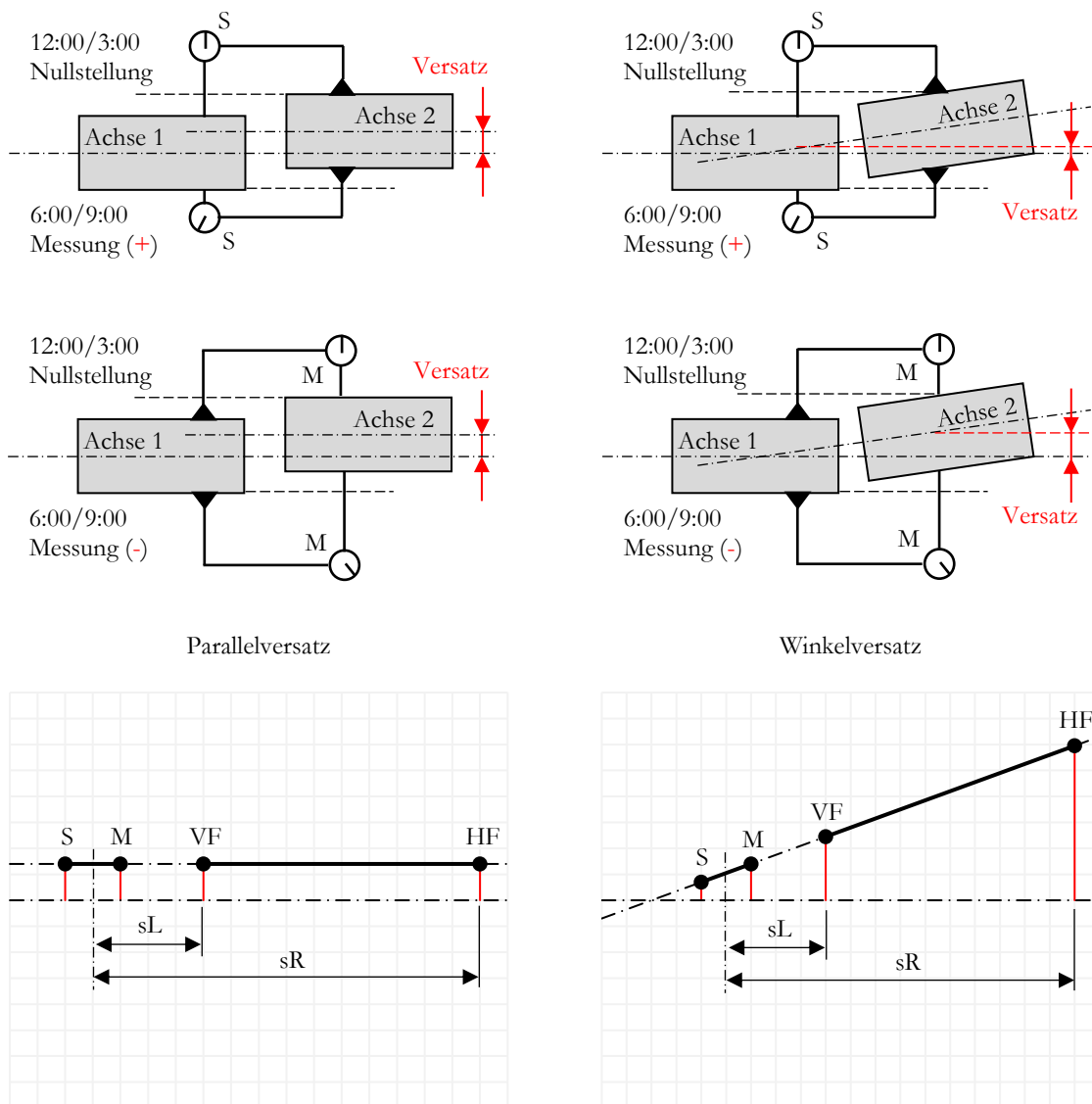


Abbildung 2.7: Messung von Parallel- und Winkelversatz mit dem Doppelradialverfahren.

¹³ Vgl. PRÜFTECHNIK (2005), S. 39ff, Onlinequelle [19.09.2017].

2.1.3.3 Radial-Axial-Messuhrenverfahren

Bei diesem Verfahren werden beide Messuhren auf derselben Welle montiert und deren Taster auf der zu kuppelnden Welle angelegt, wobei einer auf die Plan- und der andere auf die Rundlauffläche im rechten Winkel zueinander zeigt. Der traditionelle Messuhrenaufbau ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Zur Vermeidung von Messwertverfälschungen infolge Rund- und Planlauf Fehlern werden während der Messung beide Wellen zueinander synchron gedreht und die Messwerte wie üblich an den Positionen 12:00 bzw. 0:00, 3:00, 6:00 und 9:00 Uhr abgelesen, wobei die axiale Blickrichtung von der zu bewegenden Maschine (M) in Richtung stationäre Maschine (S) definiert ist.¹⁴

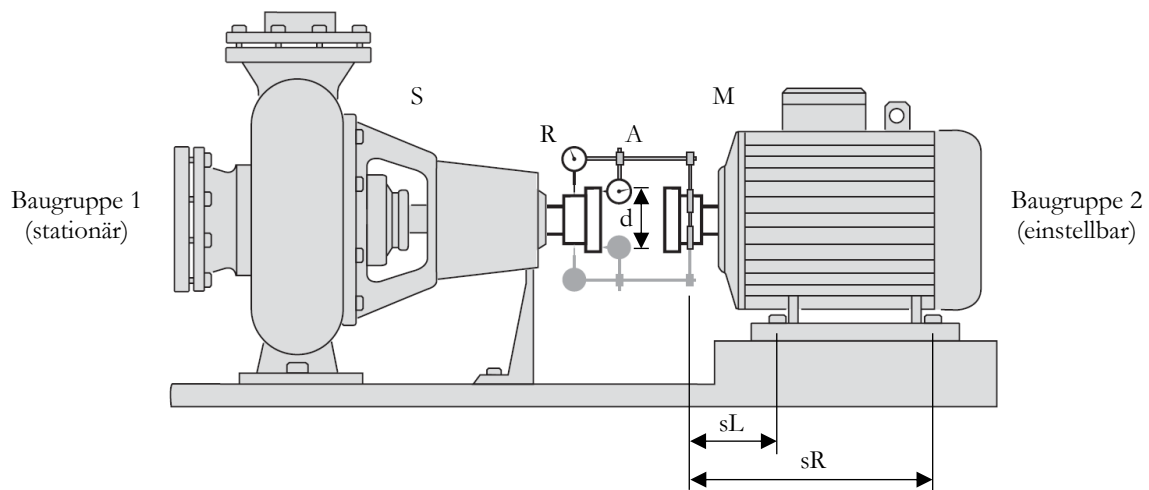


Abbildung 2.8: Typischer Messuhrenaufbau beim Einsatz des Radial-Axial-Verfahrens, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 33, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert).

Für den oben dargestellten Messuhrenaufbau lassen sich die Werte für die Ausrichtgrößen der einstellbaren bzw. beweglichen Maschine (M) in der Messebene wie folgt berechnen:¹⁵

Der vertikale Versatz ergibt sich aus den abgelesenen Radial-Messwerten an den Positionen 12:00 Uhr und 6:00 Uhr sowie aus dem gemessenen Durchhang der radialen Messuhr (optional).

$$\Delta s_{VV} = \frac{\Delta s_{RMU,6} - \Delta s_{RMU,0}(-\Delta s_{RMU,D})}{2} \quad (2.1)$$

Die vertikale Klaffung wird mit den abgelesenen Axial-Messwerten an den Positionen 12:00 Uhr und 6:00 Uhr und dem Messkreisdurchmesser vom Axial-Messtaster sowie (falls eine höhere Genauigkeit angestrebt wird) mit dem gemessenen Durchhang der axialen Messuhr ermittelt.

$$\Delta s_{VK} = \frac{\Delta s_{AMU,6} - \Delta s_{AMU,0}(-\Delta s_{AMU,D})}{d_{AMU}} \quad (2.2)$$

¹⁴ Vgl. PRÜFTECHNIK (2005), S. 33f, Onlinequelle [19.09.2017].

¹⁵ Vgl. PRÜFTECHNIK (2005), S. 34f, Onlinequelle [19.09.2017].

Der horizontale Versatz ergibt sich aus den abgelesenen Radial-Messwerten an den Positionen 9:00 Uhr und 3:00 Uhr. Der Messuhrendurchhang hat hierbei keinerlei Einfluss auf das Ergebnis.

$$\Delta s_{HV} = \frac{\Delta s_{RMU,9} - \Delta s_{RMU,3}}{2} \quad (2.3)$$

Die horizontale Klaffung wird mit den abgelesenen Axial-Messwerten an den Positionen 9:00 Uhr und 3:00 Uhr sowie mit dem Messkreisdurchmesser vom Axial-Messtaster ermittelt. Auch hier hat der Durchhang keinen Einfluss.

$$\Delta s_{HK} = \frac{\Delta s_{AMU,9} - \Delta s_{AMU,3}}{d_{AMU}} \quad (2.4)$$

Die nun folgenden Berechnungen für die Unterleg- und Verschiebewerte müssen sowohl einmal für die vorderen (links dargestellten) mit dem Abstand sL als auch einmal für die hinteren (rechts dargestellten) Maschinenfüße mit dem Abstand sR erfolgen, wobei dann der entsprechende Abstand für den Platzhalter s eingesetzt wird.

Der Unterlegwert setzt sich aus der vertikalen Klaffung sowie dem vertikalen Versatz und dem Fußabstand zusammen, wobei sich die Gleichung stark vereinfacht für den Fall, dass einerseits die Messuhren an der Position 12:00 Uhr nullgestellt und anschließend bei 6:00 Uhr abgelesen werden ($\Delta s_{AMU,0}=0$ und $\Delta s_{RMU,0}=0$) und andererseits die Messuhrendurchhänge vernachlässigbar klein sind ($\Delta s_{AMU,D}=0$ und $\Delta s_{RMU,D}=0$).

$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta s_{VK} \cdot s - \Delta s_{VV} \\ \Delta y &= \frac{\Delta s_{AMU,6}(-\Delta s_{AMU,0} - \Delta s_{AMU,D})}{d_{AMU}} \cdot s - \frac{\Delta s_{RMU,6}(-\Delta s_{RMU,0} - \Delta s_{RMU,D})}{2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Der Verschiebewert wird mittels der horizontalen Klaffung, dem horizontalen Versatz und dem Fußabstand ermittelt. Auch hier vereinfacht sich die Gleichung für den Fall, dass die Messuhren bei 3:00 Uhr nullgestellt und dann an der 9:00 Uhr Position abgelesen werden ($\Delta s_{AMU,3}=0$ und $\Delta s_{RMU,3}=0$). Ein positiver Wert (+) zeigt an, dass die Füße in Richtung 3:00 Uhr bewegt werden müssen und umgekehrt.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta s_{HK} \cdot s - \Delta s_{HV} \\ \Delta x &= \frac{\Delta s_{AMU,9}(-\Delta s_{AMU,3})}{d_{AMU}} \cdot s - \frac{\Delta s_{RMU,9}(-\Delta s_{RMU,3})}{2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.2 GRUNDLEGENDE AERODYNAMIK IN EINEM TURBINENÜBERGANGSKANAL

Der Turbinenübergangskanal dient, wie bereits in der Einleitung kurz besprochen, dazu, den Ringraum beim Übergang von der Hoch- auf die Niederdruckturbinen auf höhere Radien anzuheben. Im Falle einer zusätzlichen Querschnittserweiterung spricht man auch von s.g. Turbinenzwischendiffusoren. Im englischen Sprachraum haben sich hingegen die Bezeichnungen Turbine Center Frame (TCF) und Intermediate Turbine Duct (ITD) bewährt.

Die Hauptaufgabe eines Diffusors ist, die Geschwindigkeit innerhalb einer Strömung zu verringern und gleichzeitig deren statischen Druck anzuheben. Im subsonischen Geschwindigkeitsbereich ($Ma < 1$) wird dies durch eine Querschnittserweiterung erreicht. Generell ist bei der geometrischen Gestaltung von Diffusoren Vorsicht geboten, da die Strömung generell nur von Gebieten höheren Drucks in Gebiete niedrigeren Drucks fließen „möchte“, nun jedoch gegen einen ansteigenden statischen Druck anströmen „muss“. Dies kann nur bewerkstelligt werden, wenn das den Diffusor anströmende Fluid bereits eine ausreichend hohe kinetische Energie mitbringt, welche es in Gebiete höheren Drucks quasi „zwingt“. Für diesen Vorgang wird kinetische Energie von der Kernströmung verbraucht, die Strömungsgeschwindigkeit c sinkt.¹⁶

Problematisch wird das Ganze jedoch erst in den wandnahen Bereichen, da die Strömung dort aufgrund der Haftbedingung in den deutlich „träger strömenden“ Wandgrenzschichten in Richtung zur begrenzenden Wand auf die Geschwindigkeit null quasi „abgebremst“ wird und daher zwangsläufig über eine viel geringere kinetische Energie verfügt als die reibungsfreie Außen- bzw. Potentialströmung. Dies hat zur Folge, dass Grenzschichten bei zu stark ansteigendem Druckgradienten sehr schnell den Ablösepunkt erreichen (siehe Abbildung 2.9), ab dem es zu Rückströmungen und in weiterer Folge zu Verwirbelungen kommt, was einen Verlustmechanismus darstellt, welcher zwangsläufig zu Wirkungsgradeinbußen führt (siehe Abbildung 2.10 links). Im Falle von starken Strömungsablösungen kann schlimmstenfalls die Diffusorwirkung sogar komplett aufgehoben werden (siehe Abbildung 2.10 rechts).¹⁷

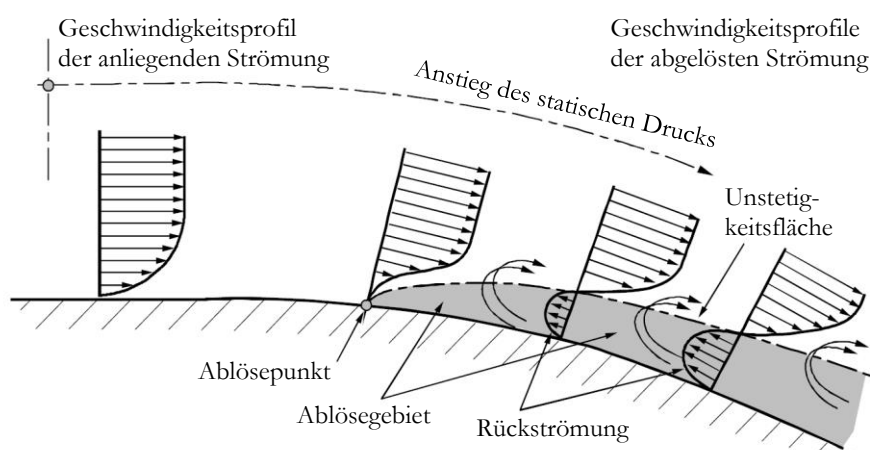


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Ablösung von Strömungsgrenzschichten entlang einer begrenzenden Wand bei ansteigendem Druckgradienten, Quelle: Bräunling (2009), S. 96 (leicht modifiziert).

¹⁶ Vgl. Bräunling (2009), S. 111.

¹⁷ Vgl. Ebd., S. 111f.

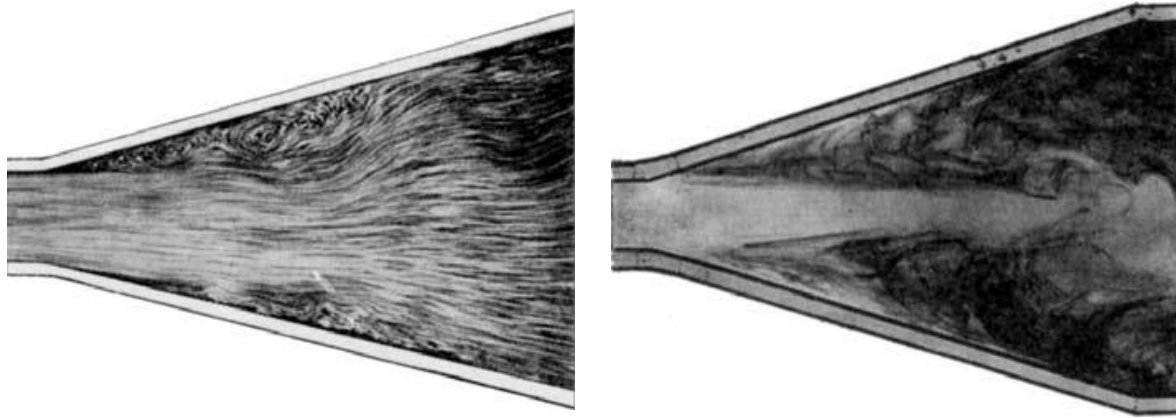


Abbildung 2.10: Ablösende subsonische Diffusorströmungen bei zu großen Öffnungswinkeln, Quelle: Bräunling (2009), S. 112.

Diffusoren mit nahezu keiner Strömungsablösung weisen demnach Öffnungswinkel auf, welche die 4°-Marke praktisch nicht überschreiten. Das heißt aber auch, dass die Baulänge entsprechend höher ausfallen muss. Und gerade das ist im Triebwerksbau unerwünscht, da aufgrund der großen zurückgelegten Flugstrecken innerhalb kurzer Zeit jede noch so kleine Bauteilverkürzung bzw. Gewichtseinsparung zu einer großen Kraftstoffeinsparung führt.¹⁸

Die „Aggressivität“ von Turbinenzwischendiffusoren wird in der Luftfahrt traditionell anhand ihrer qualitativen Einordnung im Diagramm nach Sovran und Klomp mit den eingetragenen Grenzkurven C_p^* und C_p^{**} für einen s.g. „Straight-Walled Annular Diffuser“ in Abbildung 2.11 beurteilt.

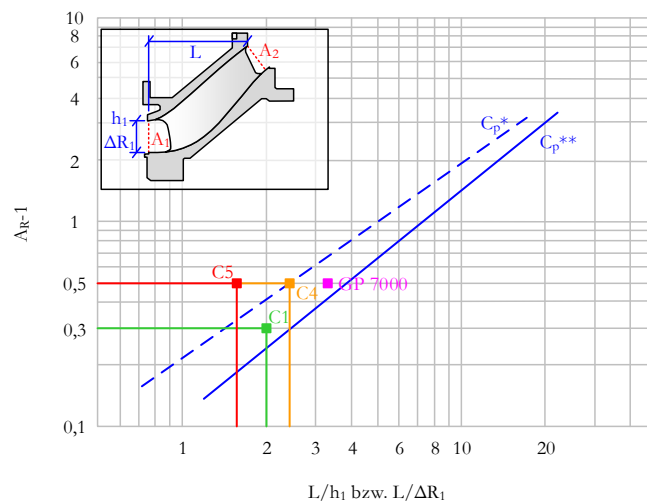


Abbildung 2.11: Qualitative Einordnung der verschiedenen Test Setups C1, C4 und C5 sowie des Übergangskanals vom GP7000-Triebwerk ($\mu \approx 9$) im entsprechenden Diagramm nach Sovran und Klomp, Quelle: in Anlehnung an Marn (2008), S. 15 und Göttlich (2011), S. 251.

Das erste Bewertungskriterium hierbei ist das Verzögerungsverhältnis bzw. das s.g. „Area Ratio“ A_R , welches sich als Verhältnis von Austrittsfläche A_2 zu Eintrittsfläche A_1 berechnet. Dieses ist als um den Zahlenwert 1 reduzierter Wert auf der Ordinate aufgetragen. Hierbei wird die Verhaltenscharakteristik des Diffusors entlang der Länge wesentlich vom Verlauf der Area Ratio bzw. vom Verlauf der Innen- (Hub) und Außenkontur (Tip oder Casing) bestimmt. Als zweites Bewertungskriterium dient das Verhältnis von der Baulänge L zur Höhe des Eintrittskanals h_1 , welche sich in

¹⁸ Vgl. Bräunling (2009), S. 111f.

einem Ringraum als Differenz der Radien ΔR_1 zwischen Außen- und Innenkontur darstellt. Dieses Verhältnis ist im Diagramm als Abszisse aufgetragen. Die eingezeichnete strichlierte blaue Gerade C_p^* beschreibt das optimale Flächenverhältnis bei einer gegebenen Diffusorlänge, während vice versa die durchgezogene blaue Gerade C_p^{**} eine optimale Baulänge bei einem gegebenen Flächenverhältnis liefert.¹⁹ Diese beiden Linien kennzeichnen also für einen „Straight-Walled Annular Diffuser“ Punkte idealen Druckrückgewinns für den jeweiligen Fall. Der Druckrückgewinn ist allgemein definiert als die auf den dynamischen Druck bzw. Staudruck am Eintritt bezogene Differenz zwischen einem lokalen statischen Druck und jenem am Eintritt:

$$C_{p,x} = \frac{p_x - p_1}{p_{t,1} - p_1} = \frac{p_x - p_1}{\frac{\rho}{2} c_1^2} \quad (2.7)$$

Diese bezogene bzw. dimensionslose Schreibweise stellt im Turbomaschinenbau eine gängige Methode dar, um z.B. Druckverteilungen entlang von unterschiedlichen Schaufelprofilen durch Ausschaltung der Abhängigkeit von Dichte, Geschwindigkeit und statischem Druck in der Zuströmung miteinander vergleichen zu können.

Um ein Gefühl in Bezug auf den Begriff „Aggressivität“ zu vermitteln, sind in dem Diagramm nun vier verschiedene Arten von Turbinenzwischendiffusoren eingetragen. Das in der Einleitung kurz besprochene und in Abbildung 1.2 dargestellte Hochbypasstriebwerk GP7000 der Fa. Engine Alliance weist beim ITD bspw. ein großes Verzögerungs- bzw. Flächenverhältnis von 1,5 auf bei einer gleichzeitig jedoch großen bezogenen Baulänge zwischen 3 und 4, was es zu einem s.g. „state of the art“- bzw. auch „non-aggressive“-Übergangskanal macht. Die Bezeichnungen C1, C4 und C5 stehen hingegen für verschiedene Testsetups, welche an der Technischen Hochschule Chalmers in Göteborg (C1-Setup) bzw. in der Transonic Turbine Test Facility (TTTF) am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik (TTM) der TU Graz im Rahmen des EU-Projekts „AIDA“ (Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics) einem umfangreichen Messprogramm unterzogen wurden. Bei der Konfiguration C1 handelt es sich ebenfalls um einen „non-aggressive“-Übergangskanal, welcher jedoch sowohl ein kleines Flächenverhältnis als auch eine kürzere Baulänge aufweist, d.h. die Komponente weist im Vergleich zu jener im GP7000-Triebwerk einen deutlich kleineren Bauraum auf. Bei der Konfiguration C4 fällt sofort auf, dass sie dasselbe Flächenverhältnis wie jenes vom GP7000 aufweist, jedoch wesentlich kürzer baut, wodurch sie als „aggressive“-ITD eingestuft wird. C5 weist sogar einen noch kürzeren Bauraum auf, weshalb sie die Bezeichnung „super-aggressive“ erhält.

Bei dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Übergangskanal handelt es sich wie bereits eingangs schon erwähnt um einen bewährten „non-aggressive“-Diffusor, da der Schwerpunkt des aufgebauten Prüfstands nicht auf einer Bauraumverkürzung sondern vielmehr auf der experimentellen Bestimmung der einzelnen Verlustanteile vom Druckverlust beruht. Als weiterführende Literatur in Bezug auf das AIDA-Projekt und die o.a. Testsetups soll an dieser Stelle die Dissertation von Marn aus dem Jahr 2008 angeführt werden, welche sich ausführlich mit diesen beschäftigt und im Zuge dessen auch auf Methoden zur Verschiebung des in Abbildung 2.9 schematisch dargestellten Ablösepunkts in Richtung stromabwärts näher eingeht.

Der große radiale Unterschied zwischen Ein- und Austritt am Übergangskanal führt zu seiner charakteristischen S-Form. Da sich die Durchströmung eines solchen Kanals deutlich komplexer gestaltet als jene eines ebenen Diffusors, sollen nun auf den nächsten Seiten die für diese Arbeit wichtigsten Einflussfaktoren kurz erläutert werden.

¹⁹ Gülich (2010), S. 28.

Zu allererst soll hierbei ein S-förmiger Turbinenübergangskanal ohne Stützschaufeln (engl.: Struts) betrachtet werden, welcher ungestört bzw. ohne etwaige Sekundärströmungen angeströmt wird (Clean Inflow). Als Basis für die nachfolgenden Erläuterungen sollen die Verteilung der Mach-Zahl in Abbildung 2.12 (links) sowie die dimensionslose Druckverteilung an der Innen- und Außenkontur in Abbildung 2.12 (rechts) über die Baulänge dienen. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die nachfolgenden nicht explizit zitierten Ausführungen bis zum Ende dieses Unterkapitels der Arbeit von Göttlich²⁰ entnommen wurden bzw. Interpretationen von dieser sind.

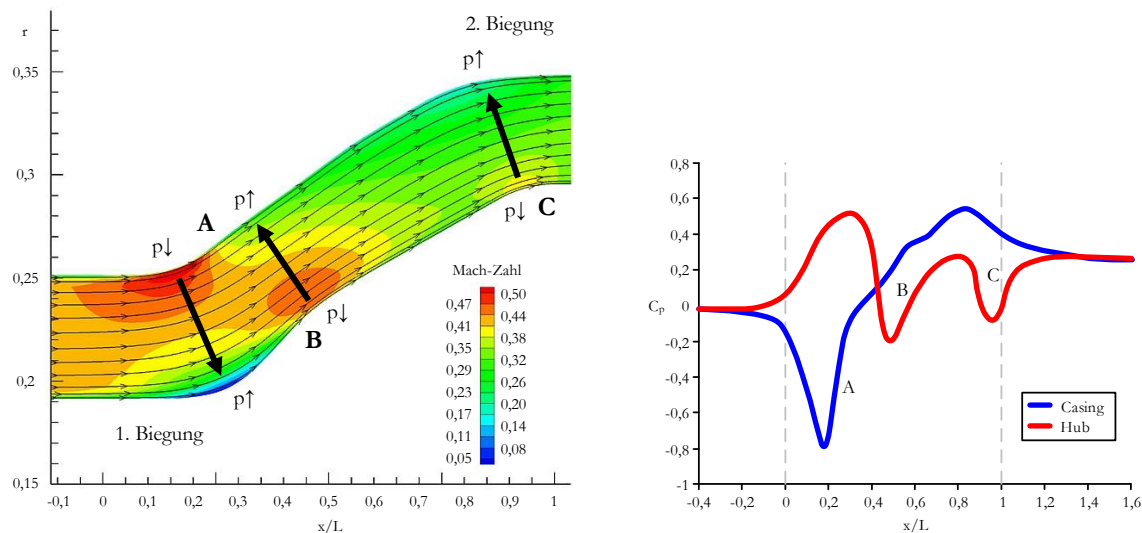


Abbildung 2.12: Verteilung der Mach-Zahl (links) und Druckverteilung (rechts) über die Baulänge eines S-förmigen Turbinenübergangskanals bei ungestörter Zuströmung und ohne Stützschaufeln, Quelle: Göttlich (2011), S. 252f (leicht modifiziert).

Die Beeinflussung der Strömung bzw. des Verlaufs der Stromlinien hängt hierbei nicht nur vom Area Ratio sondern zusätzlich noch vom Verlauf der Innen- und Außenkontur bzw. von der Krümmung der begrenzenden Wände ab. In den wandnahen Bereichen kommt es zu einer zusätzlichen Beeinflussung durch die lokal ausgeprägte Grenzschicht.

Anhand von Abbildung 2.12 (links) kann man gut erkennen, dass die Stromlinien zwei Mal umgelenkt werden. Bei der ersten Biegung wird der an sich rein axialen Zuströmung eine radiale Komponente hinzugefügt, welche nach erfolgter Anhebung der Strömung auf den gewünschten höheren Radius durch die zweite Biegung wieder entfernt wird. Wie bei der Umströmung eines Tragflügels kommt es an den konvex gekrümmten Seitenwänden zu einer Verdichtung der Stromlinien (Beschleunigung), während deren Dichte in den konkav gekrümmten Bereichen abnimmt (Verzögerung). Daraus folgt, dass sich entlang der wandnormalen Verbindungslinie zwischen den zwei Krümmungsscheitelpunkten der jeweiligen Biegung ein positiver bzw. ansteigender Druckgradient einstellt. Dieser verläuft bei der ersten Biegung ausgehend von der Außenkontur in Richtung Innenkontur und bei der zweiten Biegung genau umgekehrt von der Innenkontur zur Außenkontur. Derartige infolge der Stromlinienkrümmung induzierte Druckgradienten überlagern sich mit jenem, welcher aus der Diffusorwirkung bzw. Querschnittserweiterung resultiert.

Diese bis dato noch rein qualitativ gezogene Schlussfolgerung lässt sich nun auch quantitativ anhand der in Abbildung 2.12 (rechts) aufgetragenen Druckverteilungen bestätigen sowie näher ausführen. Die Strömung entlang der Außenkontur (Casing) wird bei der ersten Biegung im Bereich $x/L=0,2$ beschleunigt, was sich in einem lokalen Anstieg der Mach-Zahl bis zum Maximum bzw. in einem Druckabfall bis zum Minimum äußert. An der Innenkontur hingegen

²⁰ Vgl. Göttlich (2011), S. 252-256

steigt der Druck hier bis zu seinem Maximum an, während die Mach-Zahl das Minimum ihrer gesamten Verteilung erreicht (radiales Gleichgewicht). Es fällt auf, dass sich sowohl der Druckanstieg an der Innenkontur als auch der Druckabfall an der Außenkontur vor dem Eintritt in den Turbinenübergangskanal ($x/L=0$) bemerkbar machen. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass bei Unterschallströmungen Einflüsse auch bereits stromaufwärts wahrgenommen werden können, wobei der Druckinformationstransport maximal mit Schallgeschwindigkeit möglich ist.

Unmittelbar nach der ersten Biegung kommt es an der Außenkontur im **Bereich A** durch eine Superposition bzw. Überlagerung des positiven Druckgradienten infolge der ansteigenden Fläche (Diffusorwirkung) und des positiven Druckgradienten infolge der konvexen Krümmung an der Innenkontur (Beschleunigung und Druckabfall im **Bereich B**) zum steilsten Druckanstieg. Dieser Bereich stellt somit auch den kritischen Punkt vom gesamten Übergangskanal im Hinblick auf die Ablösegefahr der Wandgrenzschicht dar, welche jedoch durch eine entsprechend gestaltete Ausformung der Wandkonturen weitestgehend minimiert werden soll. Im Druckverlauf von der Außenkontur erkennt man deutlich an der Position $x/L=0,4$ eine Abflachung des Druckgradienten, welche durch das Ende dieser Drucküberlagerung bedingt ist, d.h. ab der Position $x/L=0,4$ an der Außenkontur bzw. ab $x/L=0,5$ an der Innenkontur ist der weitere Druckanstieg in beiden Verläufen ausschließlich auf die Diffusorwirkung zurückzuführen.

Der größte lokale statische Druck an der Außenkontur wird bei etwa $x/L=0,84$ bzw. beim Beginn der zweiten Biegung erreicht. Dort erreicht demnach auch die Mach-Zahl ihr Minimum entlang der Außenkontur. An der Innenkontur hingegen kommt es in diesem Bereich aufgrund der neuerlichen konvexen Krümmung der Wandkontur zu einem weiteren deutlichen Druckabfall bzw. zu einer Anhebung der Mach-Zahl (**Bereich C**). Die beiden Druckverläufe gleichen sich infolge Vermischung jedoch nicht bereits am Kanalausstritt bei $x/L=1$ aus, sondern stromabwärts noch bis ca. $x/L=1,6$ die Beruhigungsstrecke für die Homogenisierung der Strömung. Der an dieser Stelle erreichte Druckrückgewinn (hier in etwa 0,26) ist maßgebend für den Wirkungsgrad des Turbinenübergangskanals.

Wenn man nun annimmt, dass sich im Ringraum vor dem Eintritt in den Übergangskanal zusätzlich noch ein Schaufelgitter befindet (z.B. eine stationäre Leiteinrichtung wie bei der hier vorliegenden Prüftandskonfiguration oder eine rotierende Hochdruckturbinenstufe bei einem realen Triebwerk), dann muss das ganze Problem auf räumlicher Seite betrachtet werden. Hierfür wird die schematische 3D-Darstellung in Abbildung 2.14 (links) herangezogen, in der die auftretenden Strömungsphänomene in den Bereichen Kanaleintritt, erste Biegung sowie zweite Biegung visualisiert sind. Am Kanaleintritt kann man am grau dargestellten Geschwindigkeitsprofil sehr gut die Nachlaufdelle infolge einer Schaufelhinterkante erkennen. Diese wird im englischen Sprachraum auch als Wake bezeichnet. Auch gut zu erkennen sind die beiden Wandgrenzschichten an der Innenkontur (Hub) in grün sowie an der Außenkontur (Casing) in rot, welche gleich dick sind und gleichmäßig über den Umfang des Ringraumes verlaufen.

Durch den bereits oben besprochenen sich einstellenden Druckgradienten im Bereich der ersten Biegung erfolgt ein Transport vom Fluid aus der mit höherer „Druckenergie“ angereicherten Wandgrenzschicht der Innenkontur über die niedrig energetischen Nachläufe radial nach oben zur Außenkontur. Die bis dorthin bereits angewachsene Wandgrenzschicht an der Außenkontur wird dadurch lokal energetisiert und daher an den Stellen des Transports dünner. Andererseits entstehen dadurch dort an den azimuthal gelegenen Seiten zueinander gegenläufige Wirbel, welche eine Aufdickung der Grenzschicht zwischen zwei Nachläufen begünstigen. Generell stellen dicke Grenzschichten innerhalb einer Diffusorströmung einen Verlustmechanismus dar, weil dies zu einer größeren Verdrängungsdicke führt, welche den Kanalquerschnitt einengt und somit eine Verringerung des statischen Drucks bzw. einen geringeren

Diffusorwirkungsgrad zur Folge hat. Im Bereich der zweiten Biegung erfolgt nun aufgrund der Umkehrung der Krümmungen zwischen Innen- und Außenkontur ein gegenläufiger Trend, dessen Auswirkung an der Wandgrenzschicht der Innenkontur, welche bis dahin ein normales Wachstum zu verzeichnen hat, jedoch kaum merkbar ist. An der Außenkontur hingegen ist an dieser Stelle bereits eine deutlich aufgedickte Grenzschicht erkennbar, deren maximale Dicke sich nun genau mittig zwischen zwei Nachläufen befindet und somit dort den Ort mit den größten auftretenden Verlusten („Verlustkern“) im Übergangskanal bildet.

Für die Aufnahme des Heck-Wälzlagers der Hochdruckwelle, der Kühlluftversorgung der „heißen“ Turbinenstufen und zur hydraulischen Ölversorgung benötigt das TCF Stützschaufeln, welche sich jedoch aerodynamisch negativ auf den Druckverlust auswirken, da sie diesen gegenüber der Ausführung ohne Schaufeln fast verdoppeln. Einige durchaus bekannte Wirbelsysteme von einer Strömung durch ein Schaufelgitter sind in Abbildung 2.13 schematisch dargestellt.

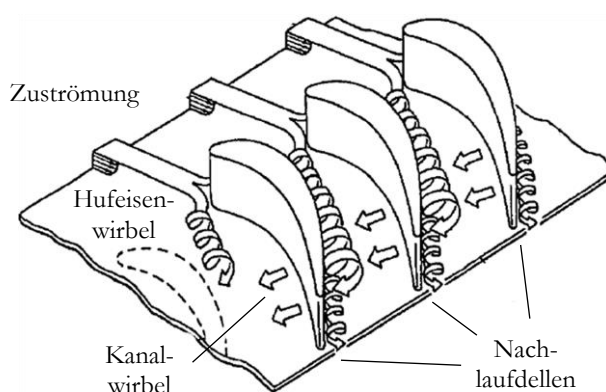


Abbildung 2.13: Hufeisen- und Kanalwirbel in einem Schaufelgitter (schematisch), Quelle: Langston (1980), S. 866ff.

Die Verlustmechanismen in einem TCF mit Schaufeln (siehe Abbildung 2.14 rechts) gestalten sich noch um einiges komplexer und würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Eine Sache soll hier jedoch nicht unerwähnt bleiben. Die o.a. Energetisierung der Grenzschicht an der Außenkontur findet auch hier bspw. unmittelbar rechts von der Stützschaufel statt. Die linke Seite hingegen ist am weitesten von der nächsten Energetisierungsstelle entfernt und es bildet sich eine große Ablöseblase („Verlustkern“), die auch mit CFD-Simulationen nur sehr schwer exakt zu erfassen ist.

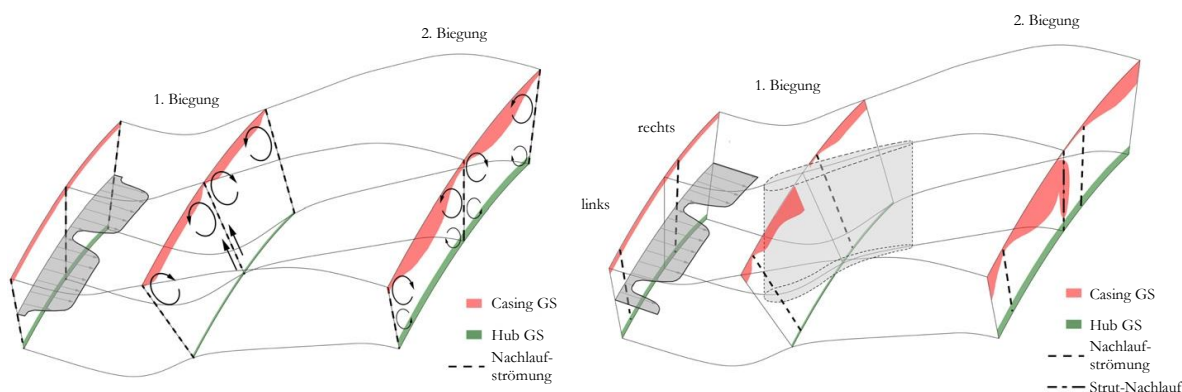


Abbildung 2.14: Räumliche Gegenüberstellung der Aerodynamik in einem Turbinenübergangskanal mit Wakes (links) und mit Wakes in Kombination mit TCF-Stützschaufeln (rechts), Quelle: Göttlich (2011), S. 253 und S. 256 (leicht modifiziert).

2.3 GESTALTUNGSKRITERIEN FÜR DIE EINGESETZTEN MESSSONDEN

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit der Frage, warum die am Prüfstand eingesetzten statischen Wanddruckbohrungen sowie die komplett in die Strömung eintauchenden Totaldruck- und Totaltemperatursonden so aussehen, wie sie aussehen. Um den Rahmen jedoch nicht zu sprengen, wird darauf geachtet, nur relevante Punkte anzusprechen.

Für die experimentelle Bestimmung vom statischen Druck eines strömenden Fluides stellt eine Öffnung in der begrenzenden Kanalwand oder auf der Oberfläche eines eingetauchten Körpers (z.B. einer Sonde) die gängigste Methode dar, wobei die besten Ergebnisse mit kleinen scharfkantigen Bohrungen normal auf die Wandoberfläche erzielt werden, welche parallel zur Grenzschichtströmung liegt.²¹

Eine derartige Anordnung ist schematisch in Abbildung 2.15 (a) dargestellt. Da die ungestörte Außenströmung der Grenzschicht den statischen Druck aufprägt, ist dieser praktisch konstant über die Wandgrenzschicht und kann über die eingebrachte Bohrung und einen dünnen Druckschlauch zu einem Druckaufnehmer weitergeleitet werden.²²

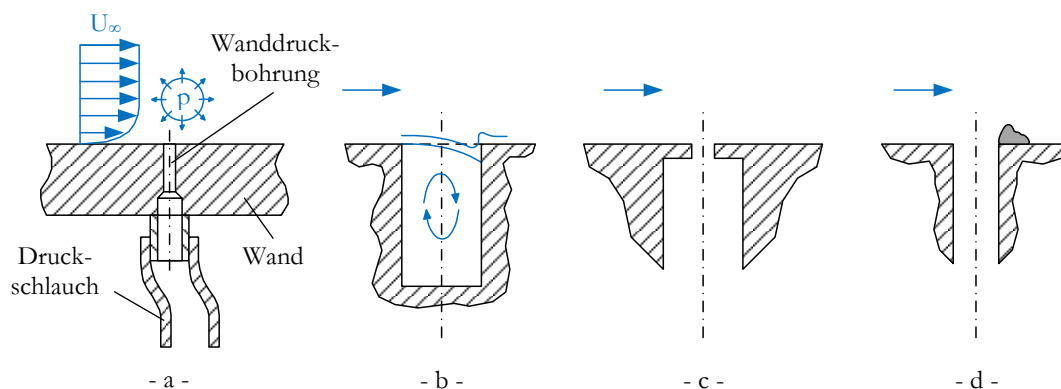


Abbildung 2.15: Schematischer Aufbau einer statischen Wanddruckbohrung (a), ungünstige Geometrien (b und c) sowie Bohrung mit Grat (d), Quelle: Nitsche, Brunn (2006), S. 12 (leicht modifiziert) und Arts, Boerrigter, Carbanaro, Van den Braembussche (1994), S. 42 (leicht modifiziert).

Der Einfluss verschiedener Öffnungsgeometrien auf die Druckmessung ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Der statische Druck kann zwischen Außenströmung und begrenzender Wand jedoch nur konstant sein, solange die Stromlinien parallel zur Wand verlaufen. Turbulenzeffekte, Strömungsabriss, Rezirkulationen, wie sie z.B. bei zu großen Wanddruckbohrungen auftreten (siehe Abbildung 2.15 (b)), oder auch Hindernisse innerhalb der Strömung, wie z.B. fertigungs- oder ablagerungsbedingte Grate (siehe Abbildung 2.15 (d)), können zu einer Krümmung der Stromlinien und in weiterer Folge zu einem sich einstellenden Druckgradienten senkrecht zur Wand führen. Während eine Rezirkulation innerhalb der Bohrung i.d.R. den gemessenen Druck erhöht, können große Hohlräume unter einer kleinen Eintrittsöffnung (siehe Abbildung 2.15 (c)) genau das Gegenteil bewirken. Größere Bohrungen ($\geq \text{Ø}1\text{mm}$) wirken sich negativ auf die Genauigkeit aus (Strömungsbeeinflussung), Bohrungsdurchmesser kleiner $\text{Ø}0,5\text{mm}$ hingegen verursachen lange Reaktionszeiten und können außerdem sehr schnell (z.B. durch Flugrost) versperrt werden.²³

²¹ Vgl. Arts, Boerrigter, Carbanaro, Van den Braembussche (1994), S. 42.

²² Vgl. Nitsche, Brunn (2006), S. 12.

²³ Vgl. Arts, Boerrigter, Carbanaro, Van den Braembussche (1994), S. 42ff.

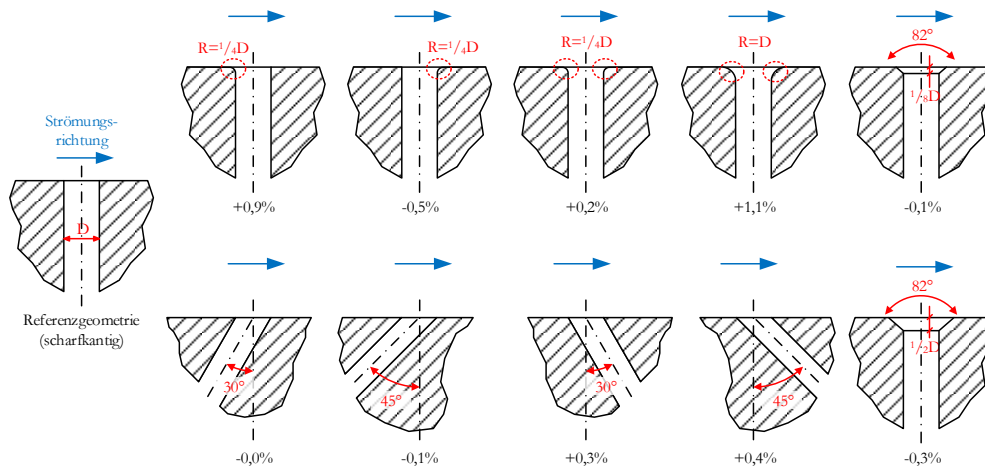


Abbildung 2.16: Relative Abweichung der statischen Druckmessung $(p_{\text{Messung}} - p) / q$ bei verschiedenen Bohrungsgeometrien gegenüber einer (idealen) Referenzgeometrie, Quelle: in Anlehnung an Arts, Borrigter, Carbonaro, Van den Braembussche (1994), S. 45.

Für die Totaldruckmessung werden s.g. Pitot-Rohre eingesetzt. Diese sind billig und robust, flexibel einsetzbar sowie sehr gut verarbeitbar (Löten, Biegen) und müssen nicht kalibriert werden. Derartige Sonden können vielfältige Gestalten annehmen (siehe drei Beispiele in Abbildung 2.17). Bei den ersten beiden Sonden (a) und (b) liegt die Messabweichung relativ zum dynamischen Druck unter 1% für mittlere Anströmwinkel bis zu $\pm 11^\circ$ bzw. 30° in einem Mach-Zahl-Bereich zwischen 0,26 und 1,62. Die Mach-Zahl bei den Messungen am AnCa-Prüfstand liegt im Bereich von 0,6, bei welcher die Sonde (c) dank dem s.g. „Kiel-Kopf“ theoretisch sogar mit einem Winkel von bis zu $\pm 60^\circ$ angeströmt werden könnte. Zusätzlich wird i.d.R. noch eine deutlich verbesserte Reaktionszeit durch eine geringfügige Messabweichung infolge des Tolerierens einer langsamen Durchströmung der hinteren Mantellöcher erkauft.²⁴

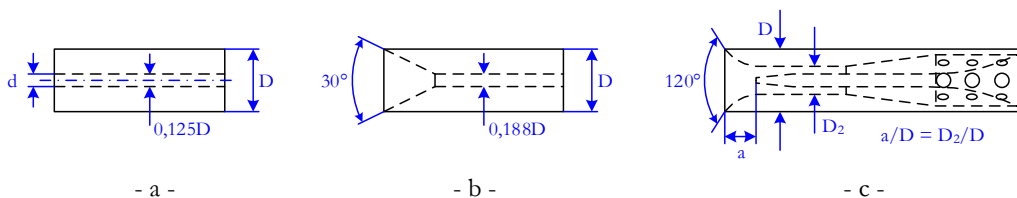


Abbildung 2.17: Beispielhafte Pitot-Sonden, Quelle: in Anlehnung an Arts, Borrigter, Carbonaro, Van den Braembussche (1994), S. 59.

An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass es sich bei den o.a. Winkelbereichen in Bezug auf die Unempfindlichkeit gegenüber dem Anströmwinkel um theoretische Werte aus der Literatur handelt. Erfahrungen mit ausgeführten Sonden haben hingegen gezeigt, dass selbst das Design (c) mit Kiel-Kopf eine maximale Unabhängigkeit von $\pm 20^\circ$ gegenüber dem Anströmwinkel erreicht (siehe Unterkapitel 4.2).

²⁴ Vgl. Ebd., S. 58f.

2.4 MESSUNSICHERHEIT

2.4.1 Grundbegriffe

In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten im Bereich der Messunsicherheit gebräuchlichen Begriffe aus der Literatur²⁵ gemeinsam mit der Vorgangsweise zur Ermittlung des Vertrauensbereichs kurz und bündig zusammengefasst werden.

In Abbildung 2.18 sind die einzelnen Anteile einer Messabweichung schematisch dargestellt:

- **Wahrer Wert x_W** : Würde sich bei einer „idealen“ Messung ergeben und kann de facto realmesstechnisch nicht bestimmt, aber zumindest mit dem „richtigen“ Wert x_R (= bester Schätzwert) angenähert werden.
- **Messwert x** : Auch als Anzeigewert am Messgerät bezeichnet und mit Messunsicherheiten behaftet.
- **Berichtigter Messwert x_E** : Resultat eines Kalibriervorgangs, d.h. um eine bekannte einseitige systematische Messabweichung $e_{s,b}$ korrigierter Messwert x .
- **Erwartungswert μ** : Würde sich mit dem arithmetischen Mittelwert \bar{x} sämtlicher Messwerte decken für den rein hypothetischen Fall, dass eine Messgröße unendlich viele Male unter denselben Bedingungen gemessen werden würde. Auch in allen anderen Fällen wird vereinbart, dass $\bar{x} \approx \mu$ zumindest annähernd zutrifft mit der Einschränkung, dass je kleiner die Anzahl der aufgenommenen Messwerte N (unter denselben Bedingungen) ist desto weiter weicht auch \bar{x} von μ ab.
- **Messabweichung e** : Setzt sich aus bekannter systematischer Messabweichung $e_{s,b}$ (kalibrierbar), unbekannter systematischer Messabweichung $e_{s,u}$ (Genauigkeitsklasse vom Messgerät lt. Herstellangaben bzw. vom zuständigen Eichamt in einem angegebenen Konfidenzintervall) und zufälliger Messabweichung e_r (Standardabweichung der Normalverteilung in einem angegebenen Konfidenzintervall) zusammen und kennzeichnet die gesamte Abweichung des Messwerts x vom wahren Wert.

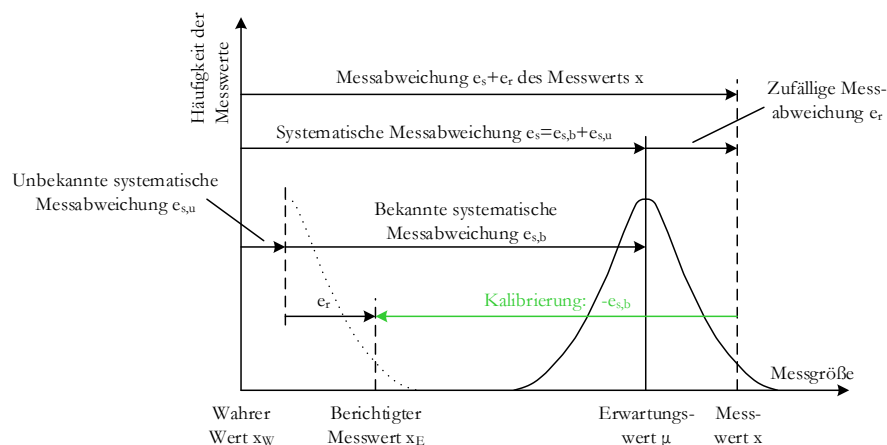


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung der zur Beschreibung von Messabweichungen verwendeten Grundbegriffe, Quelle: Rieberer (2015), S. 7-4 (leicht modifiziert) (Originalquelle: DIN 1319-1 aus dem Jahr 1995).

²⁵ Vgl. Rieberer (2015), S. 7-1ff.

Wie bereits oben erwähnt, streuen infolge des Auftretens zufälliger Messabweichungen bei der Aufnahme von unendlich vielen Messwerten $N \rightarrow \infty$ sämtliche Messwerte um einen Erwartungswert μ . Als Maß für diese Streuung kann unter der idealisierten Annahme einer Normalverteilung (grafisch dargestellt als Gauß'sche Glockenkurve) die s.g. Standardabweichung σ angegeben werden. Diese weist dieselbe Einheit wie die Messgröße auf und kennzeichnet die Steigung bzw. Schlankheit der Glockenkurve, d.h. je kleiner die Standardabweichung ist, desto mehr Messwerte liegen in unmittelbarer Nähe des Erwartungswerts und desto spitzer und steiler gestaltet sich die Verteilung und vice versa. Die vollständige Angabe von normalverteilten Zufallsgrößen erfolgt stets durch den (angenäherten) Erwartungswert μ in Kombination mit der Standardabweichung σ unter zusätzlicher Angabe des Konfidenzintervalls:

- bei $\mu \pm \sigma$ befinden sich lediglich 68,3 % der Messwerte im abgegrenzten Intervall,
- bei $\mu \pm 2\sigma$ hingegen bereits 95,4 % (wird standardmäßig verwendet \rightarrow auch hier!) und
- bei $\mu \pm 3\sigma$ schon ganze 99,7 %.

Die theoretische Standardabweichung σ (**Idealfall**: unendlich viele Messwerte) lässt sich wie folgt berechnen:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2.8)$$

Bei technischen Messungen (**Realfall**: endlich viele Messwerte) hingegen wird der Erwartungswert μ durch den arithmetischen Mittelwert \bar{x} lediglich angenähert, woraus sich zwangsläufig auch lediglich eine angenäherte Standardabweichung s ergeben kann, welche auch als „empirische Standardabweichung der Messwerte“ bezeichnet wird.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{mit } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \approx \mu \quad (2.9)$$

In weiterer Folge lässt sich die „empirische Standardabweichung des Mittelwerts“ berechnen, welche umso kleiner ausfällt, je mehr Messwerte vorliegen (z.B. Reduktion um Faktor 10 bei zusätzlichen 100 Messwerten), welche gleichzeitig auch als Wert für die zufällige Messunsicherheit $u(e_r)$ definiert wird.

$$s_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot s =: u(e_r) \quad (2.10)$$

Die systematische Messunsicherheit wird i.d.R. direkt der Genauigkeitsklasse vom Messgerät entnommen. Ihr wird hierbei unterstellt, dass sie ebenfalls aus einer Normalverteilung mit einem angegebenen Konfidenzintervall resultiert.

$$u(e_s) := e_{s,u} \quad (2.11)$$

Durch quadratische Kombination der beiden Werte ergibt sich für das endgültige Messergebnis X eine Gesamtmessunsicherheit bzw. ein Vertrauensbereich für den Mittelwert \bar{x} . Hierbei wird natürlich vorausgesetzt, dass die Konfidenzintervalle beider Messunsicherheiten ident sind (i.d.R. 95 %).

$$u(\bar{x}) = \sqrt{u^2(e_r) + u^2(e_s)} \quad (2.12)$$

$$X = \bar{x} \pm u(\bar{x}) \text{ oder } X = \bar{x} \pm \frac{u(\bar{x})}{|\bar{x}|} \quad (2.13)$$

Die o.a. Vorgehensweise gilt für sämtliche direkt erfassten Messgrößen. Bei s.g. indirekten Messgrößen y , welche sich erst durch Gleichungen berechnen lassen, welche sich aus mehreren direkt gemessenen Größen zusammensetzen, wird die Messunsicherheit i.d.R. mit Hilfe des s.g. „Gauß’schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes“ berechnet.

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (2.14)$$

Bei komplexen Gleichungen, die eine partielle Ableitung analytisch sehr schwer oder gar unmöglich machen, wird die Messunsicherheit mit Hilfe des Finite Differenzen Verfahrens angenähert:

$$u(y) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\Delta f}{\Delta x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (2.15)$$

Hierbei kann der Wert für die fiktive Wertabweichung Δx_i natürlich frei gewählt werden (z.B. mit dem Wert 1). Dadurch kann in weiterer Folge auch der Wert für die fiktive Funktionsabweichung Δf ermittelt werden.

$$x_i^* = x_i - \Delta x_i \quad (2.16)$$

$$f^* = f(x_i^*) \quad (2.17)$$

$$\Delta f = f(x_i) - f(x_i^*) = f - f^* \quad (2.18)$$

2.4.2 Charakteristika der Ringgitterkaskade

Die Ringgitterkaskade wurde konzipiert, um den Einsatz eines großen Spektrums an Messmethoden zu ermöglichen (z.B. wandstatische Druckbohrungen, Totaldruckrakes, Totaltemperaturrakes, Fünflochsonden, Druckchips an den TCF-Stützschaufeln, 3D-Hitzdrahtanemometrie, etc.) sowie den Umbau zwischen verschiedenen Prüfstandskonfigurationen (stationär mit/ohne Leiteinrichtung und instationär mit drehendem Speichenrad). Daraus folgt, dass eine Vielzahl von Versuchsfahrten an verschiedenen Tagen über einen größeren Zeitraum (netto bis zu mehreren Wochen) durchgeführt werden muss. Außerdem ermöglichen die Messgitter der Rakes eine Erfassung des Ringraums innerhalb der jeweiligen Messebene über den kompletten Umfang (360°) und jene der Fünflochsonde über einen definierten Winkelbereich. Die Feinheit der jeweiligen Messgitter bzw. Netze wird so gewählt, dass sich das Abfahren sämtlicher Messpunkte ab Messbeginn (von ca. 21 Uhr am Abend bis max. 6 Uhr früh am nächsten Morgen) zeitlich ausgeht.

Daraus können nun insgesamt drei konkrete Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Da die Verdichteranlage Luft aus der Umgebung ansaugt, kommt es bei Versuchsfahrten an verschiedenen Tagen zwangsläufig zu Unterschieden in Umgebungsdruck und -temperatur (**Day -To-Day Error**).

- Da eine Versuchsfahrt eine ganze Nacht lang dauern kann und im Sommer bspw. zwischen dem Start der Anlage am Vorabend bei noch warmen Umgebungstemperaturen und dem kältesten Punkt um ca. 4 Uhr in der Früh vor allem die Umgebungstemperatur einen stark abfallenden Verlauf verzeichnet, muss die Verdichteranlage so geregelt werden, dass der vorgegebene Betriebspunkt (z.B. der ADP) über den gesamten Verlauf der Messung gehalten werden kann, um die Messergebnisse nicht zu verfälschen. Da man hier jedoch nicht agieren sondern lediglich reagieren kann und die Anlagenregelung natürlich auch eine gewisse Trägheit aufweist, ergeben sich zwangsläufig über die Dauer der Versuchsfahrt Unterschiede bei Druck und Temperatur in der Zuströmung sowie im Massenstrom (**Operating Point Variation Error**).
- Die Wahl der Feinheit des Messgitters hat große Auswirkungen auf die späteren Messergebnisse, da von ihr die Erfassung bzw. Nichterfassung von wichtigen Strukturen innerhalb der Strömung abhängt. Bspw. können innerhalb einer Messebene nach einem Leitschaufelgitter bei einem Netz, welches immer nur Umfangsmesspunkte vor und nach einer Schaufel bereitstellt, die Nachläufe der Schaufelhinterkanten (Wakes) von den eingesetzten Messsonden nicht „gesehen“ bzw. erfasst werden. Im konkreten Fall der messtechnischen Bestimmung vom TCF-Druckverlust ergaben Untersuchungen²⁶, dass vor allem die Feinheit des Netzes in radialer Richtung einen großen Einfluss auf das Messergebnis hat (**Measurement Grid Selection Error**).

Die ersten beiden Abweichungen werden gemeinsam in Form der s.g. „**Day-To-Day and Operating Point Correction**“ korrigiert bzw. umskaliert, welche sich z.B. für einen gemessenen Totaldruck wie folgt darstellen lässt:

$$PT_{meas,corr} = PT_{meas} \cdot \frac{\overline{PT42B_{ref}}}{\overline{PT42B_{mean}}} \cdot \frac{\overline{PT39XX_{mean}}}{\overline{PT39XX_{meas}}} \quad (2.19)$$

*Day-To-Day
Correction
(Ebene B)*
*Operation Point
Correction
(Einlaufkessel)*

mit PT_{meas} ... lokal gemessener und zu korrigierender Messwert
 $\overline{PT42B_{ref}}$... Tagesreferenzdruck für die Anlage (Messebene 42)
 $\overline{PT42B_{mean}}$... flächengemittelter Wert aus der Rake-Messung (42) über die gesamte Messfahrt
 $\overline{PT39XX_{mean}}$... Mittelwert vom Mischkammerdruck (Messebene 39) über die gesamte Messfahrt
 $PT39XX_{meas}$... zeitsynchron mit PT_{meas} gemessener Mischkammerdruck (39)

Die Korrektur bspw. im Falle einer Totaltemperaturmessung erfolgt analog:

$$TT_{meas,corr} = TT_{meas} \cdot \frac{\overline{TT42B_{ref}}}{\overline{TT42B_{mean}}} \cdot \frac{\overline{TT39XX_{mean}}}{\overline{TT39XX_{meas}}} \quad (2.20)$$

Der **Measurement Grid Selection Error** muss nicht berücksichtigt werden, wenn man lediglich Änderungen bzw. Unterschiede zwischen zwei Messungen miteinander vergleicht (**Back-To-Back-Measurement**). Da im Falle dieser Arbeit jedoch ausschließlich die Initialmessung (360°-Rakemessung im Betriebspunkt ADP bei Synchrontraversierung der Ebenen A, B0, C und D) betrachtet wird (**Absolute Measurement**), muss die daraus resultierende Abweichung bei Totaldruckmessungen für den Duct Loss durch die hierfür empirisch repräsentative Messunsicherheit $u(e_{MGS}) = 1,2 \text{ mbar}$ berücksichtigt werden.

²⁶ Vgl. Zerobin, Steiner, Bauinger, Marn, Göttlich, Heitmeir (2017), S. 10.

2.5 MACHZAHLÄHNLICHKEIT

Zwei kompressible Strömungsfelder können als ähnlich betrachtet werden, wenn sie dieselbe Machzahl aufweisen. Unter der Annahme, dass die Strömungsparameter Druck, Temperatur und Massenstrom voneinander unabhängig variiert werden können, ist es möglich, zwei z.B. an unterschiedlichen Tagen innerhalb einer bestimmten Messebene eines Prüfstandes mit derselben Geometrie experimentell erfasste Strömungsfelder miteinander zu vergleichen. Diese Aussage soll nun anhand der nachfolgenden mathematischen Herleitungen untermauert werden.

Der Massenstrom an den Tagen I und II lässt sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung berechnen, wobei angenommen wird, dass die den Massenstrom bestimmende Axialkomponente der absoluten Strömungsgeschwindigkeit normal auf den betrachtenden Strömungsquerschnitt steht und die Gierwinkel (Yaw Angle) der Anströmung ident sind.

$$\dot{m}_{I,II} = \rho_{I,II} \cdot c_{I,II} \cdot \sin\alpha_{I,II} \cdot A = \rho_{I,II} \cdot c_{I,II,ax} \cdot A \quad \text{mit} \quad \alpha_I = \alpha_{II} \quad (2.21)$$

In (2.21) kann die Dichte mit Hilfe der Zustandsgleichung für ideale Gase

$$\frac{p}{\rho} = p \cdot v = R \cdot T \quad \text{bzw.} \quad \rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (2.22)$$

durch die Größen Druck und Temperatur ersetzt werden. Hierbei wird des Weiteren angenommen, dass es sich an beiden Tagen um dasselbe Strömungsmedium (z.B. Luft) handelt ($R = konst.$).

$$\dot{m}_{I,II} = \frac{p_{I,II}}{R \cdot T_{I,II}} \cdot c_{I,II,ax} \cdot A \quad (2.23)$$

Die Machzahl lässt sich als Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit zu lokaler Schallgeschwindigkeit ausdrücken.

$$Ma = \frac{c}{a} = \frac{c}{\sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}} \quad \text{mit} \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} \dots \text{Isentropenexponent} \quad (2.24)$$

Das heißt auch, dass der Feuchtigkeitsgehalt vom Gas eine Rolle spielt und bei Präzisionsmessungen berücksichtigt werden muss. Durch Erweiterung von (2.23) um den Isentropenexponenten in Zähler und Nenner kann die Machzahl in die Gleichung eingeführt werden, welche ja an beiden Tagen gleich sein soll ($Ma_{I,ax} = Ma_{II,ax} = Ma_{ax}$).

$$\dot{m}_{I,II} = \frac{p_{I,II}}{\sqrt{R \cdot T_{I,II}} \cdot \sqrt{R \cdot T_{I,II}}} \cdot c_{I,II,ax} \cdot A \quad \left| \cdot \frac{\kappa}{\kappa} \right.$$

$$\dot{m}_{I,II} = \frac{\kappa \cdot A}{\sqrt{\kappa \cdot R}} \cdot Ma_{ax} \cdot \frac{p_{I,II}}{\sqrt{T_{I,II}}} \quad (2.25)$$

Der Druck $p_{I,II}$ und die Temperatur $T_{I,II}$ repräsentieren statische Größen und sind mittels berührender Messtechnik lokal im Strömungsfeld nur sehr schwer zu erfassen (vor allem aber die statische Temperatur). Aus diesem Grund werden vor allem bei Messungen mit Kammsonden (Rakes) die Totalgrößen innerhalb des Strömungsfelds erfasst,

welche mit den statischen Größen in einem festen Zusammenhang stehen. Unter der Annahme eines idealen Recovery-Faktors ($r = 1$) kann (4.1) wie folgt umgeschrieben werden.

$$T_{t,I,II} = T_{I,II} + \frac{c_{I,II}^2}{2c_p} = T_{I,II} + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \frac{c_{I,II}^2}{\kappa \cdot R} \quad \text{mit} \quad c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R$$

$$T_{t,I,II} = T_{I,II} \cdot \left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \frac{c_{I,II}^2}{\kappa \cdot R \cdot T_{I,II}} \right] = T_{I,II} \cdot \left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma_{I,II}^2 \right]$$

Natürlich gilt auch hier wieder die Gleichheit der Machzahlen ($Ma_I = Ma_{II} = Ma$). Der Ausdruck kann nun noch nach der statischen Temperatur bzw. nach dem Reziprokwert ihrer Wurzel umgeformt werden.

$$T_{I,II} = T_{t,I,II} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma^2 \right]} \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{\sqrt{T_{I,II}}} = \frac{1}{\sqrt{T_{t,I,II}}} \cdot \left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

Wenn man annimmt, dass das Fluid im Staupunkt einer eingetauchten Totaldruckmesssonde verlustfrei (reversibel) aufgestaut bzw. verdichtet wird, dann kann der Zusammenhang zwischen statischen und Totalgrößen mit Hilfe der Isentropenbeziehung (2.28) und der Zustandsgleichung des idealen Gases (2.22) beschrieben werden.

$$p \cdot v^\kappa = \frac{p}{\rho^\kappa} = \text{konst.} \quad (2.28)$$

$$\frac{p_{I,II}}{\rho_{I,II}^\kappa} = \frac{p_{t,I,II}}{\rho_{t,I,II}^\kappa} \quad \rightarrow \quad \frac{\rho_{I,II}}{\rho_{t,I,II}} = \left(\frac{p_{I,II}}{p_{t,I,II}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (2.29)$$

$$\begin{array}{l} p_{I,II} \cdot \frac{1}{\rho_{I,II}} = R \cdot T_{I,II} \\ p_{t,I,II} \cdot \frac{1}{\rho_{t,I,II}} = R \cdot T_{t,I,II} \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \curvearrowright \\ \blacktriangleright \end{array} \right\} \div$$

$$\frac{p_{I,II} \cdot \rho_{t,I,II}}{p_{t,I,II} \cdot \rho_{I,II}} = \frac{T_{I,II}}{T_{t,I,II}} \quad \rightarrow \quad \frac{p_{t,I,II}}{p_{I,II}} \cdot \frac{\rho_{I,II}}{\rho_{t,I,II}} = \frac{T_{t,I,II}}{T_{I,II}} \quad (2.30)$$

Mit Einsetzen von (2.29) in (2.30) folgt:

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_{t,I,II}}{p_{I,II}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa}} \cdot \left(\frac{p_{t,I,II}}{p_{I,II}} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} &= \frac{T_{t,I,II}}{T_{I,II}} \\ \frac{p_{t,I,II}}{p_{I,II}} &= \left(\frac{T_{t,I,II}}{T_{I,II}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Durch Einsetzen von (2.26) in (2.31) und Auflösen nach dem statischen Druck folgt weiters:

$$\frac{p_{t,I,II}}{p_{I,II}} = \left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$p_{I,II} = \frac{p_{t,I,II}}{\left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}} \quad (2.32)$$

Mit Hilfe von (2.27) und (2.32) ist es nun möglich, die statischen Größen in (2.25) durch die Totalgrößen zu ersetzen.

$$\dot{m}_{I,II} = \frac{\kappa \cdot A}{\sqrt{\kappa \cdot R}} \cdot Ma_{ax} \cdot \frac{p_{t,I,II}}{\sqrt{T_{t,I,II}}} \cdot \frac{\left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}$$

$$\dot{m}_{I,II} = A \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{\kappa}{R}} \cdot Ma_{ax} \cdot \left[1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot Ma^2 \right]^{\frac{1}{2} \frac{\kappa+1}{\kappa-1}}}_{\otimes} \cdot \frac{p_{t,I,II}}{\sqrt{T_{t,I,II}}} \quad (2.33)$$

Der Ausdruck \otimes in (2.33) enthält beim Vergleich der beiden Tage I und II anhand der oben getroffenen Annahmen nur konstante Größen, was zu einer Beziehung führt, die allgemein als „**reduzierter Massenstrom**“ bekannt ist.

$$\dot{m}_I \frac{\sqrt{T_{t,I}}}{p_{t,I}} = \dot{m}_{II} \frac{\sqrt{T_{t,II}}}{p_{t,II}} = \dot{m}_{red} = konst. \quad (2.34)$$

D.h. wenn die obige Beziehung erfüllt ist, dann können die Strömungsfelder zweier verschiedener Versuchsfahrten an den Tagen I und II als ähnlich betrachtet werden.

Bezieht man zusätzlich sowohl Totaldruck als auch Totaltemperatur auf die in der Luftfahrt gebräuchliche Normatmosphäre (International Standard Atmosphere, kurz ISA), dann ergibt sich der s.g. „**korrigierte Massenstrom**“.

$$\dot{m}_{I,II} \frac{\sqrt{\frac{T_{t,I,II}}{T_{ref,ISA}}}}{\left(\frac{p_{t,I,II}}{p_{ref,ISA}} \right)} = \dot{m}_{I,II} \frac{\sqrt{\frac{T_{t,I,II}}{288,15K}}}{\left(\frac{p_{t,I,II}}{1013,25mbar} \right)} = \dot{m}_{corr} = konst. \quad (2.35)$$

3 VERSUCHSEINRICHTUNG UND PRÜFSTANDSAUFBAU

In diesem Kapitel erfolgt zuerst eine kurze und bündige Vorstellung der Verdichteranlage des Instituts, welche für die Ringgitterkaskade den notwendigen Luftmassenstrom bereitstellt, um anschließend detailliert in den Schwerpunkt dieser Arbeit einzugehen, nämlich den Aufbau und die Ausrichtung des Prüfstandes.

3.1 VERDICHTERANLAGE AM INSTITUT FÜR THERMISCHE TURBOMASCHINEN

Die Verdichteranlage setzt sich aus folgenden Hauptkomponenten zusammen:

- zwei Schraubenverdichter E1+E2 (Atlas Copco ZA6 und 6B), welche sich ein Gehäuse teilen und gemeinsam von einem Elektromotor angetrieben werden,
- ein Turboverdichter (Atlas Copco SC14) mit verstellbaren Vorleitschaufeln zur Einstellung eines Vordralls,
- ein Turboverdichter (Atlas Copco SC20) mit einem Nachleitapparat und
- zwei Luft-Wasser-Wärmeübertrager (K1 und K2) zur Abkühlung der komprimierten Luft auf die für den aktuellen Prüfstand benötigte Temperatur (maximal erreichbare Abkühlung der Luft um ca. 80K).

Die Eckdaten der Verdichter, welche die Luft direkt aus der Umgebung ansaugen, sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Üblicherweise zieht man für derartige Darstellungen entweder den Normzustand ($p_n=1,01325\text{bar}$; $t_n=0^\circ\text{C}$ bzw. $T_n=273,15\text{K}$) oder den Standardzustand ($p^0=1\text{bar}$; $t^0=25^\circ\text{C}$ bzw. $T^0=298,15\text{K}$) heran.

Tabelle 3.1: Eckdaten der Verdichteranlage bei 1,01325bar und 25°C

| Verdichter | Ansaugvolumenstrom | Luftdichte | Massenstrom | Druckverhältnis | Verdichterdrehzahl | Motordrehzahl | Motorleistung |
|------------|--------------------|------------|-------------|-----------------|--------------------|---------------|---------------|
| | m ³ /h | | | | | | |
| E1+E2 | 8000 | 1,1839 | 2,6 | 3,1 | 3730 | 1485 | 400 |
| SC14 | 15500 | | 5,1 | 2,9 | 20930 | 996÷1482 | 900 |
| SC20 | 27500 | | 9,0 | 2,9 | 15780 | 2978 | 1450 |

Daraus ist ersichtlich, dass ein Luftmassenstrom zwischen minimal 2,6 kg/s und maximal 16,7 kg/s infolge Parallelschaltung variiert oder durch Serienschaltung ein maximales Druckverhältnis von ca. 9 bereitgestellt werden kann. Abbildung 3.1 zeigt den Schaltplan der Anlage. Eine Vielzahl an Klappen und Ventilen ermöglicht bis zu 13 unterschiedliche Fahrweisen der Anlage, welche durch eine Hoch- (HP) bzw. Niederdruckleitung (LP) mit den verschiedensten Prüfständen am Institut verbunden ist, darunter auch die Ringgitterkaskade. Nach dem Durchlaufen des jeweiligen Prüfstandes wird die Luft über einen Abluftturm mit integriertem Schalldämpfer nach außen wieder zurück in die Umgebung abgeführt.

Für den in dieser Arbeit behandelten Prüfstand wurde die Fahrweise 6 ausgewählt, welche in Abbildung 3.2 farblich hervorgehoben ist. Dabei werden alle Verdichter zueinander parallelgeschaltet (= größtmöglicher Massenstrom im Niederdruckleitsystem). Die Luftströme aus den Schraubenverdichtern E1+E2 vermischen sich mit jenem aus dem Turboverdichter SC20 und werden anschließend im Kühler K1 rückgekühlt, um letztendlich noch mit dem im Kühler K2 rückgekühlten Luftstrom aus dem Turboverdichter SC14 vermisch zu werden. Dadurch ist es möglich, die für die im Unterkapitel 5.1 besprochene Betriebspunkteinstellung notwendigen Zuströmbedingungen zu gewährleisten.

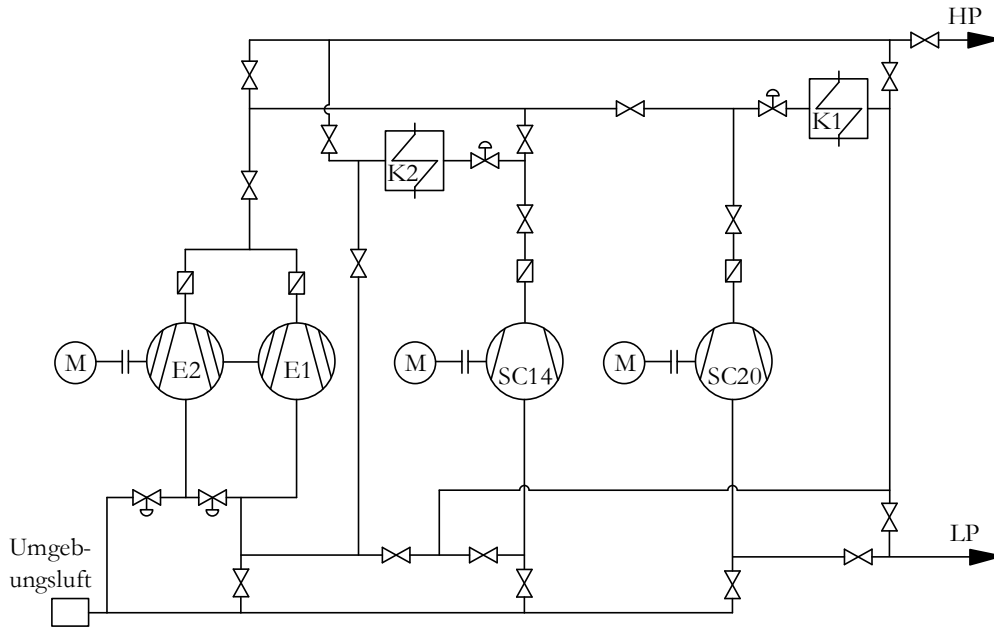


Abbildung 3.1: Schaltplan der Verdichteranlage (allgemein), Quelle: Eigene Darstellung.

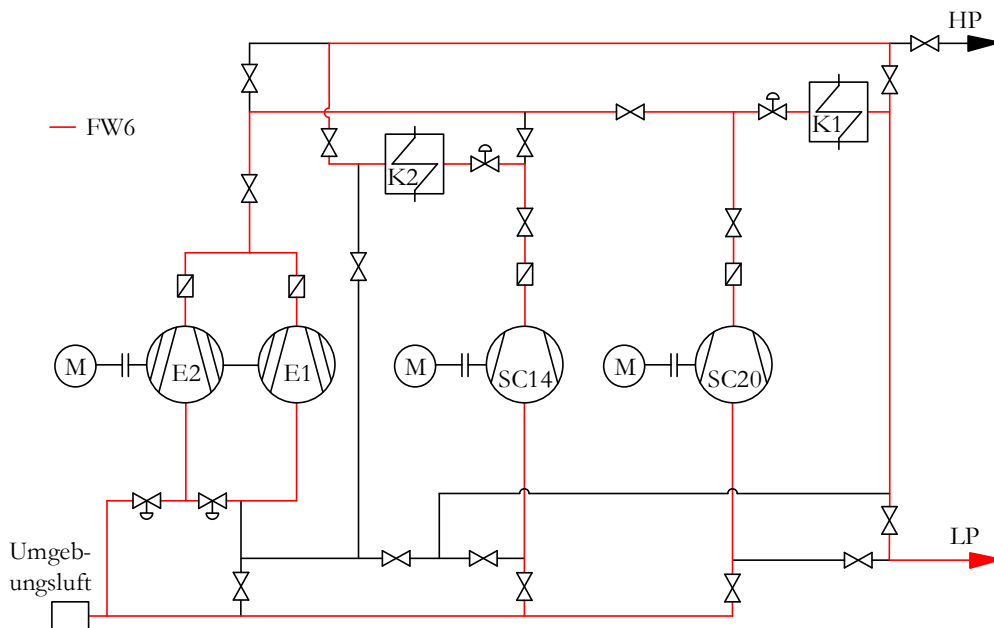


Abbildung 3.2: Schaltplan der Verdichteranlage (Fahrweise 6 rot dargestellt).

3.2 RINGGITTERKASKADE

Die untere Abbildung zeigt das von Steiner mit dem Programm SolidWorks 2015 erstellte 3D-Modell des Prüfstandes.

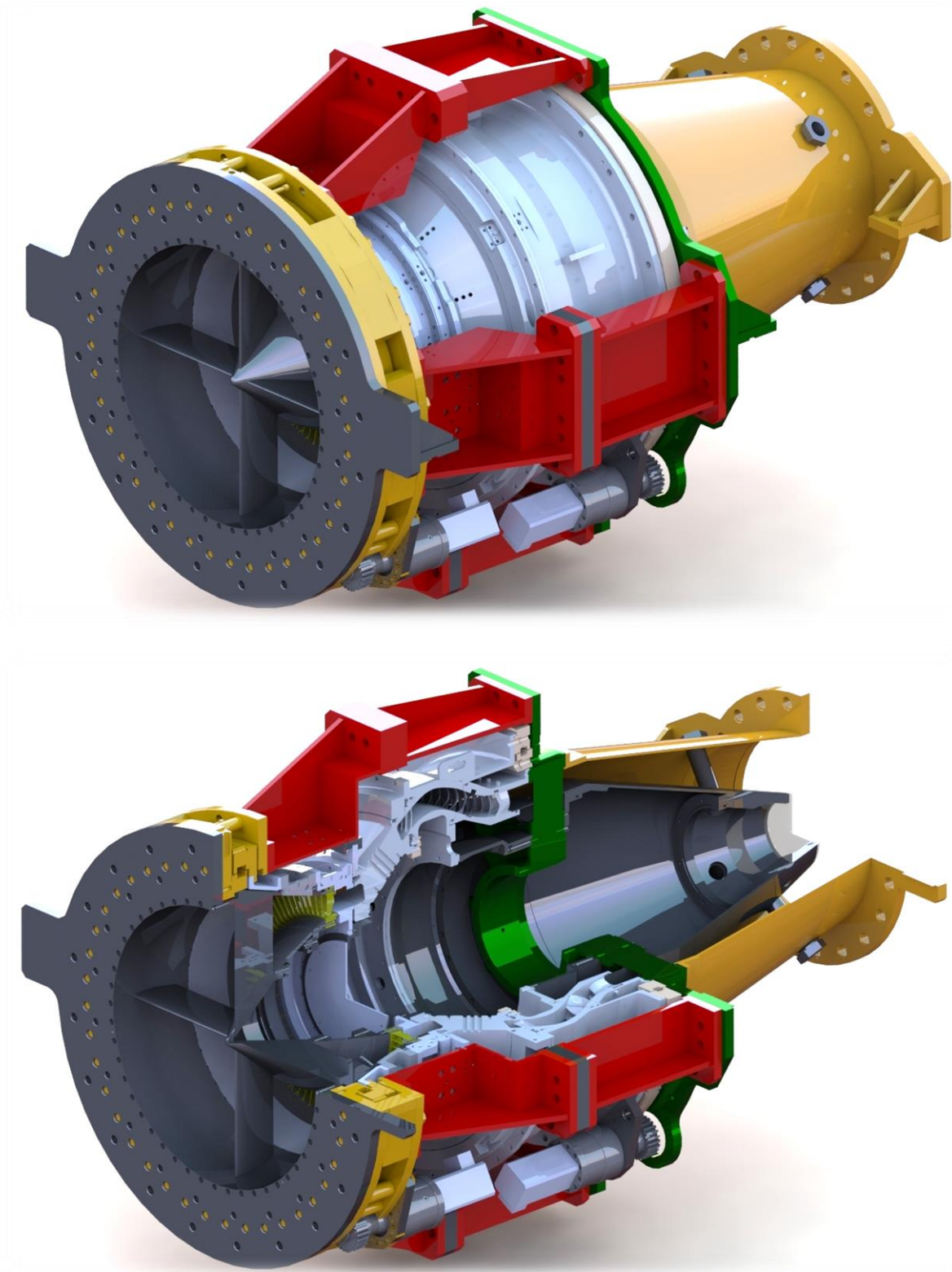


Abbildung 3.3: 3D-CAD-Modell der Ringgitterkaskade.

Es liegt in der Natur der Sache, dass Montagearbeiten infolge Zeitdruck in Kombination mit Lieferverzögerungen, Engpässen bei Montageteilen, begrenzter Verfügbarkeit von Fachpersonal für Spezialarbeiten (wie z.B. Schweißen) und notwendigen Ausbesserungsarbeiten zum Teil nicht in der vorgegebenen Abfolge durchgeführt werden können. In den nachfolgenden Abschnitten wird jedoch im Hinblick auf Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit versucht, die einzelnen Arbeitsschritte in einer chronologisch flüssigen Reihenfolge darzustellen. Demnach kann es also vorkommen, dass auf einigen Fotoaufnahmen u.U. die Montage von bereits beschriebenen Komponenten noch nicht erfolgt ist oder umgekehrt. Dennoch gilt letztendlich die hier angeführte Montagereihenfolge.

Diese ergibt sich automatisch durch den sequentiellen Aufbau des Ringraumes ausgehend vom Backward-Rig sowie vom Forward-Rig jeweils in Richtung der Teilungsebene des Prüfstandes (siehe Abbildung 3.4), anschließender Ausrichtung und zu guter Letzt durch das Schließen des Prüfstandes. Für eine übersichtliche Darstellung der Montagearbeiten wird der Prüfstand zusätzlich in Einlaufbereich, Mittelteil und Auslaufbereich unterteilt. Der Aufbau von zusätzlich notwendigen Peripheriekomponenten wird jeweils zum passenden Zeitpunkt ergänzt.

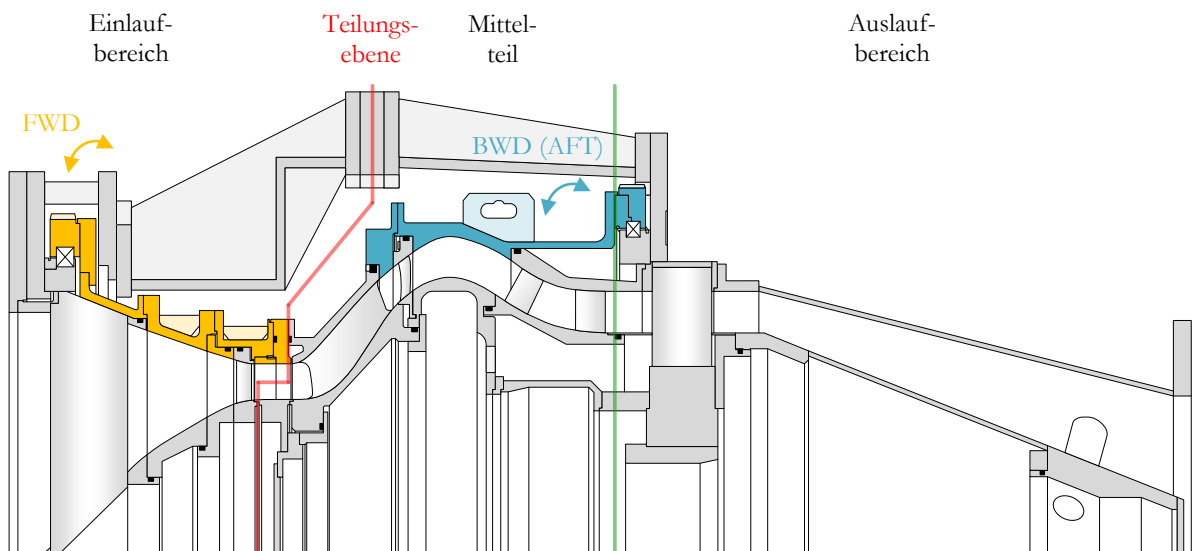


Abbildung 3.4: AnCa-Schnittbild mit Darstellung von Teilungsebene (rot), Bereichsdefinitionen und azimuthal traversierbaren Komponenten (dunkelgelb und blau).

An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass es im Zuge des mechanischen Aufbaus auch einige Instrumentierungsarbeiten gibt, die aufgrund von späterer Unzugänglichkeit nicht bis zur eigentlichen Instrumentierung hinausgezögert werden können. Daher werden diese ebenfalls zum jeweils anfallenden Zeitpunkt beschrieben, wobei jedoch immer ein Bezug zum zugehörigen Abschnitt in Unterkapitel 4.3 hergestellt wird.

3.2.1 Vorbereitungsarbeiten

Die Montage des Prüfstandes erfolgt neben dem s.g. „Heißgasprüfstand“ im ersten Kellergeschoß des Instituts. Als Ausgangsbasis hierfür dienen die folgenden in Abbildung 3.5 dargestellten Komponenten:

1. Federfundament inkl. Zusatztragelementen (Rohrabstützungen, I-Träger),
2. Beweglicher Rahmen auf I-Trägern mit Laufschienen,
3. Beweglicher Portalkran (Nutzlast: 2 t) und Drehkran (Nutzlast: 1 t),
4. Zuluft-Rohrleitung (von der Verdichteranlage),
5. Einlaufkessel mit integrierter Lochscheibe zur Vergleichmäßigung des Strömungsprofils und
6. Abluft-Rohrleitung (zum Abluftturm) mit bereits instrumentierten Messsonden zur Druck-, Temperatur- und Massenstromermittlung für die Betriebsdatenerfassung (BDE) laut Anlagenschema in Abbildung 4.35.

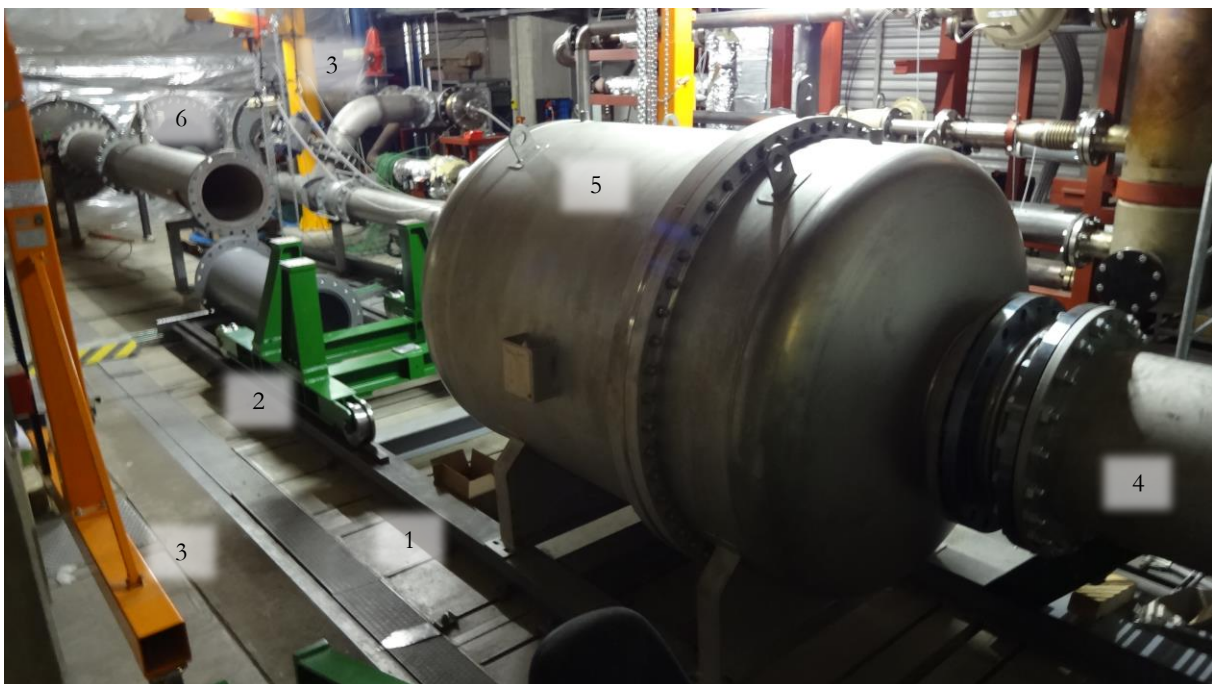


Abbildung 3.5: Ausgangssituation für die Prüfstandsmontage.

3.2.1.1 Beruhigungskammer

Der Einlaufkessel mitsamt Lochscheibe ist in Abbildung 3.6 mit Blick stromaufwärts dargestellt. Die Anordnung und Größe der einzelnen Löcher wurde anhand von numerischen Strömungssimulationen ermittelt. Dass sich die Löcher kleinsten Durchmessers bei der Achse befinden und die Lochdurchmesser radial nach außen in Richtung Kesselwand stetig zunehmen ist auch rein qualitativ plausibel in Bezug auf übliche Geschwindigkeitsprofile bei Rohrströmungen.

Auch in diesem Bereich des Prüfstandes kommen Sonden zur Betriebsdatenerfassung laut dem Anlagenschema in Abbildung 4.35 zum Einsatz. Die Totaltemperatur TT39XX wird mittels in die Strömung gehaltenem Widerstandsthermometer erfasst und der Totaldruck PT39XX mit einer entsprechend geeigneten Drucksonde.

Hierfür wird eine von vier Muffen verwendet, welche prinzipiell zur Entleerung des Wassers nach einer Kesseldruckprüfung konstruktiv vorgesehen sind. Aus Gründen der Zugänglichkeit wird die obere Muffe stromabwärts hinter der Lochscheibe für die Instrumentierung der Sonden ausgewählt. Alle anderen werden mit Stopfen verschlossen.



Abbildung 3.6: Einlaufkessel mit Lochscheibe zur Vergleichmäßigung der Strömung.

Zur Gewährleistung einer sicheren Abdichtung in der Druckstufe PN10 werden geeignete Schweißmuffen mit kegeligen Rohrgewinden verwendet und wie unten abgebildet miteinander verschweißt, sodass die in den Kessel eingeschraubte Konstruktion das Widerstandsthermometer und die Wanddruckmesssonde aufnehmen kann.



Abbildung 3.7: Schweißkonstruktion einer Muffe zur Aufnahme der Messsonden im Einlaufkessel.

3.2.1.2 Abluftrohr

Laut dem Anlagenschema in Abbildung 4.35 gibt es zwei mit Druckluft versorgte Dichtstellen beim Prüfstand. Der Anschlusspunkt des Abluftrohres eignet sich aufgrund seiner relativen Lage zur zentralen Druckluftversorgung des Instituts und zur Versuchswarte sehr gut als zentraler Knotenpunkt für die elektronischen und pneumatischen Anschlüsse des Prüfstands (siehe Abbildung 3.8). Damit kann gewährleistet werden, dass das Ein- und Ausschalten bzw. Öffnen und Schließen derartiger Prüfstandskomponenten sehr schnell und komfortabel an ein und demselben Ort durchgeführt werden kann.

Zuerst werden hierfür Durchgangslöcher in die Rohrabstützung gebohrt, um dort ein Druckluftventil (z.B. von der Fa. FESTO) mittels Durchsteckschraubverbindung zu montieren. Bei M5-Schrauben beispielsweise würden mittlere Lochdurchmesser 5,5mm betragen. Am Ventilausgang wird anschließend zusätzlich eine elektronisch angesteuerte Einheit für die Regelung im Betrieb angekoppelt. Der Eingang kann durch Verlegung eines Druckschlauches über die Kabeltrassen mittels geeignetem Adapter mit der zentralen Druckluftversorgung des Instituts verbunden werden. Ab diesem Zeitpunkt sichert der Druckregler ab und das zentrale Ventil kann offen bleiben.

Als nächstes wird der Schaltkasten neben dem Abluftrohr montiert, welcher letztendlich das Massenstrommessgerät (FlowCOM) und das in Unterkapitel 4.4 kurz erläuterte CompactRIO (kurz CRIO) aufnehmen soll. Der Schaltschrank benötigt Dimensionen im Bereich von 600x760x350 mm. Da die Montage am Federfundament erfolgt, sind vor allem die elektronischen Komponenten vor Schwingungen während des Betriebs zu schützen. Es werden daher geeignete Stützleisten durch Verschweißen von Rechteckprofilen gefertigt, mit Durchgangslöchern versehen und mit dem Schaltschrank verschraubt. Die Verbindung zum Federfundament erfolgt über geeignete Dämpfungselemente auf handelsüblichen I-Profil-Stahlträgern, welche mit den Schienen im Fundament über s.g. Halfen verankert werden.

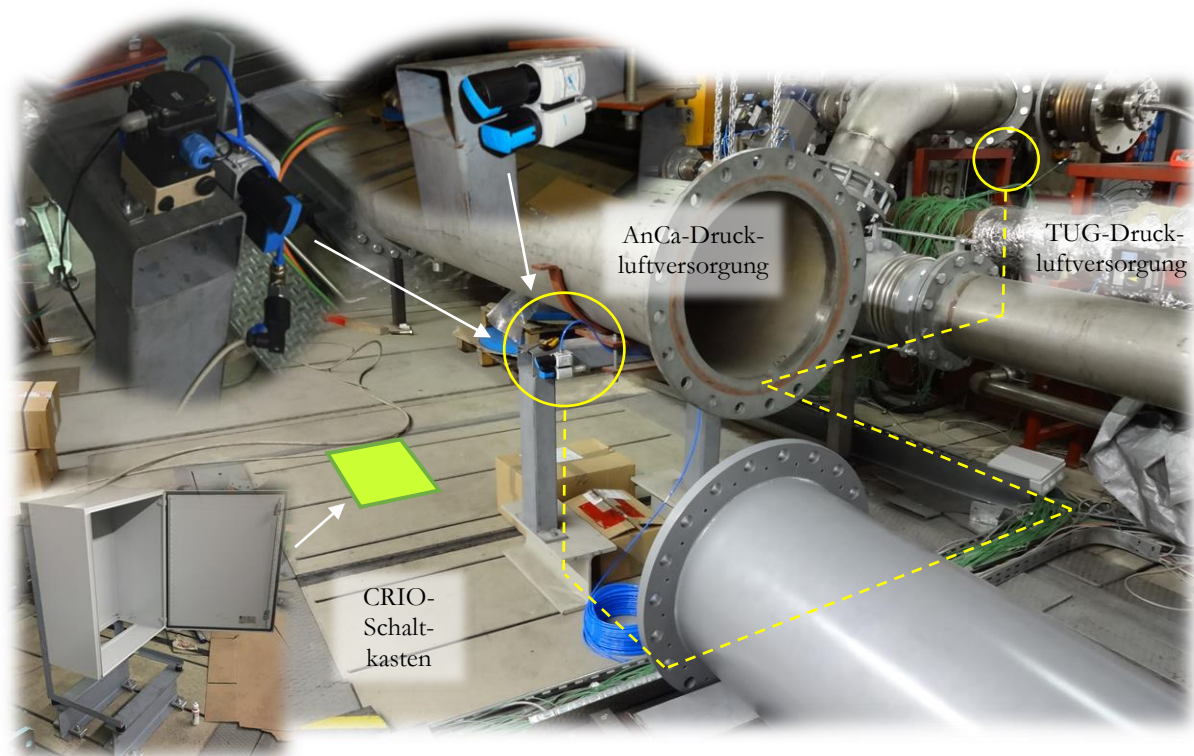


Abbildung 3.8: Zentraler Knotenpunkt für elektronische und pneumatische Prüfstandsanschlüsse.

3.2.1.3 Beweglicher Rahmen

Der Rahmen, welcher letztendlich den Prüfstandsaufbau trägt und dessen statisch (z.B. Gewichtskraft) sowie dynamisch (z.B. Schwingungen) hervorgerufenen Kräfte in das Federfundament einleitet, ist in erster Linie für den Einbau von Komponenten (z.B. Übergangskanälen) unterschiedlicher Länge axial beweglich ausgeführt. Da der Prüfstand nicht nur für Messungen mit rein stationären Bauteilen konzipiert wurde, sondern der Innenraum auch um ein rotierendes Laufrad mitsamt Antriebsmotor erweitert werden kann, ermöglicht dieses Konzept auch ein Öffnen des Prüfstandes mit wenigen Handgriffen sowie die Bereitstellung von genügend Platz für einen Umbau (Hinein- und Herausheben von Bauteilen mittels Kran, etc.). Weitere Vorteile ergeben sich durch Ermöglichung von Wartungs- und Instrumentierungsarbeiten im Bereich der Teilungsebene sowie eine einfachere Ausrichtung des Prüfstandes.

Die Realisierung dieser Beweglichkeit sowie die Vermeidung von hierdurch induzierten negativen Einflüssen auf den Prüfstand erfordern jedoch die Konzipierung und Montage von folgenden Zusatzkomponenten, welche in der dargestellten Reihenfolge auf den nächsten Seiten näher erläutert werden:

- Seilwinde mit zusätzlicher Umlenkrolle und Nachspannelementen,
- flexibler Leitungskanal und
- Exzenter-Klemmvorrichtungen.

Die für eine Bewegung des Rahmens entlang der Maschinenachse notwendigen Freiheitsgrade ergeben sich durch die Lagerung des Rahmens auf vier Stahlrädern, welche entlang von auf I-Profil-Stahlträgern verschweißten Schienen abrollen. Diese Träger erstrecken sich über die gesamte Prüfstandslänge und dienen somit auch als Auflager für die vier Sockel des Einlaufkessels. Die Verankerung mit dem Federfundament erfolgt auch hier mittels s.g. Halfen.

Für die Erzeugung einer horizontalen Vorwärts- bzw. Rückwärtsbewegung des Rahmens soll nun eine auf einem stationären Querträger montierte Zwei-Wege-Seilwinde eingesetzt werden. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sich ihre Seilrolle in zwei durch eine Zwischenwand voneinander getrennte Bereiche teilt, auf welche zwei Stahlseile in zueinander entgegengesetzter Umfangsrichtung aufgewickelt werden, wodurch sich infolge Betätigung der Kurbel eine lineare Vorwärtsbewegung des einen Seils und gleichzeitig eine Rückwärtsbewegung des zweiten Seils ergibt.

Dieser Vorgang ist in Abbildung 3.9 oben schematisch dargestellt, wobei ein Seil (rot dargestellt) mit der am hinteren Querträger des beweglichen Rahmens montierten Zugöse verankert wird und das andere (blau dargestellt) mit jener am vorderen Querträger, nachdem es über eine weitere auf einem stationären Querträger montierte Rolle umgelenkt wurde. Abhängig von der Richtung der Kurbelbetätigung ergibt sich nun entweder eine Vorwärts- oder eine Rückwärtsbewegung, wobei ein Seil unter Zug steht während das andere spannungsfrei auf- bzw. abgewickelt wird.

Die Fotoaufnahmen in Abbildung 3.9 unten zeigen sowohl Seil- als auch Umlenkrolle nach der Montage. Bei der Paarung Stahl auf Stahl liegt der Haftreibungskoeffizient bei einem Wert von ca. 0,2. Bei einer angenommenen Masse des Prüfstandes von ca. 1,5 Tonnen ergeben sich somit Zugmassen im Bereich von 300 kg. Sowohl die Stahlseile als auch die Seilösen und Trägerverankerungen im Fundament müssen diese Kräfte ohne Gefährdung der Sicherheit aufnehmen können. Nach der später erfolgenden Grobausrichtung des Prüfstandes sind die Querträger unbedingt durch Schweißverbindungen mit den Längsträgern zu fixieren. Die Einleitung der Bewegung mittels Handkurbel hingegen erfordert aufgrund des großen Hebelarms und einer Untersetzung durch ein Getriebe nur geringen Kraftaufwand.

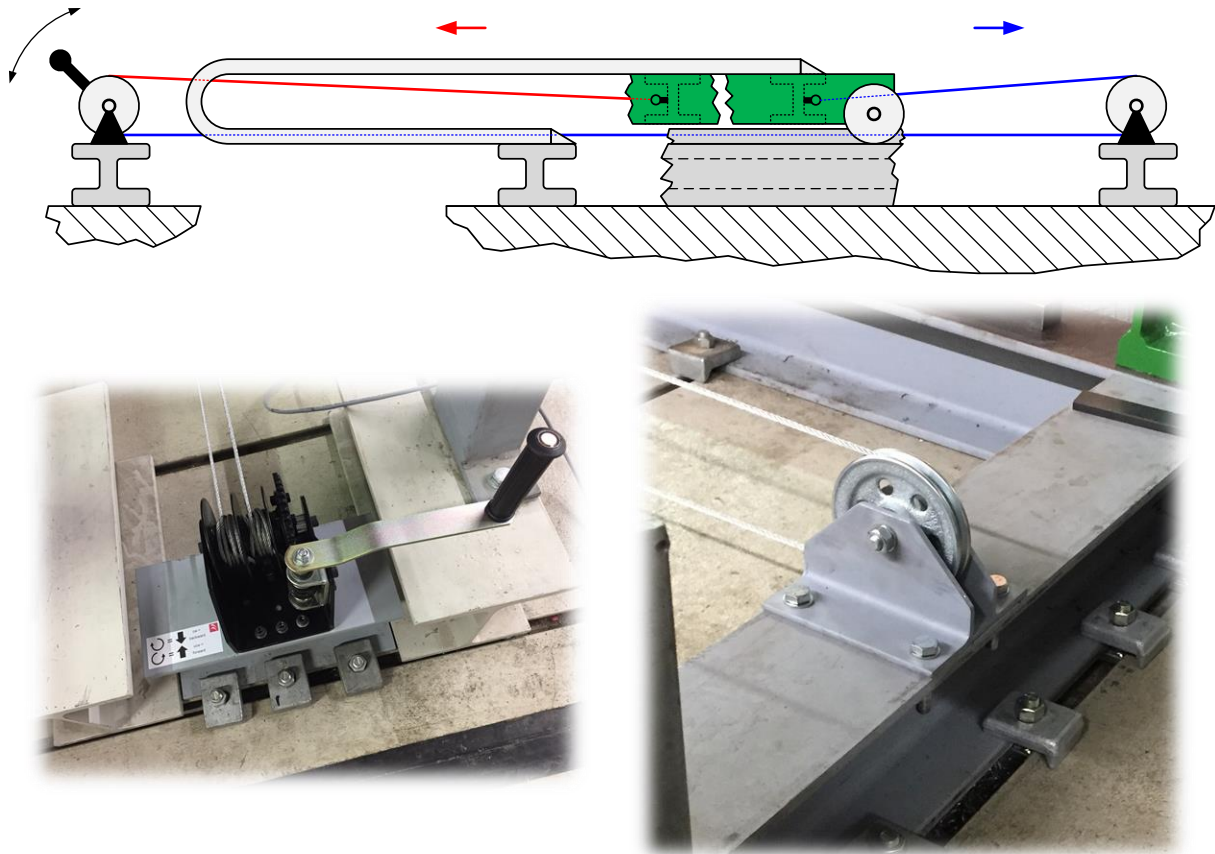


Abbildung 3.9: Entwurfsschema für Bewegung des Rahmens mittels einer Zwei-Wege-Seilwinde (oben) sowie Fotoaufnahmen nach der Montage von Seilwinde (unten links) und Umlenkrolle (unten rechts).

Dass der Prüfstand, welcher nach der Instrumentierung eine Vielzahl von Druckschläuchen und elektronischen Kabeln aufweisen wird, nun beweglich ist, erfordert natürlich auch eine spezielle Art der Leitungsverlegung, um eine Beschädigung oder gar Zerstörung der Leitungen infolge der Bewegung (z.B. durch Ausreißen oder Abschneiden) bereits im Vorhinein auszuschließen.

Das hier verwendete Konzept ist in Abbildung 3.10 schematisch dargestellt. Es handelt sich dabei um einen flexiblen und über eine bestimmte Länge frei tragenden Leitungskanal mit einer 180°-Umlenkung, dessen Anschlusspunkte auf der einen Seite mit einem stationären Querträger und auf der anderen Seite mit dem vorderen Querträger des beweglichen Rahmens verbunden werden. Dadurch können Leitungen mit fester Länge verlegt werden, da diese selbst im Fall einer Bewegung weder gestaucht noch gestreckt werden. Die Verbindung erfolgt wie bei den Komponenten der Seilwinde mittels Durchsteckschraubverbindungen, wobei sich für die Erzeugung der hierfür notwendigen Durchgangslöcher in den Stahlträgern eine Magnetbohrmaschine aufgrund ihrer einfachen Lagefixierung sehr gut eignet.

Die angegebenen Abmessungen sollen ein Gefühl für die Dimensionen vermitteln. Eine innere Breite des Leitungskanals von ca. 225 mm ermöglicht das Einziehen einer Vielzahl von Kabeln unterschiedlicher Durchmesser (Anschlusskabel für Elektromotor, Thermoelement-Kabel), ohne dabei zu riskieren, dass die ohnehin schon kleinen Leitungsquerschnitte der Druckschläuche infolge Platzmangels noch weiter eingengen werden. Ein Verfahrensweg von ca. 1,3 m ermöglicht es, dass sich gleichzeitig zwei Personen in der Montagebucht aufhalten können, während große und sperrige Bauteile (wie z.B. ein Elektromotor) mittels Kran hineingehoben werden. Die hintere Kante der Kanalumlenkung bewegt sich natürlich stets um die Hälfte des vom Rahmen zurückgelegten Weges fort.

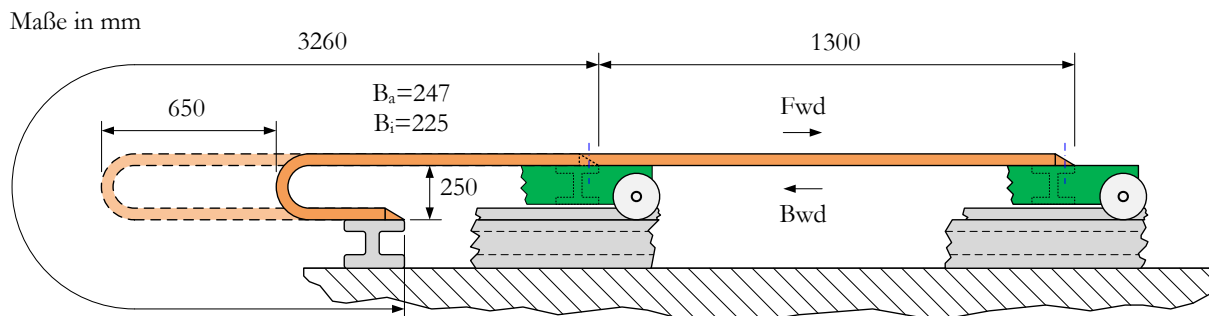


Abbildung 3.10: Entwurfsschema für flexiblen Leitungskanal am beweglichen Rahmen.

Die Fotoaufnahme in Abbildung 3.11 zeigt die Positionen der verbauten Komponenten auf einen Blick. Im Bereich der bereits ausgelasteten Kabeltrasse wird ein zweiter flexibler Leitungskanal verlegt, um einerseits im Betrieb die Leitungen über den Gangbereich kompakt und sicher zu den Messschränken und zur Versuchswarte zu führen und um andererseits außerhalb der Betriebszeiten nach Abkopplung der Leitungen am Abluftrohr befestigt zu werden, damit der Gangbereich mit Ausnahme der stationären Komponenten weitestgehend frei bleibt.

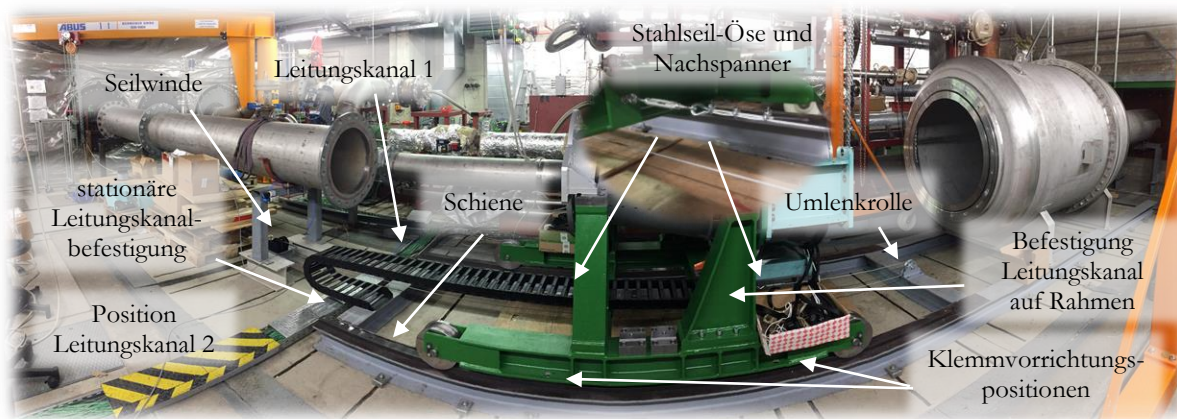


Abbildung 3.11: Positionen der Zusatzkomponenten für den beweglichen Rahmen.

Zur Befestigung des zweiten Leitungskanals wird eine handelsübliche Stahlplatte aus dem Materiallager verwendet, welche einseitig mit dem hinteren Querträger, an dem auch der erste Leitungskanal befestigt wurde, verbunden wird, um in Form eines auskragenden Biegebalkens den Leitungskanal aufnehmen zu können.

Es müssen auf der Stahlplatte insgesamt sieben M8-Durchgangslöcher ($\text{Ø}9 \text{ mm}$) für Durchsteckschraubverbindungen mittels Einspannung in einer Standbohrmaschine angefertigt werden, wobei drei für die Aufnahme des Leitungskanals und die restlichen vier für die Verbindung mit dem I-Träger dienen. Die zugehörigen Durchgangslöcher auf dem Träger werden wieder mit der Magnetbohrmaschine gebohrt. Die Stahlplatte muss vor der Montage zum Schutz gegen Rost lackiert werden und anschließend trocknen.

Die fertig montierte Platte ist in Abbildung 3.12 links dargestellt und der montierte Leitungskanal im aufgewickelten Zustand rechts.

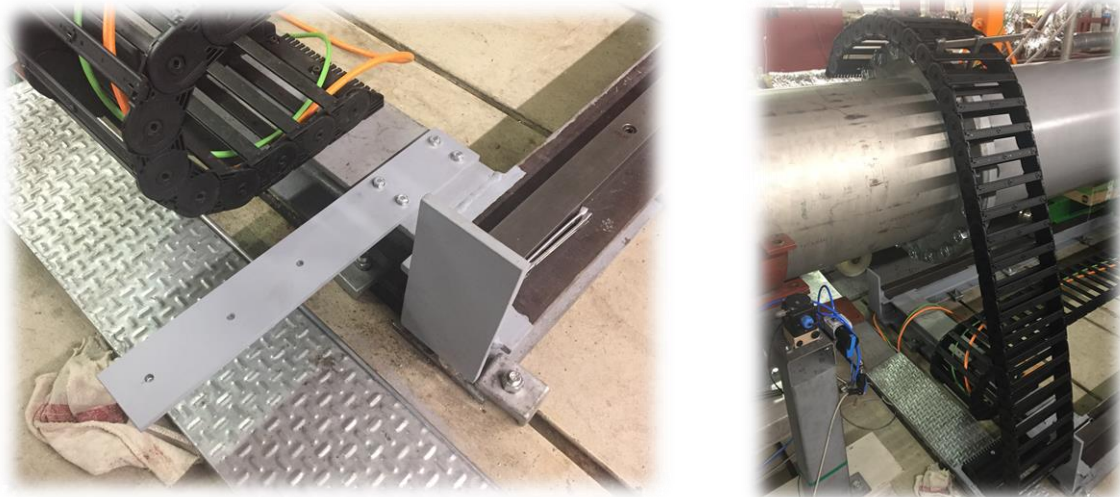


Abbildung 3.12: Stationärer Auskragsbalken zur Befestigung des zweiten Leitungskanals (links) und montierter Leitungskanal im aufgerollten Zustand (rechts).

Ein weiterer Nebeneffekt der Verfahrbarkeit des Rahmens ist das seitliche Spiel zwischen Führungsschiene auf dem Längsträger und den darauf abrollenden Stahlrollen des Rahmens. Dieses Spiel hat sowohl einen Vorteil als auch einen Nachteil. Es wirkt sich später bei der Ausrichtung des Prüfstandes positiv aus, da sich dadurch eine relativ einfache Möglichkeit ergibt, den Prüfstand bei der Feinausrichtung in Querrichtung um mehrere 1/10 mm zu versetzen. Nach der Ausrichtung jedoch und auch während des Betriebs der Anlage ist es hingegen unerwünscht.

Es wird demnach ein flexibles Konzept benötigt, welches eine dauerhafte jedoch auch reversible Klemmwirkung ermöglicht, d.h. dass diese jederzeit manuell und mit nur wenigen Handgriffen wieder aufgehoben werden kann. Eine Fotoaufnahme der realisierten Lösung mitsamt zugehörigen Komponenten ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

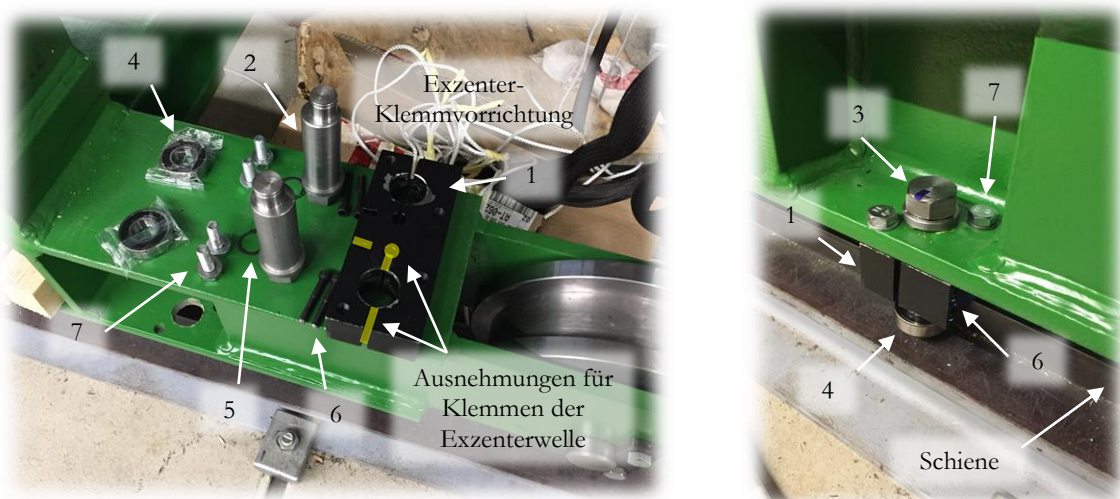


Abbildung 3.13: Komponenten für die Exzenter-Klemmvorrichtung (links) und Einbauzustand (rechts).

Dabei werden pro Klemmvorrichtung die Zahlen folgenden Komponenten zugeordnet:

1. Exzenterblock 160x35x68
2. Exzenterwelle Ø30 (2 Stk.) mit Sitzpassung am Wellenende Ø20 für Wälzlager-Innenring
3. Sechskantschraube M20x40 nach EN 24017 (2 Stk.)
4. Rillenkugellager (Wälzlager) 20x42x12 vom Typ „SKF Explorer 6004-2RSH“ (2 Stk.)
5. Sicherungsring (Seegerring) 20x1,2 nach DIN 471 (2 Stk.)
6. Zylinderkopfschraube M6x45 nach DIN 912 (4 Stk.)
7. Sechskantschraube M10x45 nach DIN EN ISO 4014 (4 Stk.)

Das Prinzip beruht auf dem Aufbau einer Klemmkraft durch zwei auf gegenüberliegenden Seitenflächen einer Schiene abrollende Wälzlager abhängig von der Umfangsposition der Exzenterwelle, wobei die Betätigung händisch mit Hilfe eines Gabelschlüssels mit der Schlüsselweite 20 erfolgt. In Abbildung 3.14 sind beide Fälle, d.h. mit und ohne Klemmwirkung, schematisch dargestellt. Zur besseren Orientierung sind auch hier die Teilenummern angeführt.

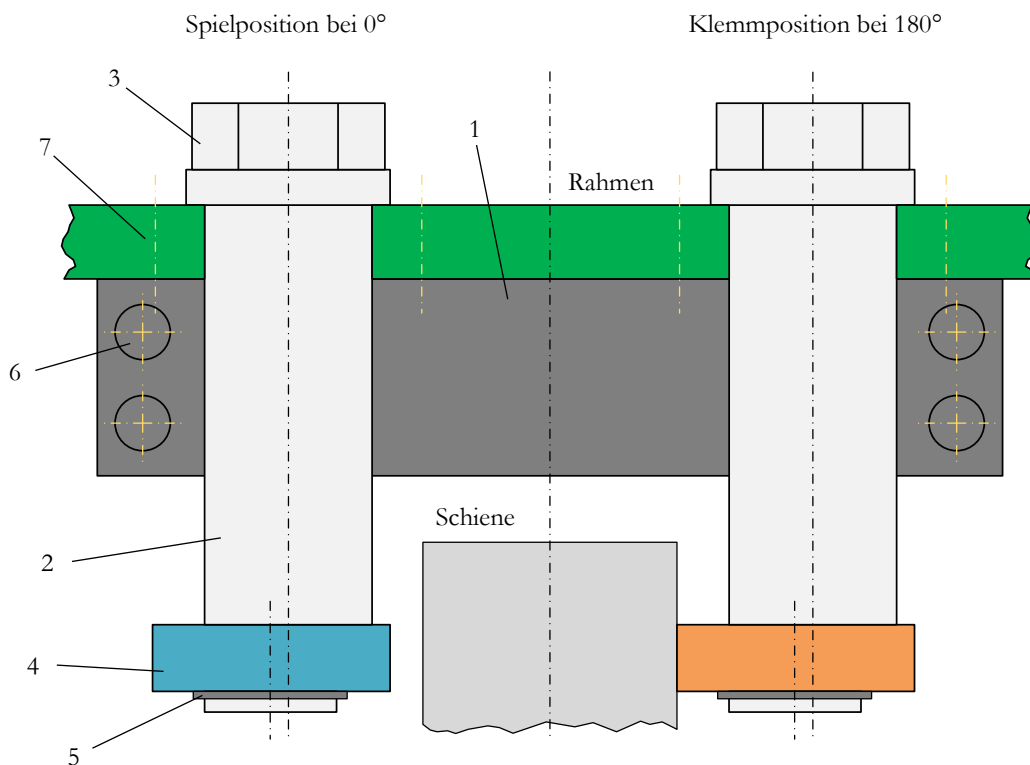


Abbildung 3.14: Funktionsprinzip der Exzenter-Klemmvorrichtung.

Wie bereits aus Abbildung 3.11 hervorgeht, werden zur Vermeidung eines Winkelversatzes am beweglichen Rahmen insgesamt zwei Klemmvorrichtungen eingesetzt, welche in einem gewissen axialen Abstand zueinander gemeinsam auf einer Schiene angreifen, wobei aufgrund der besseren Zugänglichkeit die nähere zur Versuchswarte bevorzugt wird.

Zuerst wird der Exzenterblock am Rahmen montiert. Danach werden die Exzenterwellen von oben eingeführt. Die Innenfläche vom Lagerinnenring wird eingefettet und dessen Seitenfläche auf einer passenden Stahlhülse positioniert. Mit einem Hammer wird solange von oben auf die Exzenterwelle geklopft, bis das Lager vollständig kalt aufgezogen ist. Die Sicherung erfolgt anschließend mittels Seegerring, welcher in eine passende Nut am Wellenende eingreift. Nach der Montage des zweiten Lagers erfolgt die gewünschte Klemmung der Exzenterwellen mit den seitlichen Schrauben.

3.2.2 Auslaufbereich

Nach dem Abschluss der Vorbereitungsarbeiten kann nun mit dem Aufbau des Ringraumes begonnen werden. Die in Abbildung 3.15 dargestellten Komponenten bilden den s.g. Auslaufbereich und werden zuerst montiert und anschließend in der gezeigten Konfiguration auf dem beweglichen Rahmen aufgesetzt und mit dem Abluftrohr gekoppelt.

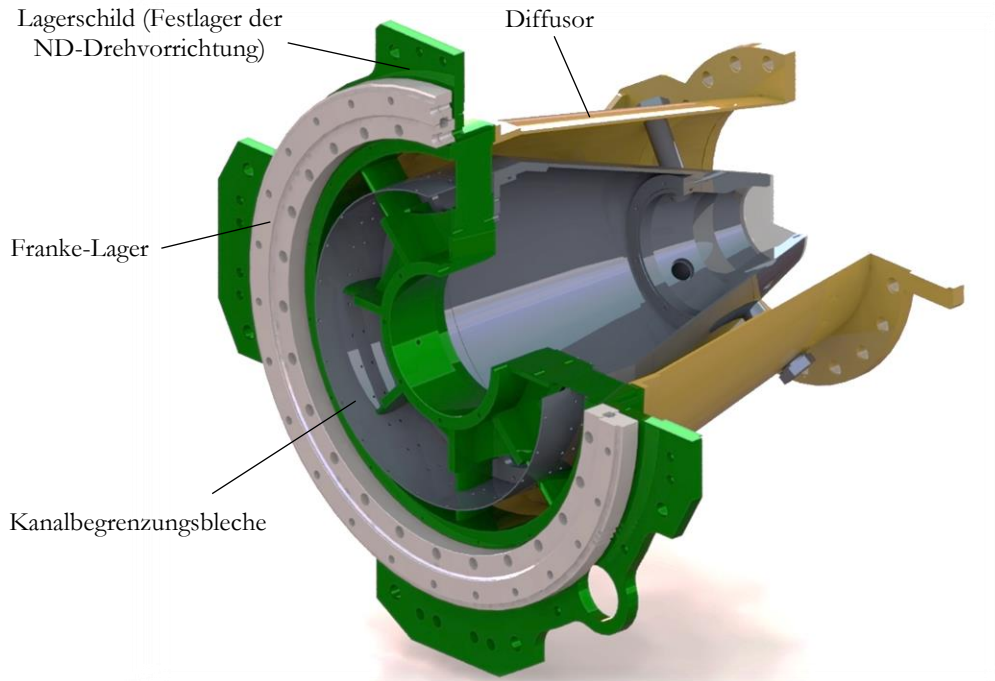


Abbildung 3.15: 3D-CAD-Modell vom Auslaufbereich.

Die zu montierenden Komponenten sind in der unteren Schnittdarstellung farblich hervorgehoben und bilden zusammen mit dem bereits vom Zulieferer einbaufertig angelieferten Diffusor den ersten Schritt zur Vervollständigung des in Abbildung 3.4 dargestellten Ringraumes.

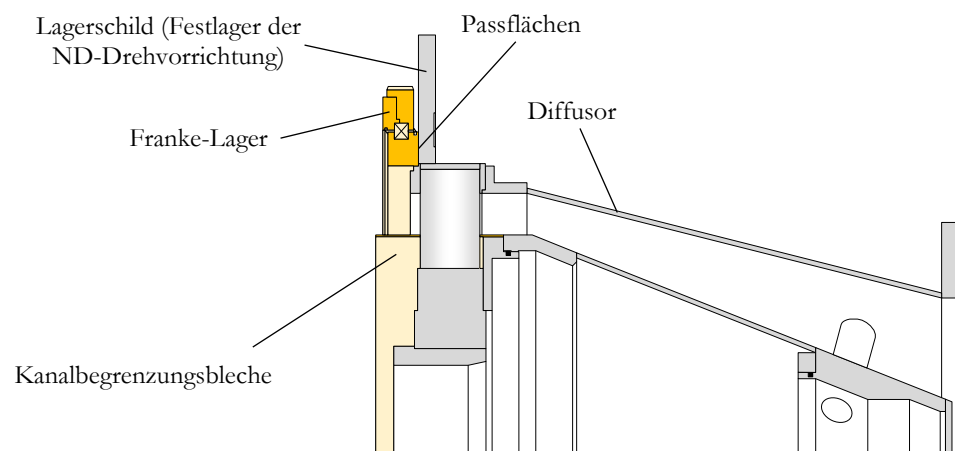


Abbildung 3.16: Schnittdarstellung der Montagekomponenten im Auslaufbereich.

3.2.2.1 Lagermontage

Wie bereits oben erwähnt, bildet der Diffusor die Ausgangsbasis für die Montage des Auslaufbereichs. Zuerst wird hierfür der Diffusor mit Hilfe von Traggurten und dem Lastkran in der Institutswerkstatt im Erdgeschoss mit dem hinteren Anschlussflansch auf einer Transportunterlage (z.B. Europalette) abgesetzt. Anschließend wird das Lager, welches später die Traversierung diverser Komponenten der Außenkontur vom Backward-Rig ermöglichen soll, mit dem Innenring auf der zuvor eingefetteten Ringpassfläche am Diffusor abgesetzt (siehe Abbildung 3.17).

Hierbei ist jegliche Form von Beschädigung an den Passflächen (Seitenfläche am Lagerinnenring und Gegenpassfläche am Diffusor, Seitenfläche am Lageraußenring sowie Beam-Passflächen am Lagerschild) zu vermeiden. Das Einfetten von Passflächen mit einem temperaturbeständigen Schmierfett (Mobil Mobilgrease 28 Red) vor der Montage dient einerseits als Verschleiß- und Korrosionsschutz für die benetzten Flächen und andererseits um die Demontage der Komponenten beim Abbau der Anlage deutlich zu erleichtern.

Nach dem Aufsetzen des Lagers wird dieses mit 26 Stück Zylinderkopfschrauben M16x55 mit dem Diffusor verschraubt. Um auch hier eine Beschädigung der Passflächen durch ungleichmäßiges Anziehen der Schrauben über den Umfang und damit ungleichmäßig hohe Klemmkräfte zu verhindern, wird folgende Montagereihenfolge empfohlen:

1. Reindrehen aller Schrauben bis zum Auftreten eines ersten Widerstandes,
2. handfest anziehen über Kreuz (z.B. $0^\circ - 180^\circ - 90^\circ - 270^\circ$ im ersten Durchgang, anschließend zur Umfanganposition 0° nächstgelegene Schraube anziehen und Schema wiederholen) und
3. mit endgültigem Anzugsdrehmoment ebenfalls über Kreuz festziehen.

Für den letzten Punkt wird ein passender Drehmomentschlüssel benötigt. Bei den hier vorliegenden Schrauben M16 mit Regelgewinde und Festigkeitsklasse 8.8 liegt das max. Anziehdrehmoment bei einer angenommenen Reibungszahl von $\mu=0,12$ bei ungefähr 206 Nm. Dies würde bei den vorliegenden Bedingungen in etwa einer 90 %-igen Ausnutzung der Streckgrenze bzw. der 0,2 %-Dehngrenze entsprechen.

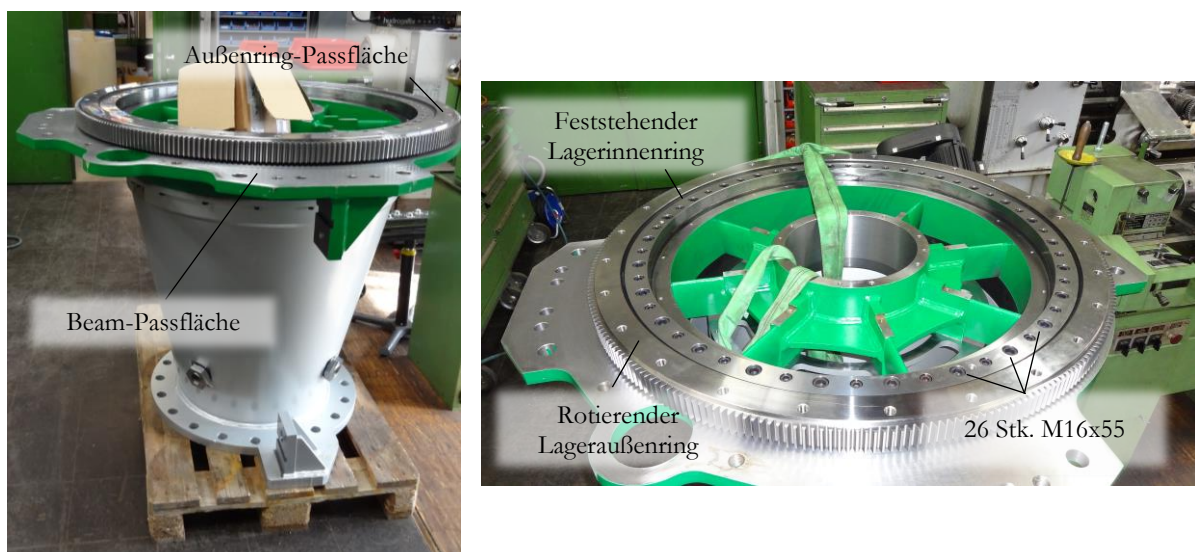


Abbildung 3.17: Fotoaufnahmen vom senkrecht aufgestellten Diffusor mit bereits montiertem Lager.

3.2.2.2 Instrumentierung der Wanddruckröhrchen

Die momentane Lage und Ausrichtung des Diffusors eignet sich auch hervorragend für die Instrumentierung der Wanddruckröhrchen nach Abschnitt 4.3.7. Sowohl an der Außen- als auch an der Innenkontur des Ringraums betragen die Bohrungsdurchmesser jeweils $\text{Ø}0,60$ mm. An den Umgebungswänden (Montageseite) hingegen betragen die Durchmesser sowohl am Außenkegel als auch am Innenkegel $\text{Ø}1,60$ mm.

Als Wanddruckröhrchen werden hier aufgrund der geringen Kegelwandstärken handelsübliche Kanülen aus der Medizintechnik mit den Abmessungen $\text{Ø}1,60/\text{Ø}1,30 \times 1000$ mm eingesetzt, welche mit Hilfe eines s.g. Multifunktionswerkzeugs auf die passende Länge gekürzt und an den Enden sowohl entgratet als auch angefast werden.

Vor der Instrumentierung muss unbedingt sichergestellt werden, dass die Bohrungen durchlässig und nicht versperrt sind (z.B. mit Rückständen vom Lackieren). Dies kann man sehr schnell auch händisch mit einem längeren 5/10 mm-Bohrer bewerkstelligen. Anschließend werden die Röhrchen von der Montageseite aus in die Bohrungen bis zum Anschlag eingeführt und mit einer schnell trocknenden und vor allem temperaturbeständigen Kombination aus Epoxidharz und Härter in ihrer aktuellen Position und Lage fixiert. Dabei sollten die Röhrchen auf der Montageseite wirklich nur so weit wie unbedingt nötig aus der Wand herausragen, um eine Beschädigung oder sogar Zerstörung der Röhrchen im Zuge der weiteren Montagearbeiten durch unbeabsichtigtes Umbiegen oder Umknicken zu vermeiden, da sich entsprechende Reparaturmaßnahmen oftmals schwierig gestalten.

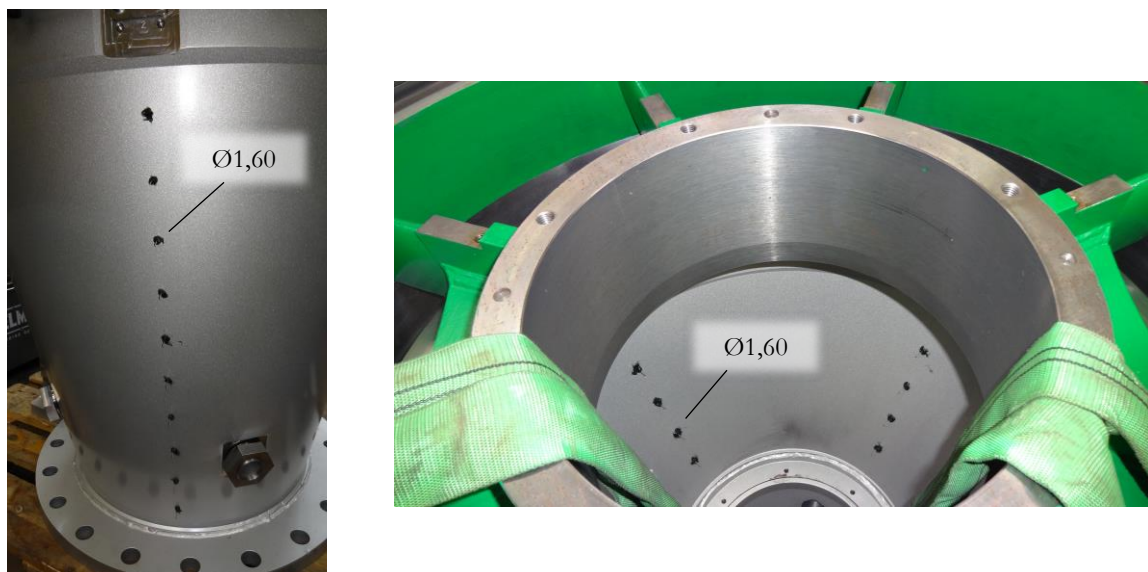


Abbildung 3.18: Fotoaufnahmen der instrumentierten Röhrchen an den Montageseiten von Diffusor-Außenkegel (links) und -Innenkegel (rechts).

3.2.2.3 Vervollständigung der Innenkontur

Als nächstes erfolgt die Montage der Kanalbegrenzungsbleche, welche Ausnehmungen für die Stützschaufeln des Lagerschildes aufweisen und somit die Innenwand des Ringraumes hin zum Diffusor bilden. Dieses flexible Konzept ermöglicht die Realisierung unterschiedlicher Radien für die Innenkontur durch Einsatz verschiedener Bleche und Diffusorkegel bei Verwendung von ein und demselben Lagerschild (teuerste Komponente).

Die einzelnen Montageschritte sind in Abbildung 3.19 dargestellt.

Zuerst werden die beiden hinteren Bleche (zu erkennen an den spitzen Ausnehmungen für die Schaufelhinterkanten) einzeln zwischen zwei Stützschaufeln eingefädelt und am entsprechenden Zentriersitz vom inneren Diffusorkegel lagemäßig fixiert sowie anschließend mit diesem verschraubt. Hierfür werden 24 Stück Schrauben M6x10 benötigt, wobei hier vor allem Linsenkopfschrauben aufgrund ihrer Eigenschaft, die Strömung nur minimal zu behindern, bevorzugt zum Einsatz kommen sollten. Des Weiteren sollte zur Vermeidung der Lockerung einiger Schrauben während des Betriebs und daraus resultierenden unerwünschten Blechschwingungen (wahrnehmbar als klapperndes Geräusch) ein mittelfestes Schraubensicherungsmittel eingesetzt werden.

Beim Aufsetzen der vorderen Bleche (zu erkennen an den runden Ausnehmungen für die Schaufelvorderkanten) hat man zwei Möglichkeiten. Entweder setzt man die beiden Bleche so auf die hinteren Bleche auf, dass diese eine gemeinsame Fuge bilden, was die Strömung u.U. lokal stark beeinflussen kann, oder man setzt die Bleche so auf, dass sich nun zwar insgesamt vier Fugen bzw. Störstellen entlang des Umfangs anstelle von zwei ergeben, diese sich jedoch in größtmöglichem Abstand zueinander befinden und die Strömung i.d.R. lokal weniger stark beeinflussen.

Anschließend werden noch die acht Verbindungsstücke jeweils in den Schaufelzwischenräumen auf der konkaven Seite angelegt und mit hinterem und vorderem Blechring verschraubt. Pro Verbindungsstück werden acht Stück M6x10 Linsenkopfschrauben (also insgesamt 64) mit zugehörigen M6-Muttern benötigt, wobei jeweils vier zur Verbindung mit vorderem bzw. hinterem Blechring dienen. Die Schrauben werden von der konvexen Blechseite in die Löcher eingeführt und auf der konkaven Seite mit der Mutter nur leicht verschraubt, sodass diese auf dem Gewinde sitzt. Sobald alle Schrauben und Muttern die Verbindungsstücke in Position halten, kann nun mit dem Festziehen der Schrauben unter Einsatz des Schraubensicherungsmittels begonnen werden. Dabei ist permanent auf gleichmäßige Spannungsverteilung in den Blechen zur Vermeidung von Klaffungen zu achten.

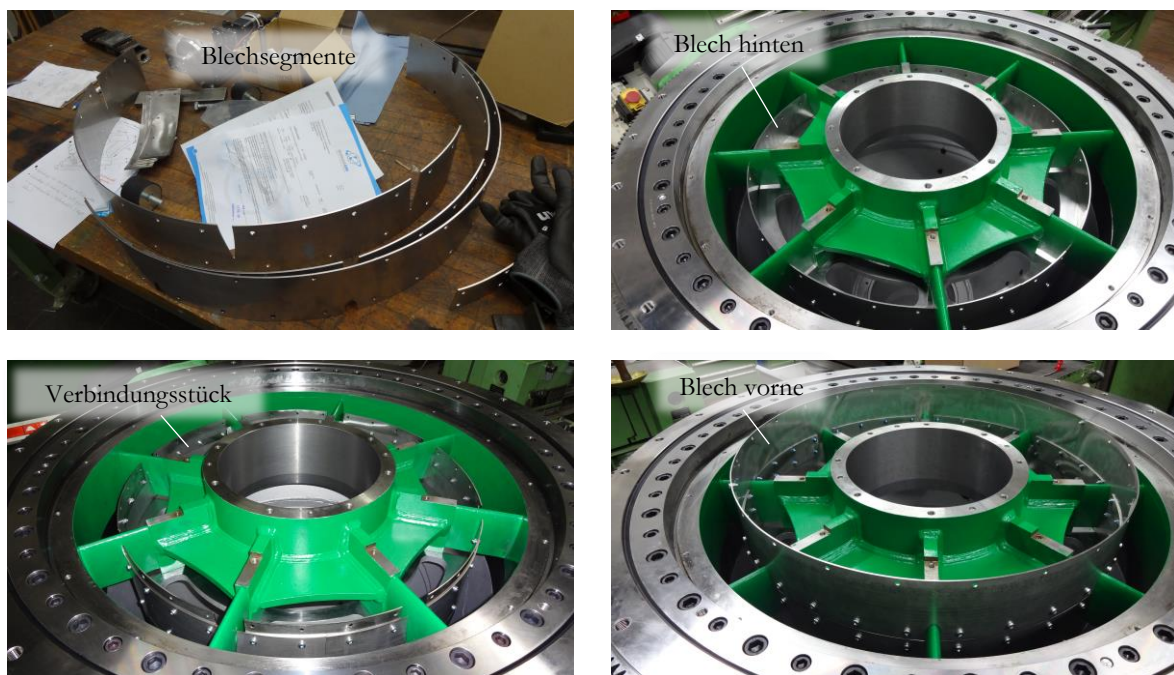


Abbildung 3.19: Fotoaufnahmen der einzelnen Montageschritte bei der Blechmontage.

3.2.2.4 Transport zum Prüfstand

Sämtliche autarken Vorbereitungsarbeiten am Auslaufdiffusor sind nun erledigt und einem Transport von der Werkstatt im Erdgeschoss über die externe Rampe hinunter zum Prüfstand im Kellergeschoss steht somit nichts mehr im Wege. Hierfür wird der Diffusor zuerst mit Hilfe des Lastenkrans in der Werkstatt liegend auf der Europalette aufgesetzt, sodass ein Teil des Lagerschilds und der hintere Flansch die Auflagerpunkte bilden. Da durch das große Eigengewicht des Diffusors (ca. 850 kg) ein enormes Sicherheitsrisiko infolge Umkippen besteht, ist dieser mit mindestens zwei Spanngurten vorne und hinten mit der Transportunterlage unter genügend großer Zugspannung zu verbinden.

Nach der erfolgreich durchgeführten Ladungssicherung kann die Palette mit Hilfe eines Hubwagens aus dem Gebäude gefahren werden. Danach muss aufgrund des hohen Ladungsgewichts ein Gabelstapler den Transport über die Rampe hinunter ins Kellergeschoss übernehmen. Unten angekommen wird die Ladung wieder mittels Hubwagen zum Prüfstand transportiert. Stationäre Hindernisse (wie z.B. Kabeltrassen) müssen mit Hilfe von provisorischen Rampen aus Holz überwunden werden. Bei sämtlichen o.a. Tätigkeiten ist darauf zu achten, dass keine Beschädigungen am Diffusor und vor allem an den zuvor installierten Wanddruckröhrchen sowie an den Passflächen auftreten. Eine Fotostrecke des Transports ist in Abbildung 3.20 dargestellt.



Abbildung 3.20: Fotoaufnahmen vom Transport des Diffusors von der Werkstatt zum Prüfstand.

Bevor der Diffusor auf die vier Stützen am beweglichen Rahmen aufgesetzt werden kann, müssen deren Passflächen vorbereitet werden. Die dort eingearbeiteten Gewinde können noch Fertigungsrückstände wie Späne und Schneid- bzw. Kühlflüssigkeit enthalten, welche in Kombination eine schwer zu entfernende klumpige Masse bilden, die

Gewindegänge während eines Einschraubvorganges zerstören kann. Daher werden diese Rückstände mit Hilfe von Bremsenreiniger oder Nitroverdünnung und Druckluft entfernt (siehe Abbildung 3.21 links). Um einen durch die Reinigungsmittel hervorgerufenen korrosiven Angriff von vornherein auszuschließen, wird das gereinigte Gewinde mit ein wenig Universalöl benetzt.

Danach können die vier Auflageklötze mit jeweils drei Schrauben M16x55 an den Stützen mit einem Anzugsdrehmoment von ca. 206 Nm bei einer Schraubenqualität von 8.8 montiert werden. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass sich die hinteren zwei Klötze von den vorderen in der Lage ihrer Nuten unterscheiden und dass die hinteren Passfedernuten nach außen zeigen, während die vorderen nach innen zeigen müssen (siehe Abbildung 3.21 rechts).

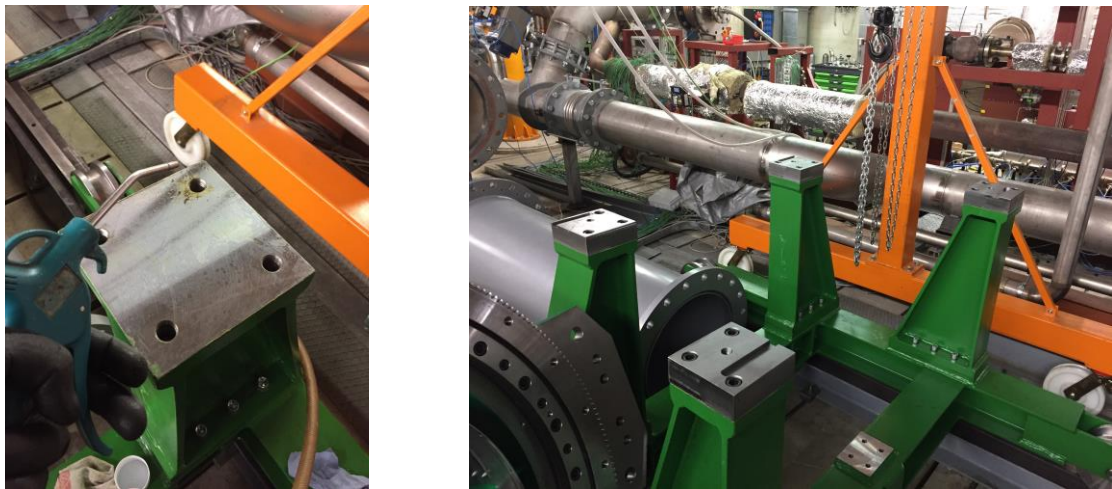


Abbildung 3.21: Reinigung der Gewinde in den Stützen des beweglichen Rahmens (links) und fertig montierte Auflagebackerl (rechts).

Im Anschluss daran kann der Diffusor auch schon zum ersten Mal auf den beweglichen Rahmen aufgesetzt werden. Hierfür wird der mobile Portalkran verwendet, wobei die Traggurte so am Diffusor befestigt werden, dass dieser während des Hebevorgangs eine möglichst horizontale Lage beibehält (siehe Abbildung 3.22 links).

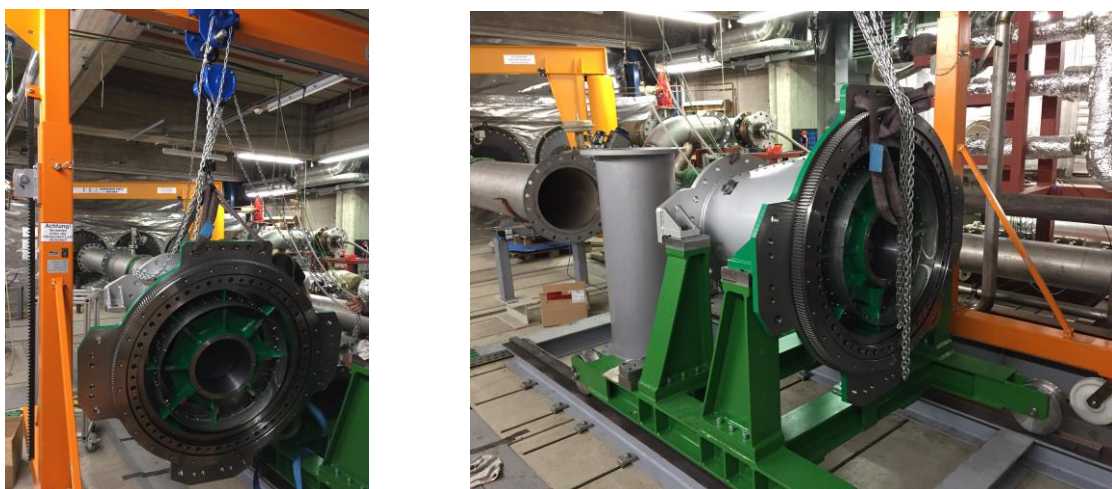


Abbildung 3.22: Aufsetzen des Diffusors am beweglichen Rahmen.

Die Verwendung von Auflageklötzen ist eine ebenso simple wie elegante Methode, um bei der späteren Ausrichtung des Prüfstandes sowohl die Neigung des Backward-Rigs relativ zur mit der Prüfstandsachse parallelen Vertikal- bzw. Horizontalebene als auch die Höhe als Ganzes zu verändern. Vor der ersten Grobausrichtung können die oberen Auflageflächen der Klötze also noch unbearbeitet bleiben.

3.2.2.5 Koppelung mit dem Abluftrohr

Das für die Verbindung des Backward-Rigs mit dem Abluftrohr notwendige Teleskoprohr besteht aus:

- einem Außenrohr als Verlängerung des Abluftrohres,
- einer Druckluftdichtung (engl.: Air Seal), welche auf dem Außenrohr montiert wird, und
- einem Innenrohr, welches mit dem hinteren Flansch des Diffusors verschraubt wird und in das Außenrohr eingeführt wird.

Zuerst wird das Außenrohr auf dem abluftseitigen Flansch am Boden mittels Kran abgestellt, sodass dessen Achse senkrecht nach oben zeigt. Anschließend wird die Druckluftdichtung am zuluftseitigen Flansch mit 20 Stück M10 Zylinderkopfschrauben ($M_A = 48 \text{ Nm}$ bei Qualität 8.8 und $\mu_K = \mu_G = 0,12$) montiert (siehe Abbildung 3.23).

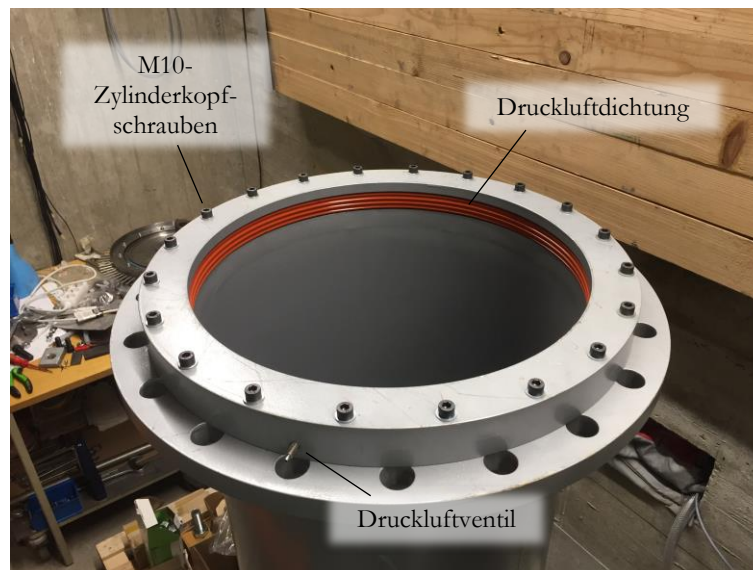


Abbildung 3.23: Fotoaufnahme der bereits auf dem Teleskop-Außenrohr montierten Druckluftdichtung.

Als nächstes wird das Außenrohr mit Hilfe des Krans waagrecht auf den Boden gelegt, damit das Innenrohr eingeführt werden kann (siehe Abbildung 3.24 links und mittig). Anschließend können die Bauteile gemeinsam mit Hilfe von beiden Kränen in waagrecht Lage in die Prüfstandsachse hineingehoben werden. Sowohl die Verbindung Außenrohr mit Abluftrohr als auch die Verbindung Innenrohr mit Diffusor wird mit Hilfe von 20 Stück Durchsteckschraubverbindungen M30 hergestellt. Die Abdichtung erfolgt über Flächendichtungen (Klingersil). Die Schrauben werden jeweils mittels Drehmomentschlüssel bei gleichzeitigem Kontern der Mutter mit Hilfe eines verlängerten Gabelschlüssels unter den wie üblich angenommenen Randbedingungen mit einem Anzugsdrehmoment von ca. 1420 Nm angezogen. Lagekorrekturen können ab sofort mit Hilfe des Portalkrans durchgeführt werden (siehe Abbildung 3.24 rechts). Einen statischen und damit auch dauerhaften Höhenausgleich zur Freigabe des Krans wird anschließend

durch Wegnahme bzw. Hinzugabe von Auflageklötzen bei der U-Träger-Abstützung des Abluftrohres bewerkstelligt. Das Resultat ist in Abbildung 3.25 dargestellt. Feineinstellungen können auch später noch über das Lochspiel in den Flanschverschraubungen (Durchgangslöcher $\varnothing 33$ mm) vorgenommen werden.



Abbildung 3.24: Fotoaufnahmen von den Arbeitsschritten der Verbindung des Diffusors mit dem Abluftrohr.

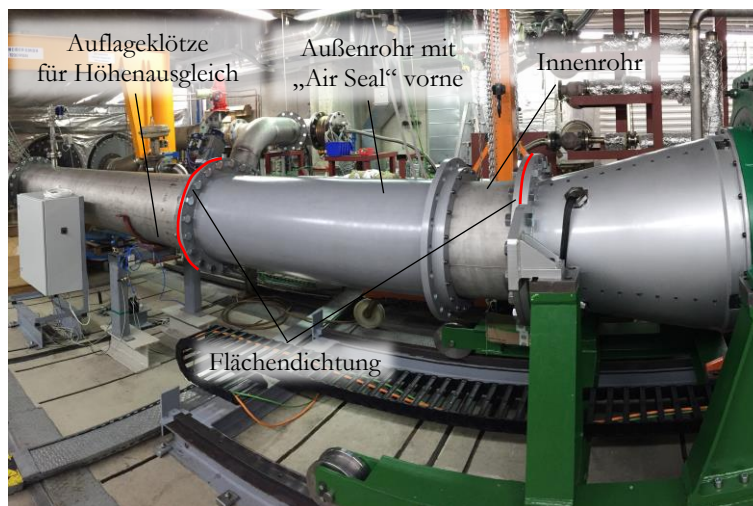


Abbildung 3.25: Fotoaufnahmen von der Verbindung des Diffusors mit dem Abluftrohr über die Baugruppe „Teleskoprohr“ nach bereits erfolgtem statischen Höhenausgleich.

3.2.2.6 Montage der thermischen Zentrierung

Im nächsten Schritt wird die thermische Zentrierung (Nut und Feder) der ND-Drehvorrichtung montiert, deren Feder direkt mit dem ND-Lagerschild verschraubt wird und anschließend mit den bearbeiteten Seitenflächen ihrer nach hinten auskragenden Platte in die Nut eines Auflageklotzes eingreift, der mit dem beweglichen Rahmen verschraubt wird. Mit diesem Konzept soll dafür gesorgt werden, dass sich während des Betriebs eine (nahezu) ungehinderte wärmebedingte Längsausdehnung des Prüfstandes einstellen kann, während nur symmetrische Querdehnungen nach beiden Seiten zugelassen werden, da die Zentrierung das Backward-Rig stets in der Prüfstandsachse hält.

Wie zuvor an den Konsolen des beweglichen Rahmens, so sind auch hier die vier Sackgewinde am unteren Querträger wieder mittels Bremsenreiniger und Druckluft von unerwünschten Fertigungsrückständen zu befreien (siehe Abbildung 3.26 links oben). Anschließend werden sämtliche Passflächen (= bearbeitete Flächen), sowohl von den statischen Komponenten als auch von den zu montierenden Bauteilen, mit Nitro entfettet (siehe Abbildung 3.26 rechts oben), bevor unmittelbar vor dem Herstellen der Verbindung Montagefett aufgetragen wird (siehe Abbildung 3.26 links unten). Bei der Montage wird zuerst der Auflageklotz mit dem beweglichen Rahmen mit vier Stück M16 8.8 Zylinderkopfschrauben verschraubt ($M_A=206 \text{ Nm}$). Anschließend wird die Feder (= orange lackiertes Bauteil) mit der hinteren Platte in die Nut vom Klotz eingeführt und mit den Durchgangslöchern am Lagerschild flächenparallel ausgerichtet. Abschließend wird sie mit dem Lagerschild mit vier Schrauben und Muttern M24 8.8 ($M_A=714 \text{ Nm}$) verschraubt, wobei das Anziehen mit Drehmoment hier aufgrund der Unzugänglichkeit für lange Hebel nur schwer möglich ist. Die fertig montierte thermische Zentrierung ist in Abbildung 3.26 rechts unten dargestellt.

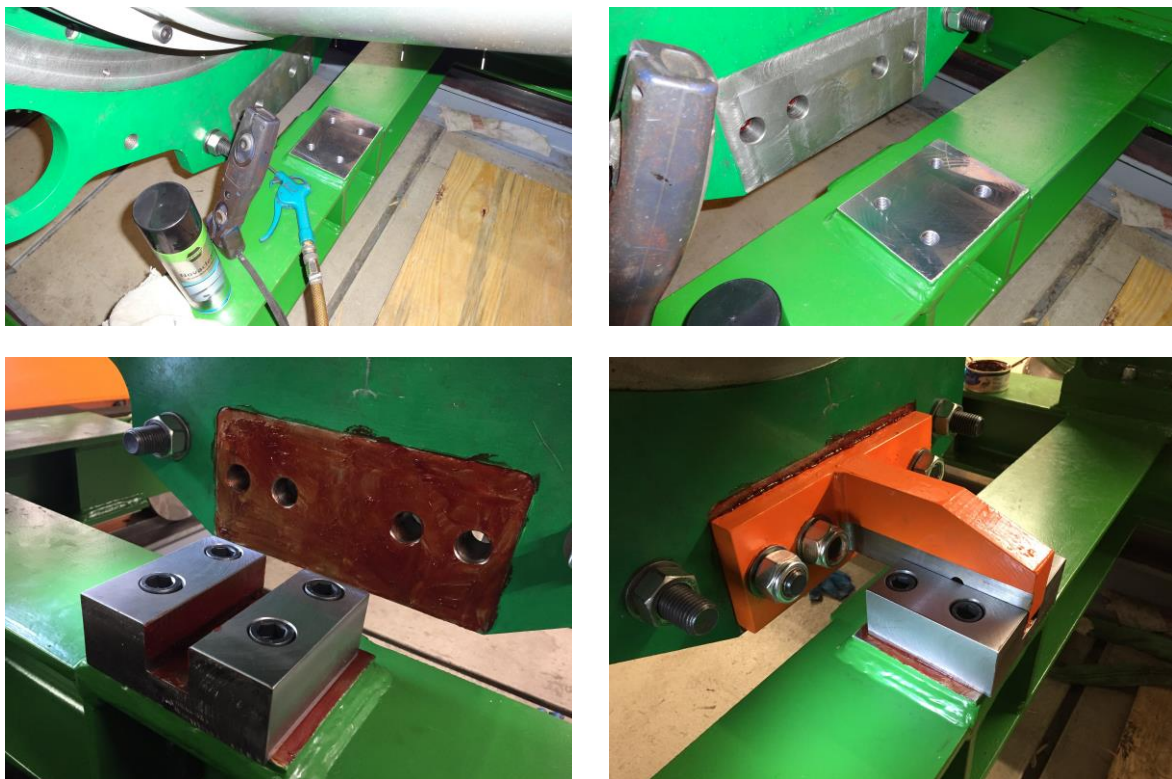


Abbildung 3.26: Reinigung und Entfettung der Montageflächen (oben) und Einfettung sowie Montage der thermischen Zentrierung (unten).

3.2.2.7 Abdichtung der Innenkontur und Durchziehen von Messleitungen

Da die Innenkontur des Auslaufbereichs hin zum Diffusor durch lediglich miteinander verschraubte Bleche gebildet wird, müssen Leckageströme in diesem Bereich unbedingt durch das Abdichten sämtlicher Spalte auf der konkaven Seite im Vornherein ausgeschlossen werden. Am besten wird hier ein handelsübliches Hochtemperatursilikon aus dem Baumarkt mit einer Temperaturbeständigkeit von bis zu 300 °C verwendet, welches mit Hilfe einer Klebepistole und ein wenig Fingerspitzengefühl entlang der Spalte aufgetragen wird. Um eine Komprimierung und damit vollständige Benetzung sowie Abdichtung der Spalte durch die Silikonmasse zu gewährleisten, werden normalerweise vorgefertigte Schablonen verschiedener Ausformung verwendet. Aufgrund der hier stark erschwerten Zugänglichkeit werden hingegen die besten Resultate erreicht durch einfaches und gleichmäßiges Verstreichen mit dem Finger. Bzgl. des

Arbeitsschutzes ist hier zu erwähnen, dass bereits beim Arbeitsbeginn mit derartigen Silikon sehr schnell streng riechende Gase in die umgebende Luft entweichen. Während diesen Arbeiten, welche sich durchaus über Stunden hinweg ziehen können, sind das Tragen von Atemschutzmasken, das Gewährleisten einer guten Durchlüftung des Raumes (auch zur Vermeidung eines Gasalarms) und das Einlegen von genügend Pausen an der frischen Luft oberstes Gebot. Die fertig abgedichtete Innenkontur nach einem Tag Trocknungszeit ist von verschiedenen Blickwinkeln auf die konkave Seite als Fotostrecke in Abbildung 3.27 dargestellt.

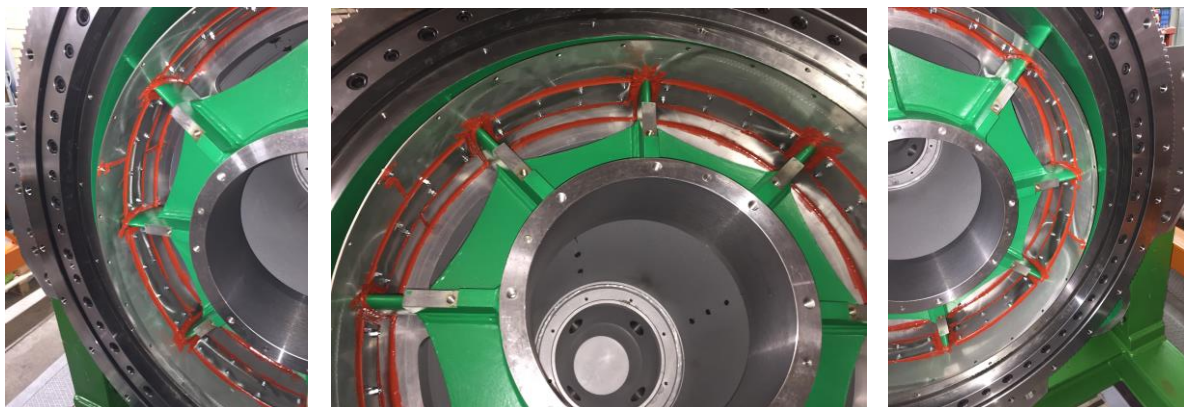


Abbildung 3.27: Fotoaufnahmen der mittels Silikon abgedichteten Innenkontur der Kanalbegrenzungsbleche (konkave Seite).

Bevor nun mit der Montage des Mittelteils vom Prüfstand begonnen werden kann, müssen noch als Abschluss der Montagearbeiten am Auslaufbereich ein paar Instrumentierungsarbeiten durchgeführt werden, da diese später aufgrund von Unzugänglichkeit nicht mehr möglich sind. Konkret geht es dabei um die Druckschläuche für Wanddruckbohrungen und Grenzschiebkämme in den Messebenen B0, B, C und D an der Innenkontur (Hub) sowie jene am inneren Kegel des Diffusors. Letztere können nach der Einfädung von außen durch eine der vier Leitungsführungen ins Innere des Diffusorkegels unmittelbar an die Wanddruckröhrchen angeschlossen werden (siehe Abbildung 3.28 links). Die Angabe von Anzahl und Lage der inneren Messstellen erfolgt wie üblich in Unterkapitel 4.3. Damit können die Leitungen (gemeinsam mit ein paar Sicherheitsseilen für späteres Durchziehen) im Hinblick auf ihren späteren Einsatzort zweckmäßig verteilt durch die Öffnungen zwischen den Stützschaufeln durchgezogen werden und gemeinsam am Rahmen zwischengelagert werden (siehe Abbildung 3.28 rechts).

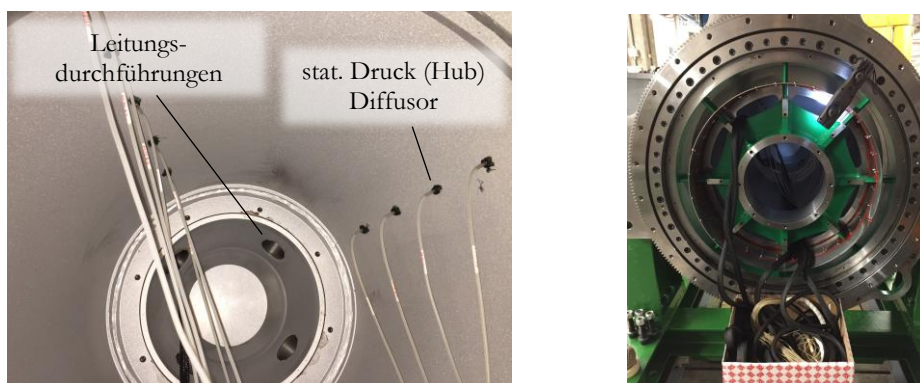


Abbildung 3.28: Fotoaufnahmen vom Durchziehen der inneren Wanddruckschläuche (Hub) durch den Diffusor.

3.2.3 Mittelteil

Nun kann mit der Montage des Mittelteils begonnen werden, welcher zugleich das Herzstück des gesamten Prüfstands darstellt, da es den s.g. Intermediate Turbine Duct (ITD) beinhaltet, welcher in den Messungen untersucht werden soll und damit den Hauptgrund für den gesamten Prüfstandsaufbau liefert. Der komplett montierte und bereits mit dem zuvor beschriebenen Auslaufbereich verbundene Mittelteil ist zusammen mit den Benennungen der wichtigsten Bauteile als 3D-CAD-Modell in Abbildung 3.29 dargestellt. Auch hier soll der sequentielle Aufbau der Ringraumkontur stets durch Fotoaufnahmen und Erweiterung des 2D-Schnittbilds in Richtung Teilungsebene begleitet werden.

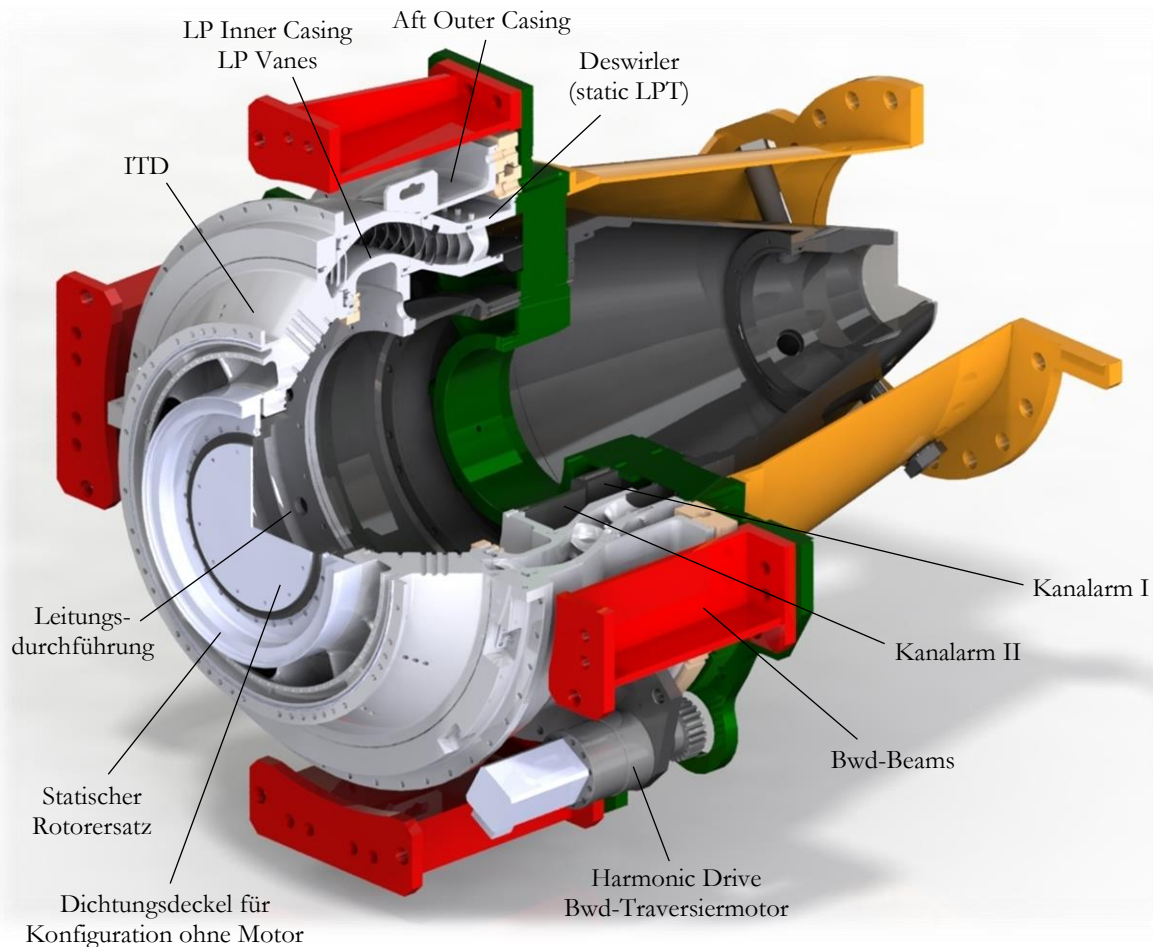


Abbildung 3.29: 3D-CAD-Modell von Mittelteil und Auslaufbereich.

3.2.3.1 Aufbau des Niederdruckbereichs

Wie bereits eingangs in der Einleitung erwähnt, ist für die Gewährleistung einer guten Vergleichbarkeit der Messergebnisse ein Großteil der Komponenten vom AnCa-Prüfstand identisch zu jenen vom TTTF-Prüfstand in der großen Turbinenhalle im Erdgeschoss. Während ein paar davon neu gefertigt wurden, werden die anderen direkt verwendet und quasi für die Dauer der Versuche vom oberen Prüfstand „ausgeborgt“. Konkret geht es dabei um die vier Bwd-Beams, den Harmonic Drive Bwd-Traversiermotor, das Aft Outer Casing und den Deswirler, welche demontiert werden und anschließend zum Prüfstand ins Kellergeschoß transportiert werden müssen.

Die zu demontierenden TTTF-Komponenten sind in Abbildung 3.30 gekennzeichnet und deren Demontage ist in einer Fotostrecke in Abbildung 3.31 dargestellt.

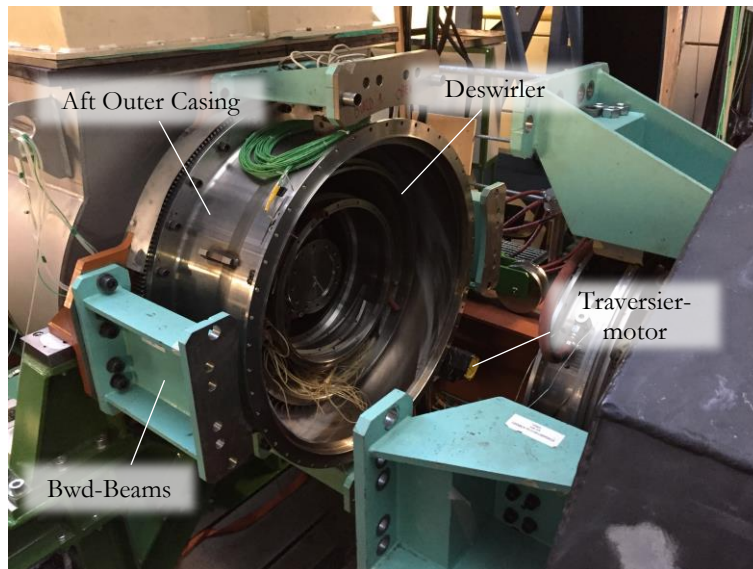


Abbildung 3.30: Fotoaufnahme der zu demontierenden Komponenten am TTTF-Prüfstand.

Aufgrund der großen Masse der Bauteile ist auch hier besonders auf den Arbeitsschutz zu achten. D.h. das Tragen von Sicherheitsschuhen und das Anhängen jeder Komponente vor dem Lösen der Schrauben an den Portalkran der Turbinenhalle mittels Traggurten sind verpflichtend. Begonnen wird mit der Demontage der Bwd-Beams und des Bwd-Traversiermotors. Ein gleichmäßiges Lösen der Schrauben zur Vermeidung von Verkanten ist empfehlenswert, auch der Einsatz einer Hebelverlängerung (z.B. mit einem Rohr) ist aufgrund der großen Schraubendurchmesser sinnvoll. Nachdem die Beams zusammen mit dem Motor auf einer Palette mittels Hubwagen in Richtung Kellergeschoß zum AnCa-Prüfstand abtransportiert wurden, können nun auch das Aft Outer Casing und der Deswirler demontiert werden. Aufgrund der großen Radien wird ein gleichmäßiges Lösen der Schrauben über Kreuz und die Verwendung von Abdrückschrauben (vier Stück M8 mit Gewindelänge 16 mm beim Aft Outer Casing und vier Stück M6 mit Gewindelänge 10 mm beim Deswirler) empfohlen. Beide Bauteile werden mit dem Portalkran jeweils auf eine eigene Palette gehoben und einzeln ebenfalls mittels Hubwagen zum AnCa-Prüfstand transportiert.



Abbildung 3.31: Demontage der Bwd-Beams und Bwd-Traversiermotor (links), vom Aft Outer Casing (Mitte rechts) sowie vom Deswirler (rechts) beim TTTF-Prüfstand.

Ein 2D-Schnittbild mit den zu montierenden Komponenten und den Positionen der Schraubenverbindungen ist in Abbildung 3.32 dargestellt.

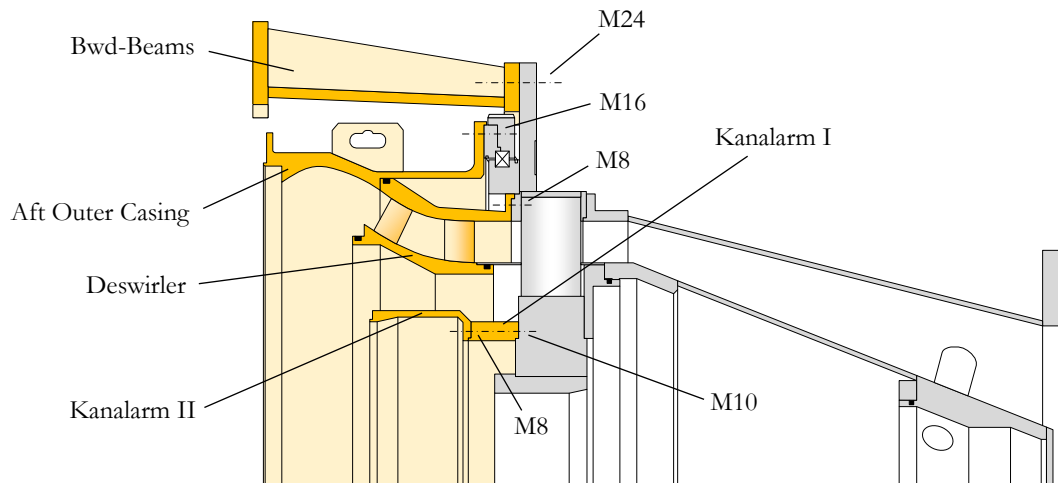


Abbildung 3.32: 2D-Schnittbild mit Bwd-Beams, Aft Outer Casing, Deswirler und Kanalarms I und II.

Aufgrund der späteren Unzugänglichkeit mittels Portalkran muss mit der Montage des Bwd-Beams ALF-180° begonnen werden. Die einzelnen Montageschritte sind in der Fotostrecke in Abbildung 3.33 visualisiert.

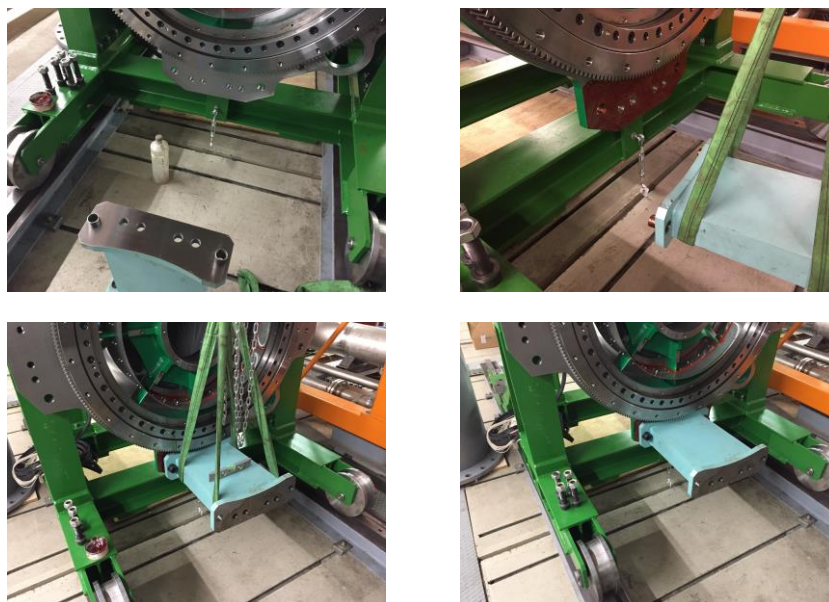


Abbildung 3.33: Fotostrecke von der Montage des Bwd-Beams ALF-180°.

Generell gilt für sämtliche Beams, dass diese jeweils mit der zu verbindenden Komponente mit sechs Stück M24 8.8 Zylinderkopfschrauben und zugehörigen Muttern verschraubt werden, wobei es sich bei den beiden äußeren Bohrungen am Beam nicht um gewöhnliche Durchgangslöcher handelt, sondern um Passbohrungen $\text{Ø}32\text{H}7$. Dieser Umstand ist vor allem in Abschnitt 3.2.5 bei der Prüfstandsausrichtung von entscheidendem Interesse, da die zugehörigen Passhülsen eine Lagegenauigkeit im Zehntel-Millimeter-Bereich ermöglichen.

Sowohl die Passflächen am ND-Lagerschild und am Beam als auch die Passhülsen selbst werden vor der Montage gereinigt und anschließend eingefettet (zu erkennen an der typischen roten Einfärbung). Im Anschluss daran werden die Passhülsen in die zugehörigen Passbohrungen am Beam eingeführt. Der Beam wird mittels Traggurten und Portalkran in horizontaler Lage (Ausrichtung mittels Wasserwaage) angehoben und in die Montageposition bewegt. Die Ausrichtung erfolgt über die Passhülsen am Beam hin zu den Passbohrungen am ND-Lagerschild. Nach einer Lagekontrolle wird der Beam zur Vermeidung von Verkanten gleichmäßig auf beiden Seiten mit einem Gummihammer geklopft, sodass sich die Hülsen in die Bohrungen bewegen. Sobald eine genügend gute Verbindung gewährleistet ist und die Bohrungsachsen parallel zueinander verlaufen, können die Bauteile miteinander verschraubt werden, wodurch auch die Passhülsen gleichmäßig und vor allem stoßfrei in die Bohrungen gezogen werden. Die Durchgangslöcher im Beam (25 mm lang) und im Lagerschild (28,5 mm lang) sowie die notwendige Mindestschraubtiefe von ca. 29 mm verlangen nach einer Schraubenlänge von mindestens 85 mm. Angezogen wird mittels Drehmomentschlüssel an der Schraube bei gleichzeitigem Kontern der Mutter mit einer Hebelverlängerung, wobei das Anzugsdrehmoment bei ungefähr 714 Nm liegt. Ebenso wie zuvor bei der Montage der thermischen Zentrierung wird die Montage auch hier wegen Unzugänglichkeit für lange Hebel deutlich erschwert.

Anschließend erfolgt die Montage des Deswirlers. Dieser wird aus seiner infolge des Transports liegenden Position mit Hilfe des Portalkrans und Traggurten von der Palette in eine aufrechte Position gehoben. Die einem Kelch ähnliche Form des Bauteils ermöglicht eine einfache und vor allem auch sichere Umspannung mit Traggurten (analog zu Abbildung 3.31 rechts). Anschließend wird der Deswirler in die Prüfstandsachse gehoben und zum ND-Lagerschild ausgerichtet. Wie auch im Schnittbild dargestellt, erfolgt die Zentrierung über einen Zentriersitz. Nach dem Reinigen und anschließendem Auftragen des roten Montagefetts wird nun das Bauteil mit Hilfe von 16 Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben mit dem Lagerschild durch Anziehen über Kreuz mit einem Anzugsmoment von ca. 25 Nm verschraubt. Das $\varnothing 9$ mm Durchgangsloch im Deswirler ist 10 mm lang, während das Sackloch im ND-Lagerschild eine Länge 25 mm aufweist. Daraus ergibt sich eine theoretisch maximal mögliche Schraubenlänge von 35 mm. Die Einschraubtiefe hingegen sollte zumindest 10 mm betragen. Der bereits fertig montierte Deswirler ist in den Fotoaufnahmen in Abbildung 3.34 dargestellt. Bei der Dichtstelle zu den Kanalbegrenzungsblechen sollte anstelle eines O-Ringes (wegen den scharfen Blechkanten) eine Fugenabdichtung mittels Hochtemperatursilikon erfolgen.

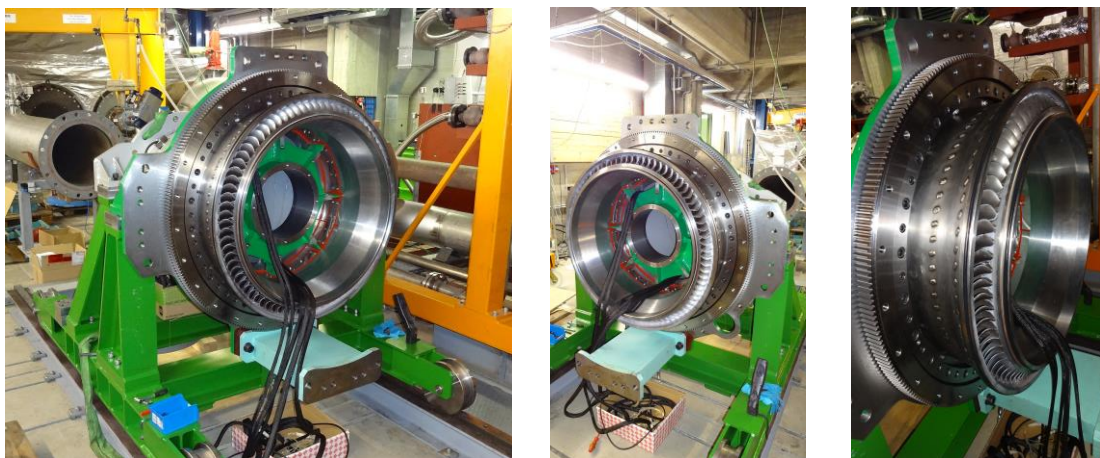


Abbildung 3.34: Fotoaufnahmen vom fertig montierten Deswirler am AnCa-Prüfstand.

Im nächsten Schritt erfolgt die Montage vom Aft Outer Casing. Auch dieses wird aus seiner durch den Transport bedingten liegenden Position mittels Portalkran und Traggurten in eine aufrechte Lage angehoben. Die Anbringung der Traggurte kann hier sehr komfortabel über die entsprechende Hebeöse an der Außenkontur erfolgen (analog zu Abbildung 3.31 Mitte rechts). Die Abdichtung des drehbaren Outer Casings hin zum stationären Deswirler erfolgt über einen entsprechenden dynamisch dichtenden (d.h. während der Traversierbewegungen schleifenden) O-Ring, welcher in die entsprechende Nut im Deswirler ($d_i=910,3$ mm; $\Delta h=5,35$ mm; $b=9,60$ mm) eingelegt wird. Um diese Drehbarkeit realisieren zu können, wird das Outer Casing (aufgrund seiner unverwechselbaren Ähnlichkeit auch gerne ab und zu als „Waschtrömel“ bezeichnet) in die Prüfstandsachse gehoben, mit dieser ausgerichtet und nach dem üblichen Reinigen sowie anschließendem Einfetten der Passflächen mit dem Außenring des ND-Traversierlagers verschraubt. Auch hier erfolgt die Zentrierung über einen Zentriersitz am Teilaußenring des Lagers. Für die Herstellung der Verbindung werden 26 Stück M16 8.8 Zylinderkopfschrauben benötigt, welche über Kreuz mit einem Anzugsdrehmoment von ca. 206 Nm angezogen werden. Das $\varnothing 18$ mm Durchgangsloch im Outer Casing ist 16 mm lang, das $\varnothing 18$ mm Durchgangsloch im ersten Lagerteilring ist 23 mm lang und die Länge vom Durchgangsgewinde im zweiten Lagerteilring beträgt 29 mm, wodurch sich eine theoretisch maximal mögliche Schraubenlänge von 68 mm ergibt, wobei die Einschraubtiefe zumindest mehr als 19 mm aufweisen sollte. Das bereits montierte Aft Outer Casing ist in den Fotoaufnahmen in Abbildung 3.35 dargestellt.



Abbildung 3.35: Fotoaufnahmen vom fertig montierten Aft Outer Casing am AnCa-Prüfstand.

Die für die Einleitung der Drehbewegung am Backward-Rig zuständige Komponente ist der Harmonic Drive Bwd-Traversiermotor. Dessen Stützrahmen wird mit Hilfe von zwei M24 8.8 Sechskantschrauben sowie zugehörigen Muttern mit dem ND-Lagerschild bei einer ungefähren Position von ALF-225° verschraubt. Das Durchgangsloch am Motorrahmen ist 28 mm lang und jenes am Lagerschild 28,5 mm. Dazwischen werden Distanzhülsen mit einer Länge von 121,25 mm eingelegt, welche dafür sorgen, dass das Motorritzel in optimaler axialer Position in das Zahnrad vom Lageraußenring eingreift. Eine M24-Mutter hat eine Höhe von ca. 24 mm und zwei dazu passende Beilagscheiben jeweils ca. 4 mm. Dies führt zu einer theoretisch minimalen Schraubenlänge von 210 mm, wobei die Gewindelänge natürlich deutlich kleiner ausfallen kann. Die einzelnen Montageschritte sind in Abbildung 3.36 als Fotostrecke dargestellt. Der Motor wird mittels Traggurten und Portalkran angehoben und in die Montageposition unter Ausrichtung der Bohrungsachsen gebracht. Anschließend wird nur die obere Durchsteckschraubverbindung hergestellt ($M_A=714$ Nm), sodass der Motor um diesen nun neu entstandenen Drehpunkt in die Eingriffsposition vom Zahnrad gedreht werden kann. Zur Einstellung des Flankenspiels wird ein gefaltetes DIN A4-Blatt eingelegt. Danach kann die zweite Verschraubung erfolgen und der Motor an die Steuerungseinheit angeschlossen werden.

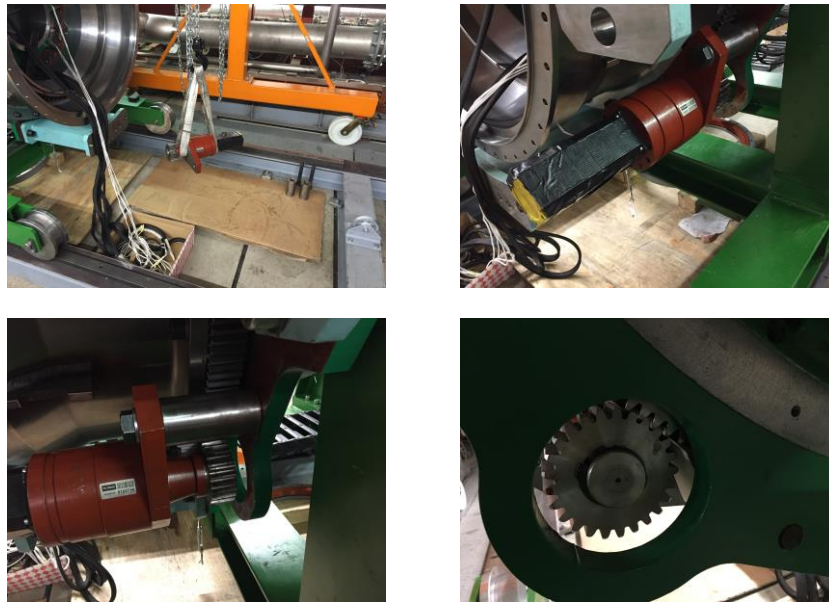


Abbildung 3.36: Fotoaufnahmen von der Montage des Bwd-Traversiermotors.

Nun können auch noch die restlichen drei Beams vom Backward-Rig am ND-Lagerschild montiert werden (siehe Abbildung 3.37). Die einzelnen Montageschritte sind hierbei dieselben wie bei der bereits zuvor beschriebenen Montage des Bwd-Beams ALF-180°. Das Endergebnis ist in Abbildung 3.37 rechts unten dargestellt.



Abbildung 3.37: Fotoaufnahmen der fertig montierten Bwd-Beams bei ALF-90° (links oben), ALF-0° (rechts oben) und ALF-270° (links unten) sowie von allen vier Bwd-Beams gleichzeitig (rechts unten).

Für die Komplettierung des in Abbildung 3.32 dargestellten Schnittbildes fehlen noch die beiden Kanalarme I und II, welche später als Anbindung des Niederdruckstators (LP Vanes) an das Lagerschild fungieren. Diese wurden jedoch für den AnCa-Prüfstand neu angefertigt. Der erste Kanalarm verfügt über Ausnehmungen für die Stützschaufelträger am Lagerschild. In diesen Ausnehmungen sind $\text{Ø}11$ mm Durchgangslöcher mit einer Länge von 68 mm gebohrt. Die Sacklöcher mit einer Gewindetiefe von 25 mm befinden sich in den Stützschaufelträgern. Es werden daher acht Stück

M10 8.8 Zylinderkopfschrauben mit einer maximalen Schraubenlänge von 93 mm benötigt, wobei diese mit einer Kopflänge von 12 mm vollständig im Kanalarm I versenkt werden müssen, um die Montage des zweiten Kanalarmes zu ermöglichen. Die Einschraubtiefe sollte zumindest 12 mm betragen. Das notwendige Anzugsdrehmoment liegt bei etwa 48 Nm. Die Zentrierung erfolgt nach Reinigung und Einfetten der Passflächen über den entsprechenden Zentriersitz am Lagerschild.

Der zweite Kanalarm wird in der gleichen azimutalen Lage montiert wie beim TTTF-Prüfstand. Die Zentrierung erfolgt über den entsprechenden Zentriersitz am Kanalarm I. Die Verschraubung erfolgt über jene Durchgangslöcher, welche sich nicht mit den Stützschaufelträgern decken. Das $\varnothing 9$ mm Durchgangsloch im zweiten Kanalarm ist 8 mm lang, das Sackloch im ersten weist eine Gewindetiefe von 20 mm auf. D.h. es werden acht Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben mit einer maximalen Gewindelänge von 28 mm benötigt. Die Einschraubtiefe sollte bei einem Anzugsdrehmoment von ca. 25 Nm minimal 10 mm betragen. Auch beim zweiten Kanalarm sind vor der Montage die Passflächen zu reinigen und anschließend mit Montagefett einzustreichen.

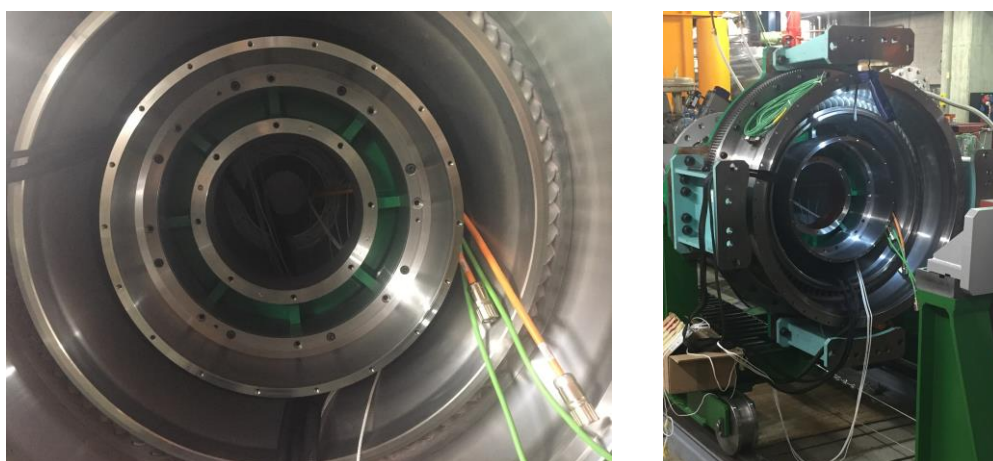


Abbildung 3.38: Fotoaufnahmen von den bereits fertig montierten Kanalarmen I und II.

Die als nächstes zu montierenden Komponenten sind in der nachfolgenden Abbildung 3.39 schematisch dargestellt.

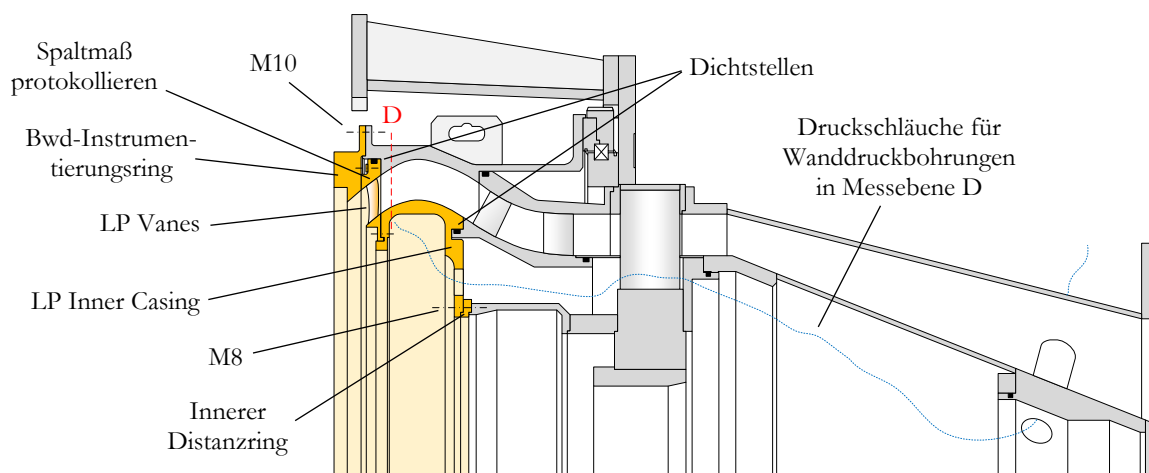


Abbildung 3.39: 2D-Schnittbild für die Montage des Niederdruckstators.

Konkret handelt es sich dabei um den kompletten Niederdruckstator (LP Inner Casing + LP Vanes), den Bwd-Instrumentierungsring und die Instrumentierung der inneren Wanddruckbohrungen in Messebene D.

Um die nachfolgenden Arbeitsschritte bei der Spaltkontrolle in Unterabschnitt 3.2.3.3 gewissenhaft durchführen zu können, muss zu allererst der Bwd-Instrumentierungsring kurz am Aft Outer Casing montiert werden, um mittels Messschieber das axiale Spaltmaß im nun entstandenen Hohlraum an der Ringraumaußenkontur gleichmäßig über den Umfang verteilt (am besten in 45°-Schritten) zu messen und für später zu protokollieren. Danach wird der Bwd-Instrumentierungsring wieder demontiert und in unmittelbarer Nähe zur Montagebucht zwischengelagert.

Nun kann die eigentliche Montage dieses Bereichs beginnen. Der innere Distanzring wird auf den Zentriersitz vom Kanalarm II gehoben und zu den Bohrungen ausgerichtet. Anschließend wird ein passender O-Ring in die entsprechende Dichtungsnut am Deswirler eingelegt. Diese Nut weist einen Innendurchmesser von $\varnothing 744$ mm und eine Breite von 9,6 mm sowie eine Höhe von ungefähr 5,4 mm auf. Ein weiterer Dichtungsring wird in die zugehörige Nut am Außendurchmesser der Leitschaufelreihe bei $\varnothing 948,2$ mm eingelegt. Die Nutbreite beträgt 9,7 mm und die Höhe ca. 5,3 mm. Danach wird das Inner Casing mitsamt den bereits montierten Niederdruck-Statorschaufeln (siehe Abbildung 3.40 links) mittels Traggurten und Portalkran auf den Zentriersitz des inneren Distanzringes gehoben und die Bohrungen korrekt zueinander ausgerichtet.

Da die azimutalen Lagen der Messpositionen und Schaufeln bereits in der Entwicklungsphase des Prüfstandes fixiert worden sind, wird bei derartigen lageempfindlichen Bauteilen die Einbaulage ALF-0° immer direkt am Bauteil (z.B. mittels Reißnadel) kenntlich gemacht, um eine fehlerhafte Montage im Vornherein ausschließen zu können. Das Inner Casing (15 mm langes und $\varnothing 8,5$ mm Fein-Durchgangsloch) wird mit Hilfe von 18 Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben über den inneren Distanzring (13,5 mm langes und $\varnothing 8,5$ mm Fein-Durchgangsloch) mit dem zweiten Kanalarm (Sackloch mit Gewindetiefe 20 mm) verschraubt. D.h. es werden Schrauben mit einer maximalen Länge von 48,5 mm (mit Beilagscheibe 46,9 mm) benötigt, welche anschließend mit einem Drehmoment von ca. 25 Nm über Kreuz angezogen werden. Die minimale Einschraubtiefe sollte 9,6 mm betragen.

Auch hier sind sämtliche Passflächen vor dem Einbau zu reinigen, zu entfetten und anschließend wieder mit Montagefett zu benetzen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die beiden O-Ringe während der Montage nicht beschädigt werden. Der komplett fertig montierte Niederdruckstator ist in Abbildung 3.40 rechts dargestellt.

Nun kann auch der Bwd-Instrumentierungsring, welcher sich aus zwei Teilhälften (oberer und unterer Halbkreis) zusammensetzt, montiert werden. Hierfür wird er mittels Traggurten und Portalkran auf den passenden Zentriersitz vom Aft Outer Casing gehoben und lagemäßig ausgerichtet. Sowohl die Durchgangslöcher im Ring als auch jene im Outer Casing weisen mit $\varnothing 11$ mm mittelfeine Durchmesser sowie Längen von jeweils 10 mm auf. Nach Reinigung und anschließender Einfettung der Passflächen wird der Bwd-Instrumentierungsring mit dem Aft Outer Casing unter Zuhilfenahme von insgesamt 48 Stück M10 8.8 Zylinderkopfschrauben und passenden Muttern verschraubt, welche bei Verwendung von zwei Beilagscheiben eine Länge von zumindest 32,4 mm aufweisen und über Kreuz mit 48 Nm angezogen werden sollten.



Abbildung 3.40: Fotoaufnahmen vom Niederdruckstator im angelieferten Zustand (links) und im bereits montierten Zustand (rechts).

Wie aus dem 2D-Schnittbild in Abbildung 3.39 hervorgeht und bereits zuvor auch kurz angedeutet wurde, müssen wieder ein paar Instrumentierungsarbeiten aufgrund der späteren Unzugänglichkeit vorgezogen werden, da durch die Montage des Niederdruckstators mit der Messebene D nun die erste zu vermessende Ebene seit dem Diffusor erreicht bzw. überschritten wurde. Auch hier soll wieder auf den entsprechenden Instrumentierungsabschnitt 4.3.6 verwiesen werden, in dem näher auf die Messpositionen eingegangen wird. Für die aktuellen Montageschritte ist es nur wichtig zu wissen, dass die notwendigen Druckschläuche bereits zuvor durch den Diffusor und nun auch durch die acht Leitungsführungen im LP Inner Casing zu je $\text{Ø}34$ mm Durchmesser gezogen wurden und die geometrischen Abmessungen der insgesamt acht zu instrumentierenden Wanddruckbohrungen bekannt sind.

Wie zuvor beim Diffusor setzen sich auch hier die Wanddruckbohrungen aus zwei Teilbereichen zusammen. An der konvexen Innenwand der Ringraumkontur (bzw. der „Überdruckseite“) weisen die Bohrungen einen Durchmesser von $\text{Ø}0,6$ mm und eine Länge von 2 mm auf, bevor sie auf jene Bohrungen mit $\text{Ø}1,6$ mm Durchmesser und 14 mm Länge übergehen, welche an der konkav geformten Wand auf der „Umgebungsseite“ letztendlich austreten. Die nachfolgende Vorgangsweise ist bereits bekannt. Mit Hilfe eines Multifunktionswerkzeugs werden von Kanülen mit den Abmessungen $\text{Ø}1,60/\text{Ø}1,30 \times 1000$ mm acht kurze Wanddruckröhrchen mit einer empfohlenen Länge von maximal 34 mm abgeschnitten und anschließend an den Kanten entgratet sowie angefast, wobei die Anfasung einerseits zur Montageerleichterung und andererseits zum Schutz der Druckschläuche vor scharfen Kanten dient. Danach werden die Röhrchen jeweils in eine Bohrung auf der Umgebungsseite bis zum Anschlag eingeführt und anschließend mit temperaturbeständigem Epoxidharz und zugehörigem Härter lagemäßig fixiert. Abschließend werden nach erfolgtem Trocknen des Gemischs die den Lagen der Bohrungen entsprechend gekennzeichneten Druckschläuche auf die Röhrchen gesteckt.

3.2.3.2 Montage des Turbinenübergangskanals

Nun kann der Mittelteil durch die Montage des Turbinenübergangskanals und die Instrumentierung der Wanddruckbohrungen und Grenzschichtkämme an der Innenkontur des Ringraums („Hub“) in den Messebenen B und C komplettiert werden.

Im 2D-Schnittbild in Abbildung 3.41 sind die hierfür notwendigen Komponenten farblich hervorgehoben. Dabei werden die angegebenen Nummerierungen folgenden Bauteilen zugeordnet:

1. TCF-Befestigungssegmente (vier Stück zu je 90°-Bogenmaß),
2. Turbinenübergangskanal bzw. Turbine Center Frame (TCF) oder Intermediate Turbine Duct (ITD),
3. TCF-Flansch,
4. Dichtungsflansch,
5. Dichtungsdeckel und
6. statischer Rotorersatz.

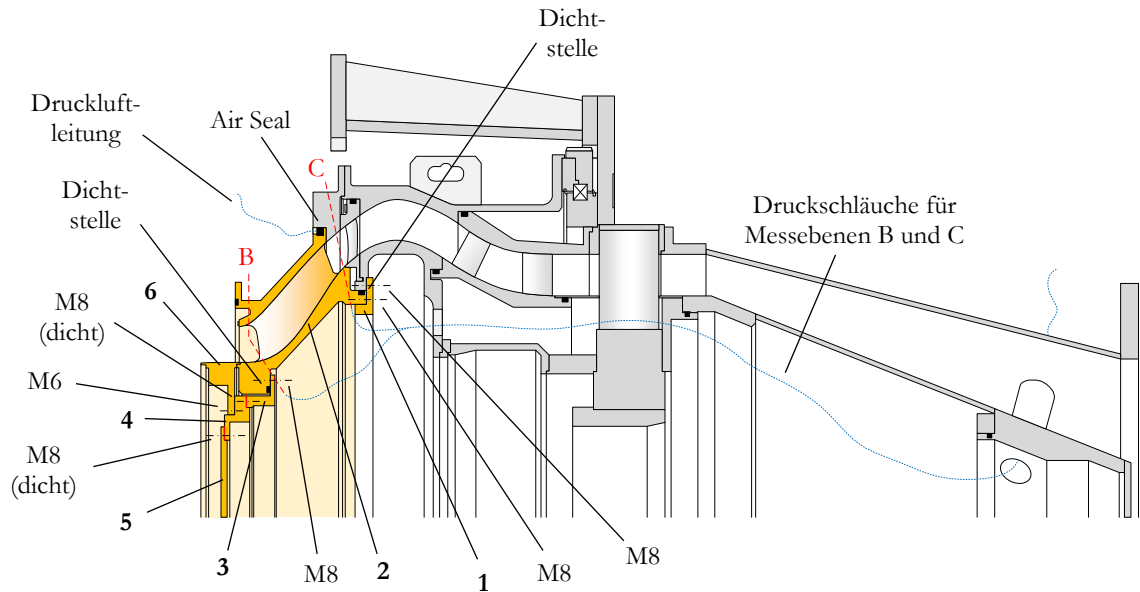


Abbildung 3.41: 2D-Schnittbild mit den notwendigen Komponenten für die Montage des Turbinenübergangskanals.

Es empfiehlt sich, die Komponenten 2, 3, 4 und 6 bereits im Vorfeld zu verbinden und anschließend als gemeinsame Baugruppe am Prüfstand zu montieren. In Abbildung 3.42 ist der Turbinenübergangskanal im angelieferten Zustand dargestellt. Die zu sehenden Zusatzinstrumentierungen für Spezialmessungen werden hier jedoch nicht behandelt.



Abbildung 3.42: Turbinenübergangskanal im angelieferten Zustand.

Zuerst muss der TCF-Flansch (3) mit dem TCF (2) selbst verschraubt werden. Hierfür wird ein passender O-Ring mit einem mittleren Durchmesser von $\text{Ø}408$ mm in die axiale Dichtungsnut mit einer Breite von 4,4 mm und einer Höhe von 7,8 mm eingelegt. Im Anschluss daran werden die Passflächen gereinigt sowie eingefettet und der Flansch mit zwölf M8 8.8 Zylinderkopfschrauben am TCF über einen Zentriersitz verschraubt. Das $\text{Ø}9$ mm Durchgangsloch im Flansch weist eine Länge von 7 mm auf, während das Sackloch im TCF eine Gewindetiefe von ca. 9,8 mm aufweist. Bei Verwendung einer Beilagscheibe wird eine maximale Schraubenlänge von 18,4 mm empfohlen, wobei die Mindesteinschraubtiefe 9,6 mm betragen sollte und somit die vorhandene Gewindetiefe komplett ausnutzt. Die Schrauben werden über Kreuz mit einem Drehmoment von ca. 25 Nm angezogen.

Als nächstes wird der Dichtungsflansch (4) über dessen Zentriersitz am TCF-Flansch (3) ausgerichtet und montiert. Hierfür werden wiederum zwölf M8 8.8 Zylinderkopfschrauben benötigt, deren Köpfe im Dichtungsflansch (ohne Verwendung einer Beilagscheibe) vollständig versenkt werden können. Dessen $\text{Ø}9$ mm Durchgangsloch ist 11,4 mm lang, während das Sacklochgewinde im TCF-Flansch eine Länge von 15,8 mm aufweist. Es wird daher eine maximale Schraubenlänge von 27,2 mm empfohlen, ansonsten gelten dieselben Montagevorgaben wie im letzten Absatz. Nach erfolgter Montage muss noch die entstandene Fuge zwischen den beiden Bauteilen auf der zugänglichen Seite (Ecke beim Zentriersitz) mittels gleichmäßig über den Umfang verteiltem Hochtemperatursilikon abgedichtet werden.

Die Fertigstellung dieser vorab zusammengestellten Baugruppe erfolgt durch die Montage des statischen Rotorersatzes (6), welcher quasi als Dummy-Rotor für den stationären Betrieb ohne Laufrad und Elektromotor fungiert, am Dichtungsflansch (4). Hierfür wird das Bauteil am Sitz des Flansches zentriert und die Bohrungen zueinander ausgerichtet. Die Verbindung wird durch 24 Stück M6 8.8 Zylinderkopfschrauben bewerkstelligt, deren Köpfe im Rotorersatz vollständig versenkt werden können. Das $\text{Ø}6,6$ mm Durchgangsloch ist 5,6 mm lang und das Sackloch im Flansch hat eine Gewindetiefe von 10,9 mm. Ohne die Verwendung einer Beilagscheibe wird eine maximale Schraubenlänge von 16,5 mm empfohlen, wobei die Mindesteinschraubtiefe 7,2 mm beträgt. Nach der üblichen Reinigung und Einfettung der Passflächen mit dem roten Montagefett erfolgt die Verschraubung durch Anziehen über Kreuz bei einem Anzugsmoment von 10 Nm. Die neu entstandene Baugruppe ist in Abbildung 3.43 dargestellt.



Abbildung 3.43: Fotoaufnahmen nach der TCF-Vormontage aus verschiedenen Perspektiven.

Als nächstes werden die vier TCF-Befestigungssegmente (1) nacheinander durch die Öffnung vom LP Inner Casing eingefädelt, am dort befindlichen Sitz zentriert sowie ausgerichtet und mit jeweils drei Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben am Inner Casing montiert. Auch hier sind die Passflächen wie üblich zuvor zu reinigen und einzufetten. Das $\text{Ø}9$ mm Durchgangsloch im Segment ist 10 mm lang und das Durchgangsgewinde im anderen Bauteil 20 mm. Es

wird eine mittlere Schraubenlänge von 35 mm empfohlen, während ansonsten die für M8-Schrauben zuvor genannten üblichen Montagebedingungen gelten. Zwei montierte Segmente sind in Abbildung 3.44 links dargestellt.

Nach erfolgreicher Montage der Segmente kann die bereits zuvor unabhängig montierte TCF-Baugruppe mittels an den hierfür vorgesehenen Hebeösen angebrachten Traggurten und Portalkran in die Montagebucht gehoben und für die Montage ausgerichtet werden. Bevor die Baugruppe in die Zentrierung gehoben wird, müssen noch zwei Dichtstellen funktionstüchtig gemacht werden. Die erste dient zur Abdichtung der entstehenden Fuge zwischen TCF und LP Inner Casing. Hierfür ist im TCF eine Radialnut mit einer Breite von 9,7 mm und einer Höhe von 5,3 mm vorgesehen, in welche ein entsprechender Dichtungsring am Nutinnendurchmesser $\varnothing 682,7$ mm eingelegt wird. Die zweite Dichtstelle ist etwas Besonderes, denn sie dient zur Abdichtung des stationären Turbinenübergangskanals gegen den mit dem Outer Casing bei einer Traversierbewegung mitdrehenden Bwd-Instrumentierungsring und ist neben der realisierten Druckluftdichtung beim Teleskoprohr in der Abluftleitung die einzige ausgeführte und während des Betriebs elektronisch ansteuerbare „Air Seal“ am Prüfstand. Diese wird in die entsprechende Radialnut am äußersten Umfang vom TCF mit einem Nutinnendurchmesser von $\varnothing 856,6$ mm, einer Breite von 10,8 mm und einer Höhe von 8,9 mm eingelegt, sodass das Druckluftventil, welches danach an die AnCa-Druckluftversorgungsleitung angeschlossen werden kann, aus der ausgefrästen Nut bei ALF-0° herausragt.

Sobald beide Dichtstellen in Ordnung sind, wird die gesamte TCF-Baugruppe auf den durch die vier Befestigungssegmente gebildeten Zentriersitz gehoben und montiert (siehe Abbildung 3.44 mittig und rechts). Auch hier werden pro Segment wieder drei Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben benötigt, welche jedoch durch die derzeit noch zugängliche vordere Öffnung der TCF-Baugruppe blind in die vorgesehenen Gewinde des jeweiligen Segments eingeschraubt werden müssen. Das $\varnothing 9$ mm Durchgangsloch im Segment ist 10 mm lang, während das Sackloch im TCF eine Gewindetiefe von 11,8 mm aufweist. Bei Verwendung einer Beilagscheibe wird eine maximale Schraubenlänge von 23,4 mm empfohlen. Es gelten die üblichen Montagevorgaben.

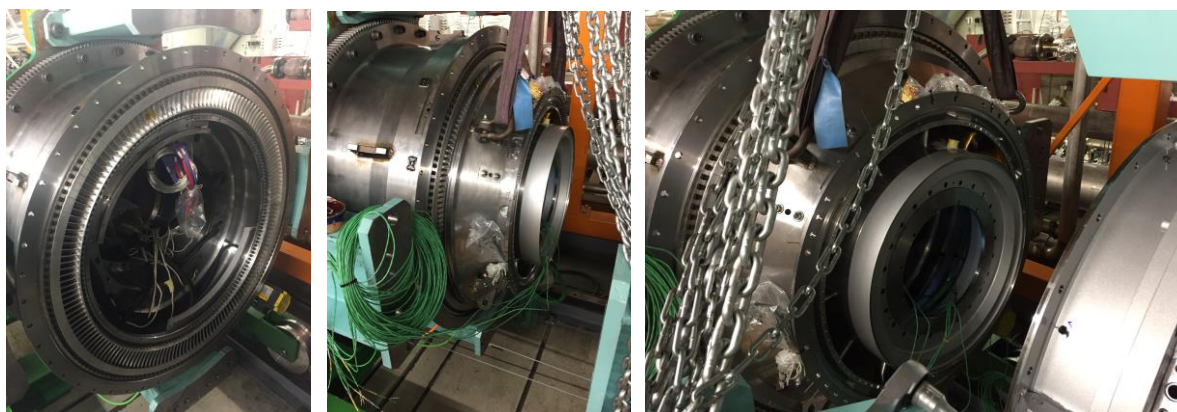


Abbildung 3.44: Fotoaufnahmen von der Montage der TCF-Baugruppe (hier ohne Bwd-Instrumentierungsring).

Bevor der Mittelteil des Prüfstandes innen mit dem Dichtungsdeckel verschlossen werden kann, müssen noch die im 2D-Schnittbild aus Abbildung 3.41 dargestellten Hub-Messpositionen instrumentiert werden. Konkret handelt es sich dabei einerseits um einen Grenzschnittkamm in der Messebene B, welcher von der inneren Umgebungsseite über angepasste Sondenführungen in die zugehörige Bohrung eingeführt und anschließend mittels Verschraubung in seiner Position und Lage fixiert wird, sodass die entsprechende Führung an der Ringrauminnenkontur nahezu ideal in die

Konturwand übergeht und der Grenzschichtkamm in vordefinierter Lage in die Strömung ragt. Die Endfertigung der Grenzschichtkämme wird im Abschnitt 4.1.2 beschrieben, während die azimutale Lage in den Abschnitten 4.3.3 bis 4.3.5 beschrieben wird. Der hier im Vorfeld zu instrumentierende Grenzschichtkamm wird an die bereits durch den Diffusor durchgezogenen und zum Kamm zugeordneten Druckleitungen angeschlossen.

Des Weiteren müssen wieder Wanddrucksonden instrumentiert werden, und zwar jeweils acht Stück in den Messebenen B und C. Die azimutale Lage der Bohrungen wird in den Abschnitten 4.3.4 und 4.3.5 beschrieben. Die Anfertigung der Wanddruckröhrchen sowie deren Instrumentierung erfolgt komplett analog zur bereits beschriebenen Vorgangsweise bzgl. der Wanddruckbohrungen entlang der Diffusorwände und in der Messebene D. In beiden Messebenen B und C beträgt die Länge der $\varnothing 1,60$ mm Bohrung infolge der großen Wandstärke auf der inneren Umgebungsseite ungefähr 50 mm. Pro Bohrung wird daher eine maximale Röhrchenlänge von 70 mm empfohlen.

Nach der erfolgten Instrumentierung kann der Mittelteil mit Hilfe des hierfür vorgesehenen Dichtungsdeckels (5), der am Dichtungsflansch (4) verschraubt wird, verschlossen und abgedichtet werden. Hierfür werden zwölf Stück M10 8.8 Zylinderkopfschrauben benötigt. Das $\varnothing 11$ mm Durchgangsloch im Deckel ist 5 mm lang und das Durchgangsgewinde im Flansch 10 mm. Ohne Beilagscheibe benötigt man demnach eine Schraubenlänge von 15 mm. Es sollte hier aufgrund der durch die Bauteildicke bedingten kurzen Einschraubtiefe und zur Erzeugung einer Dichtwirkung ein Schraubensicherungsmittel mittlerer Festigkeit eingesetzt werden. Zusätzlich ist die Fuge zwischen Deckel und Flansch mit Hochtemperatursilikon abzudichten.

Abschließend kann noch der entsprechende (schleifende) Dichtungsring in die hierfür vorgesehene Axialnut eingelegt werden, welche das stationäre TCF später nach dem Schließen des Rigs gegenüber dem während einer Traversierung des Fwd-Rigs rotierenden Fwd-Instrumentierungsring abdichten soll. Die Nut hat einen Innendurchmesser von $\varnothing 653,8$ mm und weist eine Breite von ungefähr 4,4 mm auf sowie eine Höhe ca. 7,8 mm. Die fertig montierte TCF-Baugruppe ist in Abbildung 3.45 dargestellt.

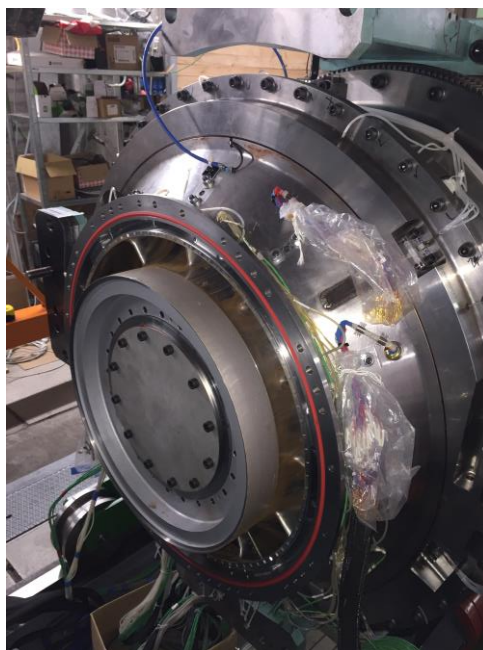


Abbildung 3.45: Fotoaufnahme der TCF-Baugruppe im fertig montierten Zustand (mit Bwd-Instrumentierungsring).

3.2.3.3 Spaltkontrolle und mögliche Abhilfemaßnahmen

Beim mechanischen Aufbau von Turbinenprüfständen ist stets auf genaues Arbeiten zu achten. Die Spaltkontrolle ist hierbei ein essentielles Kernthema und daher unumgänglich. Dass man nach der Montage eines entsprechenden Bauteils den radialen Spalt (falls möglich) gleichmäßig über den Umfang zumindest mittels Messschieber kontrolliert, ist üblich und auch für eine rasche Überprüfung der Zentrierung sinnvoll. Das allein reicht jedoch nicht aus, denn aufgrund der Materialaufheizung durch die heiße Strömung während des Betriebs der Anlage müssen während der Montage die s.g. Kaltspalte so eingestellt werden, dass es im warmen Zustand weder zu Verspannungen im Material noch zum Klemmen zwischen stationären und beweglichen Bauteilen kommt, sondern vielmehr zum Schließen dieser Spalte und einer daraus resultierenden optimal verlaufenden Strömungskontur ohne Stufen bzw. Unterbrechungen.

Im Verlauf der Entwicklungsphase des Prüfstandes wurden die zu erwartenden Wärmedehnungen der einzelnen Bauteile während des Betriebs ausgehend von den thermischen Fixpunkten (z.B. eine thermische Zentrierung) rechnerisch analysiert. Ergebnis dieser Untersuchung war die Vorgabe der Kaltspalte für die Montage, welche während des Betriebs die Materialdehnungen exakt kompensieren sollen. Aufgrund der großen axialen Erstreckung des Prüfstandes liegt der Fokus auf den axialen Spalten. Das Prinzip beruht darauf, die radialen Wärmedehnungen durch thermische Zentrierungen weitestgehend zu unterbinden und dafür dem Prüfstand ein Axialspiel für deren Kompensation zur Verfügung zu stellen.

Eine altbewährte Methode, um dem Monteur für die Spalteinstellung größtmöglichen Handlungsspielraum zu gewähren, ist es, die Toleranzen der entsprechenden Baugruppen so zu definieren, dass diese das Maßoptimum entweder exakt erreichen oder zu kurz werden. Im ersten Fall sind keine Maßnahmen notwendig und im zweiten Fall kann die Verkürzung durch den gezielten Einsatz von Fühlerlehrenbändern ausgeglichen werden. Die im Backward-Rig relevanten Spalte sind in Abbildung 3.46 gekennzeichnet.

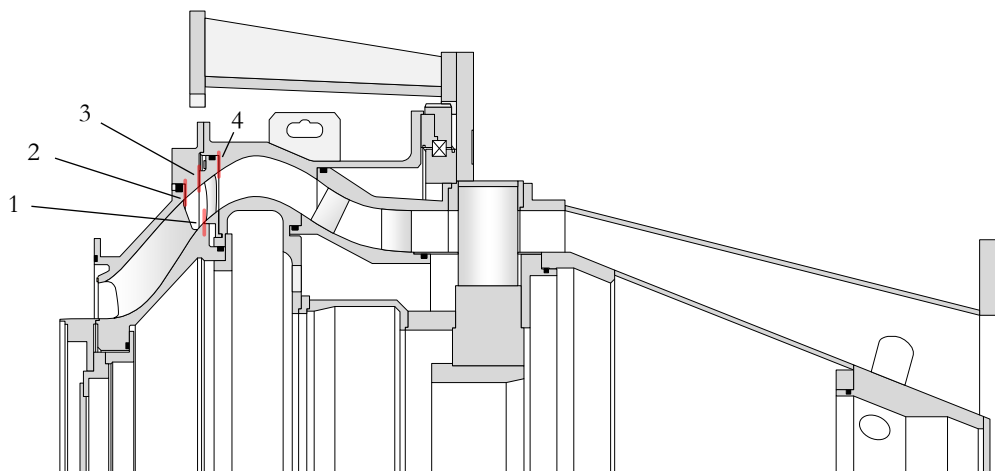


Abbildung 3.46: Wichtige Spaltkontrollpunkte am Backward-Rig.

Dabei handelt es sich um folgende Kaltspalte mit zugehörigen Sollwerten:

1. Axialspalt zwischen LP Vanes und Turbinenübergangskanal bzw. TCF (0,305 mm)
2. Axialspalt zwischen TCF und Bwd-Instrumentierungsring (0,203 mm)

3. Axialspalt zwischen Bwd-Instrumentierungsring und LP Vanes (0,356 mm)
4. Axialspalt zwischen LP Vanes und Aft Outer Casing (0,406 mm)

Während die ersten drei Spalte am besten in 45°-Schritten über den Umfang verteilt mit Hilfe von Fühlerlehren messtechnisch ermittelt werden können, kann der vierte Spalt nur indirekt durch die zuvor erfolgte Messung und Protokollierung des Spaltes zwischen Bwd-Instrumentierungsring und Aft Outer Casing in Kombination mit der Kenntnis der axialen Länge des Rahmes für die Niederdruck-Statorschaufeln berechnet werden.

Falls es bei einem oder mehreren Spalten zu einer Unterschreitung des Sollwerts durch den gemessenen Mittelwert kommt, kann der einwandfreie Betrieb der Anlage nicht gewährleistet werden. Im Bereich des Backward-Rigs gibt es jetzt zwei mögliche Abhilfemaßnahmen, welche sich allein durch die unterschiedliche Anbringung der Fühlerlehrenbänder ergeben (siehe Abbildung 3.47). Im ersten Fall werden diese zwischen LP Inner Casing und innerem Distanzring eingesetzt, was zu einer Vergrößerung der Spalte 2 und 4 sowie zu einer Verkleinerung von Spalt 3 führen würde. Im zweiten Fall hingegen werden sie zwischen TCF und den Befestigungssegmenten angebracht, was ausschließlich zu einer Vergrößerung der Spalte 1 und 2 führen würde.

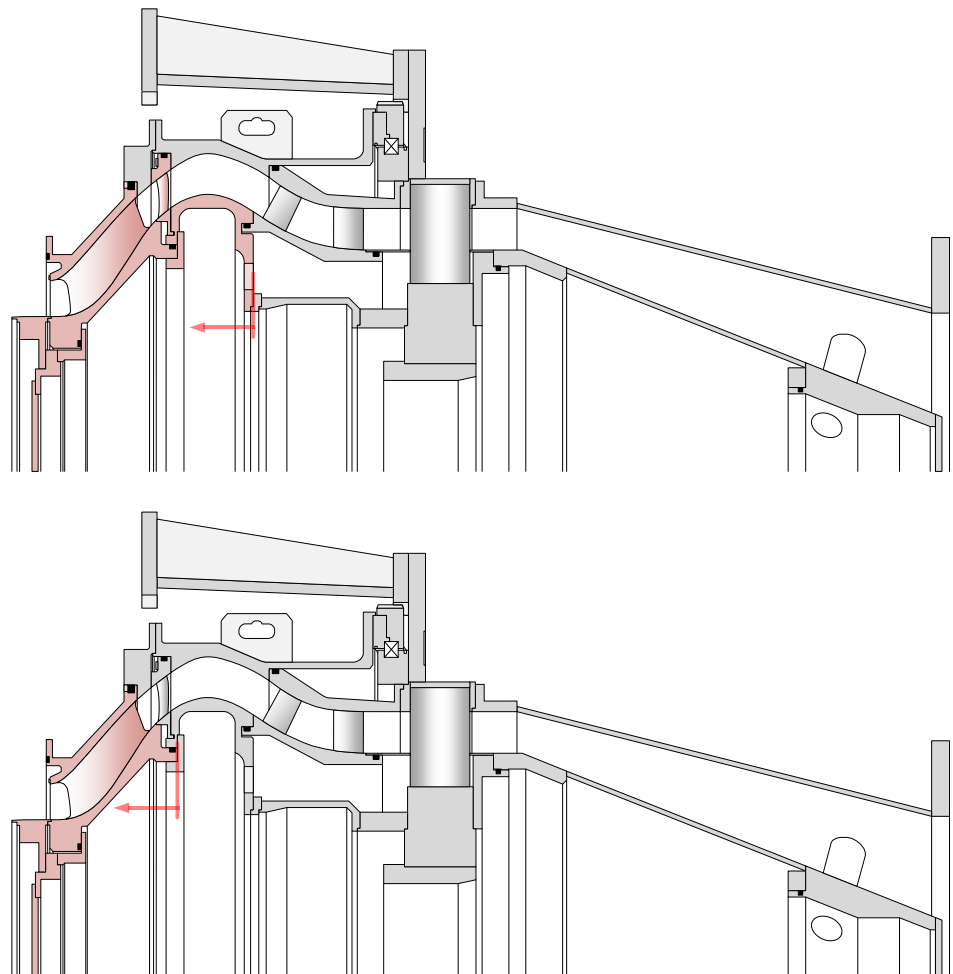


Abbildung 3.47: Bwd-Spaltmanipulation Fall 1: Einsatz von Fühlerlehrenbändern beim LP Inner Casing (oben), Bwd-Spaltmanipulation Fall 2: Einsatz von Fühlerlehrenbändern beim Turbinenübergangskanal (unten).

3.2.4 Einlaufbereich

Da die AIDA-Drehvorrichtung des TTTF an den Fertigungsbetrieb für die neu zu fertigenden Einlaufkomponenten zur gemeinsamen Montage überstellt wurde, wird diese Baugruppe für die weiteren Montageschritte als gegeben angenommen (siehe Abbildung 3.48). Einige Fotoaufnahmen der Montage vor Ort sind in Abbildung 3.49 dargestellt.

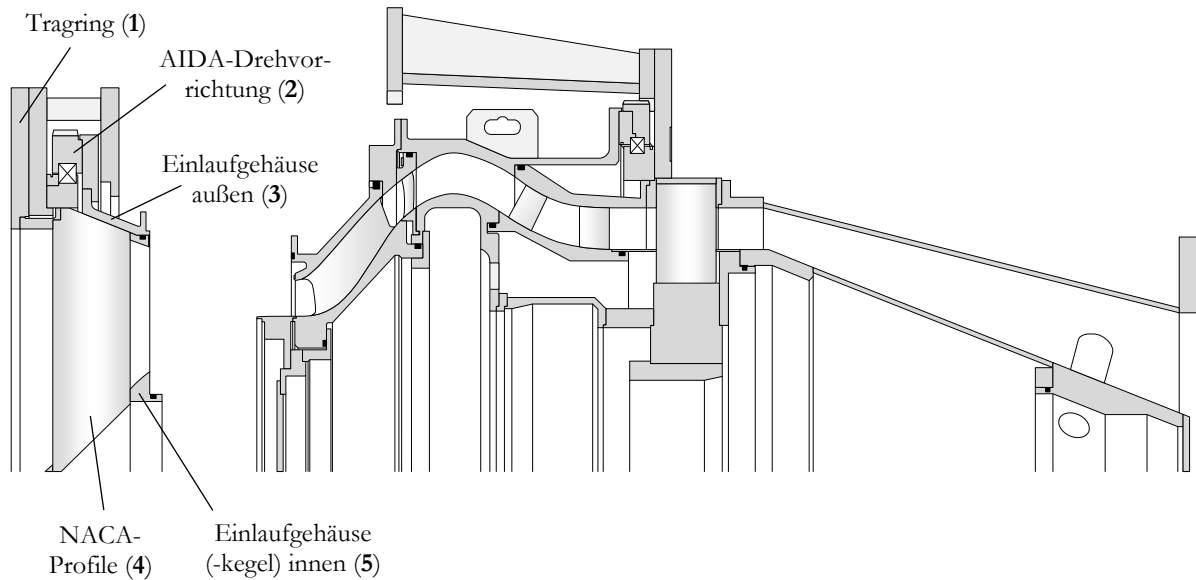


Abbildung 3.48: 2D-Schnittbild mit gegebener Einlaufbaugruppe als Ausgangssituation.



Abbildung 3.49: Fotostrecke mit Aufnahmen ausgewählter Montagestadien der Einlaufbaugruppe (AIDA-Drehvorrichtung und Neuteile) mitsamt Kammerübergang beim Fertigungsbetrieb vor Ort.

Diese Baugruppe enthält auch bereits den Kammerübergang, welcher als Verbindungsstück zur Beruhigungs- bzw. Mischkammer fungiert. Die Verbindung des Kammerübergangs mit dem Einlaufkessel erfolgt über 20 Stück M16 8.8 Sechskantschrauben. Hierfür wird die gesamte Baugruppe mittels Traggurten und Portalkran in die Montagebucht gehoben und ausgerichtet. Anschließend werden die Passflächen wie üblich gereinigt und eingefettet. Das $\text{Ø}17,5$ mm Durchgangsloch am Flansch des Kammerübergangs ist 30 mm lang, während das Sackloch im Flansch der Mischkammer eine Gewindetiefe von 20,7 mm aufweist. Bei zusätzlicher Verwendung einer Beilagscheibe wird eine maximale Schraubenlänge von 53,7 mm empfohlen, wobei die minimale Einschraubtiefe ca. 19,2 mm betragen sollte. Angezogen werden die Schrauben über Kreuz mit einem Anzugsmoment von 206 Nm.

3.2.4.1 Aufbau der Einlaufkontur und Montage des Hochdruckstators

Nun kann auch schon wieder mit dem systematischen Aufbau des Prüfstandes in Richtung Teilungsebene begonnen werden. Dabei versteht es sich von selbst, dass diese Arbeiten durch Verwendung von Traggurten gemeinsam mit dem Portalkran auch alleine durchgeführt werden könnten. Aus arbeitssicherheitstechnischen Gründen sollte die Montage von schweren Bauteilen jedoch stets mindestens zu zweit erfolgen. Bei der Montagebeschreibung der nachfolgenden Komponenten wird vorausgesetzt, dass die Passflächen zuvor gereinigt und anschließend mit dem roten Montagefett eingestrichen werden, daher werden diese Arbeitsschritte nicht mehr explizit erwähnt. Die ersten zu montierenden Bauteile sind im 2D-Schnittbild in Abbildung 3.50 schematisch dargestellt.

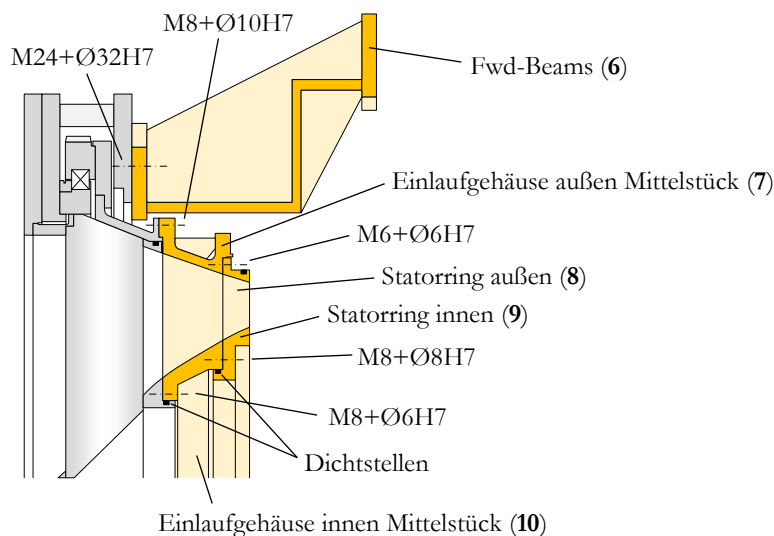


Abbildung 3.50: 2D-Schnittbild mit Komponenten des mittleren Einlaufbereichs.

Begonnen wird mit der Montage des äußeren Mittelstücks (7), welches mit dem Einlaufgehäuse (3) verschraubt wird. Hierfür werden 47 Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben benötigt. Die Zentrierung erfolgt über einen Zentriersitz sowie über zwei Passbohrungen $\text{Ø}10\text{H}7$, welche durch gemeinsames Bohren und Reiben der Bauteile angefertigt wurden. Geeignete Passstifte würden demnach ein Passmaß von $\text{Ø}10\text{m}6$ aufweisen, das zusammen mit der Einheitsbohrung eine Übergangspassung bildet. Das $\text{Ø}9$ mm Durchgangsloch im Mittelstück weist eine Länge von 26,5 mm auf, das Durchgangsgewinde im Einlaufgehäuse hingegen 10 mm. Es wird daher eine Schraubenlänge von mindestens 36,5 mm empfohlen. Angezogen wird über Kreuz mit einem Drehmoment von ca. 25 Nm.

Als nächstes wird der äußere Statorring (8) mit dem Mittelstück (7) verbunden. Hierfür werden insgesamt 22 Stück M6 8.8 Zylinderkopfschrauben benötigt, während die Zentrierung über einen Zentriersitz und eine Passbohrung $\text{Ø}6\text{H}7$ erfolgt. Die Schraubenköpfe können im Statorring vollständig versenkt werden. Das dortige $\text{Ø}6,6$ mm Durchgangsloch ist 7,6 mm lang, während das Sackloch im Mittelstück eine Gewindetiefe von 12 mm aufweist. Ohne die Verwendung einer Beilagscheibe wird demnach eine maximale Schraubenlänge von 19,6 mm empfohlen, wobei die Mindestschraubtiefe 7,2 mm betragen sollte. Das Anziehen über Kreuz erfolgt mit einem Anziehdrehmoment von ca. 10 Nm.

Nun wird die Innenkontur des Ringraums nachgezogen. Hierfür wird als erstes das innere Mittelstück (10) mit dem Einlaufkegel (5) verschraubt. Vor der Montage muss ein Dichtungs- bzw. O-Ring in die entsprechende Nut vom Einlaufkegel eingelegt werden. Diese weist eine Breite von 8,1 mm und eine Höhe von 5,3 mm sowie einen Innendurchmesser von $\text{Ø}248,4$ mm auf. Nach dem Einlegen des Dichtungsringes und der Bauteilzentrierung über den Zentriersitz und eine Passbohrung $\text{Ø}6\text{H}7$, die wie üblich in gemeinsamer Aufspannung angefertigt wurde, erfolgt die Verschraubung über 24 Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben. Das $\text{Ø}9$ mm Durchgangsloch im Mittelstück ist 25 mm lang, während die Gewindetiefe im Einlaufkegel 16 mm beträgt. Ohne Beilagscheibe beträgt die maximale Schraubenlänge also 41 mm. Angezogen wird über Kreuz mit einem Drehmoment von ca. 25 Nm.

Danach erfolgt die Montage des inneren Statorrings (9) am zuvor montierten Mittelstück (10). Auch hier muss zuvor ein passender Dichtungsring in die entsprechende Nut am Statorring eingelegt werden. Diese ist 8,1 mm breit, 4,3 mm hoch und hat einen Innendurchmesser von $\text{Ø}339,4$ mm. Anschließend erfolgt die Zentrierung über den Zentriersitz und drei Passbohrungen $\text{Ø}8\text{H}7$. Für die Verschraubung der Bauteile werden ebenfalls 24 Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben benötigt, welche aufgrund des 20 mm langen $\text{Ø}9$ mm Durchgangsloches im Statorring und einer Gewindetiefe von 16 mm im Mittelstück eine Länge von 36 mm aufweisen sollten.

Die Montage der vier Fwd-Beams und des Fwd-Traversiermotors erfolgt komplett analog zu jener der Bwd-Beams und des Bwd-Traversiermotors in Unterabschnitt 3.2.3.1. Aus diesem Grund werden die einzelnen Montageschritte hier nicht noch einmal erwähnt. Fotoaufnahmen der Komponenten sind in Abbildung 3.53 dargestellt. Im nachfolgenden 2D-Schnittbild sind die restlichen Komponenten zur Komplettierung des Einlaufbereichs dargestellt.

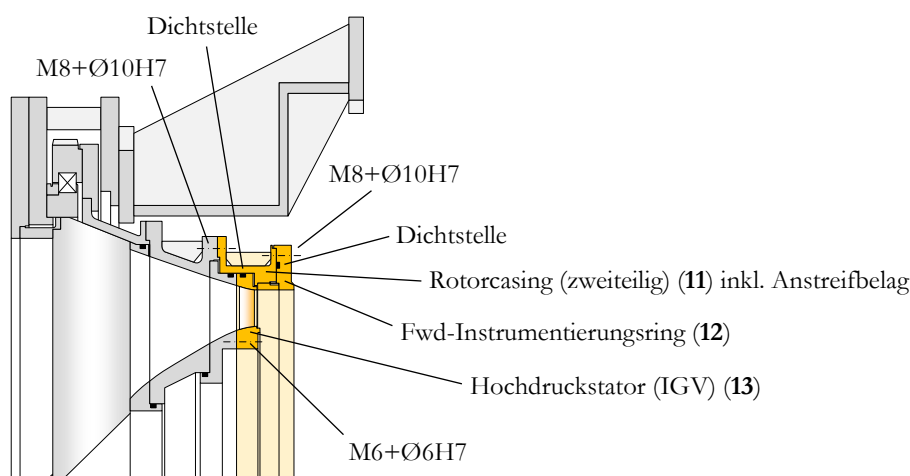


Abbildung 3.51: 2D-Schnittbild mit den verbleibenden Komponenten zur Fertigstellung Einlaufbereichs.

Begonnen wird hierbei mit der Montage des Hochdruckstators (13), dessen Leitschaufeln als Inlet Guide Vanes (IGVs) bezeichnet werden, am inneren Statorring (9). Man könnte diesen auch am äußeren Statorring (8) montieren, was zur Folge hätte, dass sich die Leitschaufeln im Falle einer Traversierung des Fwd-Rigs ebenfalls mitdrehen würden. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch lediglich die Initialmessung mit feststehenden IGVs behandelt. Die Verschraubung am Innenring erfolgt über 24 Stück M6 8.8 Zylinderkopfschrauben, deren Köpfe komplett im Stator versenkt werden können. Dieser wird mit Hilfe von vier Passbohrungen $\text{Ø}6\text{H}7$ am Statorring zentriert. Das $\text{Ø}7$ mm Durchgangsloch im Stator ist 28,4 mm lang, während das Sackloch im Ring eine Gewindetiefe von 12 mm aufweist. Ohne die Verwendung einer Beilegscheibe ergibt sich somit eine maximale Schraubenlänge von 40,4 mm, wobei die Mindesteinschraubtiefe 7,2 mm beträgt. Angezogen wird wie üblich über Kreuz mit einem Anzugsdrehmoment von 10 Nm.

In weiterer Folge kann nun auch das (zweiteilige) Rotorcasing (11) mit bereits inkludiertem Anstreifbelag am äußeren Mittelstück (7) montiert werden. Hierfür muss zuvor noch am äußersten Durchmesser des Hochdruckstators (13) ein passender Dichtungsring in die dafür vorgesehene Nut eingelegt werden. Diese ist 8,1 mm breit, 5 mm hoch und weist einen Innendurchmesser von $\text{Ø}628$ mm auf. Des Weiteren muss ein zusätzlicher O-Ring mit einem Innendurchmesser von $\text{Ø}627,2$ mm in die 8,1 mm breite und 5,4 mm hohe Nut am äußeren Statorring (8) eingelegt werden. Die Zentrierung des Rotorcasings zum äußeren Mittelstück erfolgt über einen Zentriersitz und zwei Passbohrungen $\text{Ø}10\text{H}7$, welche wie üblich in derselben Aufspannung gebohrt wurden. Das $\text{Ø}9$ mm Durchgangsloch im Casing ist 24 mm lang und das Durchgangsgewinde im Mittelstück 25 mm. Die Verschraubung erfolgt über 24 Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben mit einer Mindestlänge von 49 mm und einem Schraubenanzugsmoment von 25 Nm.

Zu guter Letzt muss noch der Fwd-Instrumentierungsring (12) mit dem zuvor montierten Rotorcasing (11) verschraubt werden. Dafür wird zuerst ein passender Dichtungsring in die hierfür vorgesehene Axialnut mit einer Breite von ca. 4,4 mm, einer Höhe von ca. 7,8 mm und einem Innendurchmesser von $\text{Ø}653,8$ mm eingelegt werden. Die Zentrierung erfolgt über einen Zentriersitz und zwei Passbohrungen $\text{Ø}10\text{H}7$. Die Verschraubung erfolgt mit 24 Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben. Das Durchgangsloch im Casing ist 10 mm lang, während das Sackloch im Instrumentierungsring eine Gewindetiefe von 14 mm aufweist. Das ergibt eine maximale Schraubenlänge von 24 mm, wobei die Mindesteinschraubtiefe 9,6 mm beträgt. Angezogen wird wieder über Kreuz mit 25 Nm Anziehdrehmoment. Die montierten Komponenten sind in verschiedenen Montagestadien in Abbildung 3.52 dargestellt.

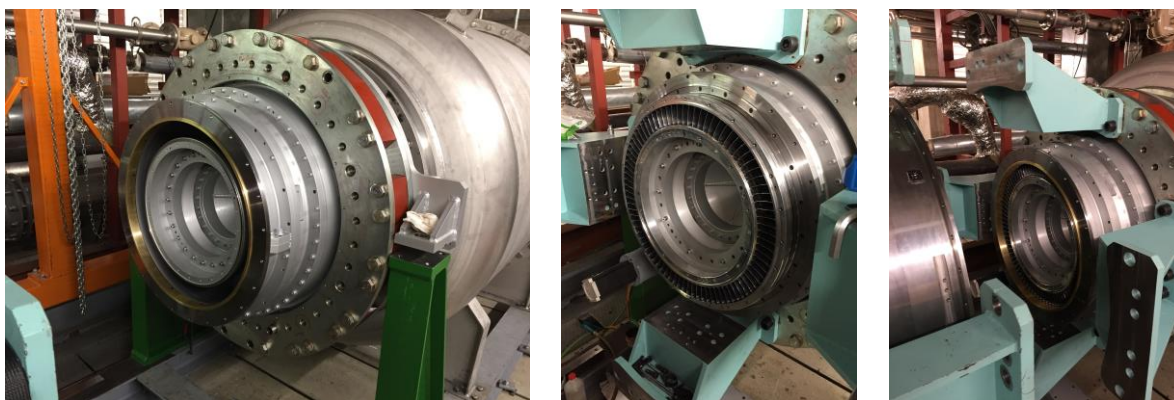


Abbildung 3.52: Fotoaufnahmen von der teilweise montierten Einlaufbaugruppe ohne IGVs (links) und mit IGVs (mittig) sowie von der komplett montierten Einlaufbaugruppe (rechts).

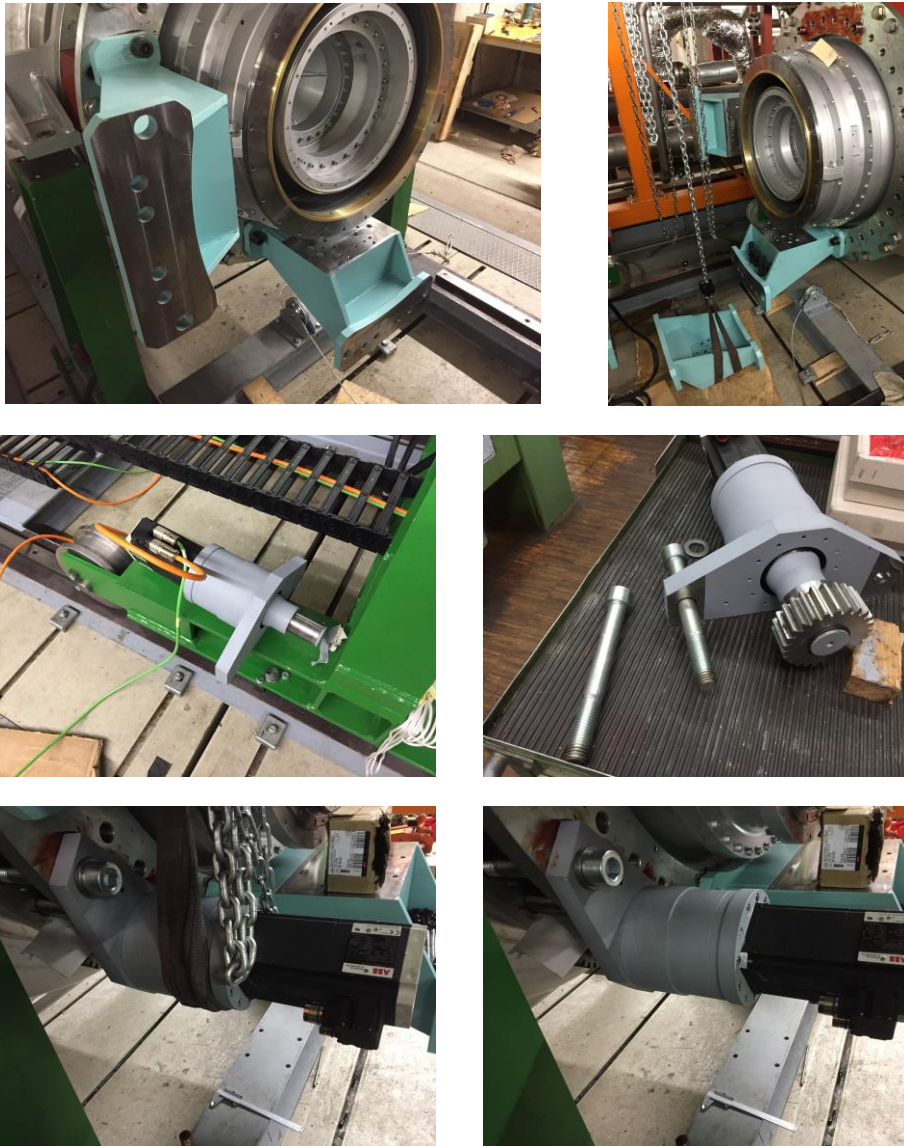


Abbildung 3.53: Fotostrecke verschiedener Montagestadien der Fwd-Beams und des Fwd-Traversiermotors.

3.2.4.2 Spaltkontrolle und Schließen des Prüfstandes

Ebenso wie bei der im Unterabschnitt 3.2.3.3 beschriebenen Spaltkontrolle des Bwd-Rigs muss auch hier beim Fwd-Rig eine Spaltkontrolle erfolgen. An dieser Stelle sei als hinzukommender erschwerender Faktor jedoch angemerkt, dass der Einlaufbereich und der Mittelteil ab sofort nicht mehr unabhängig voneinander sind. Daraus lassen sich zwei Schlussfolgerungen ziehen. Zum einen muss die Spaltkontrolle im Fwd-Rig in permanentem Wechselspiel mit der Prüfstandsausrichtung erfolgen, welche der Form und Übersichtlichkeit halber in einem eigenen Abschnitt 3.2.5 beschrieben wird. Zum anderen haben Spaltänderungen nun sowohl Auswirkungen auf den Einlaufbereich als auch auf die Teilungsebene hin zum Mittelteil, welcher mit der TCF-Baugruppe beginnt.

Bei den im 2D-Schnittbild in Abbildung 3.54 markierten Kontrollpunkten handelt es sich konkret um folgende Kaltspalte unter zusätzlicher Angabe der entsprechenden Sollwerte:

1. Axialspalt zwischen dem äußeren Einlaufgehäuse und dem äußeren Mittelstück (einstellbar)

2. Axialspalt zwischen dem inneren Mittelstück und dem inneren Statorring (einstellbar)
3. Axialspalt zwischen dem äußeren Statorring und den IGVs (1 mm)
4. Axialspalt zwischen den IGVs und dem statischen Rotorersatz (3,6 mm)
5. Axialspalt zwischen den IGVs und dem Anstreifbelag vom Rotorcasing (0,4 mm)
6. Axialspalt zwischen dem Fwd-Instrumentierungsring und dem TCF (1 mm)

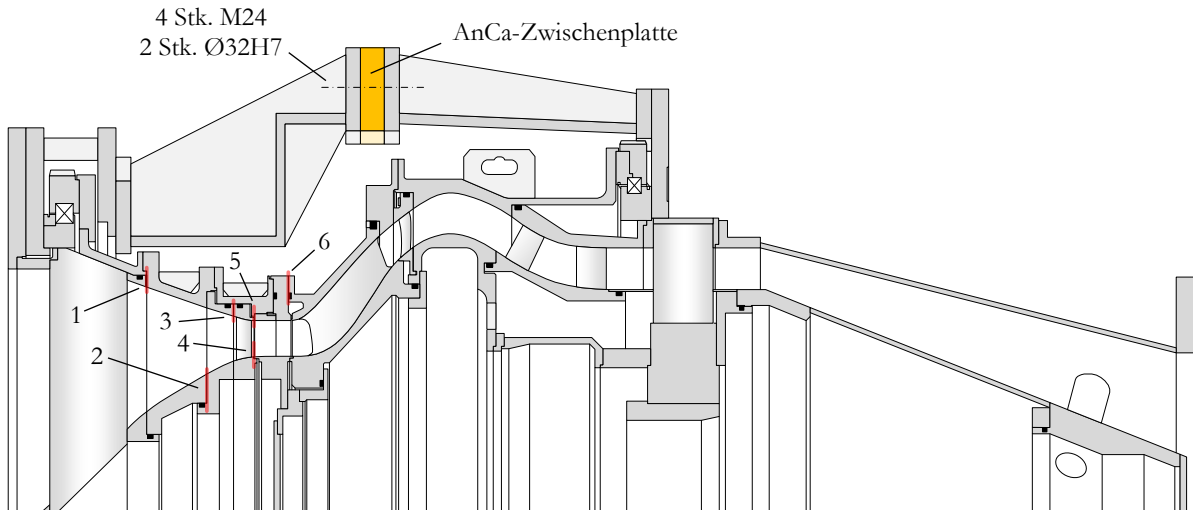


Abbildung 3.54: Wichtige Spaltkontrollpunkte am Forward-Rig und Schließen des Prüfstandes.

Die Sollwerte für die Axialspalte 3 bis 6 sind aufgrund der zu erwartenden thermischen Ausdehnung im Anlagenbetrieb festgelegt. Um diese erreichen zu können, stehen nun zwei einstellbare Axialspalte zur Verfügung, wobei Spalt 1 für die äußere und Spalt 2 für die innere Ringraumkontur zuständig ist.

Der Einsatz von gleichmäßig über den Umfang punktgeschweißten Fühlerlehrenbändern im oberen Axialspalt ist in Abbildung 3.55 schematisch dargestellt. Während sich die Spalte 5 und 6 verkleinern, vergrößert sich Spalt 3.

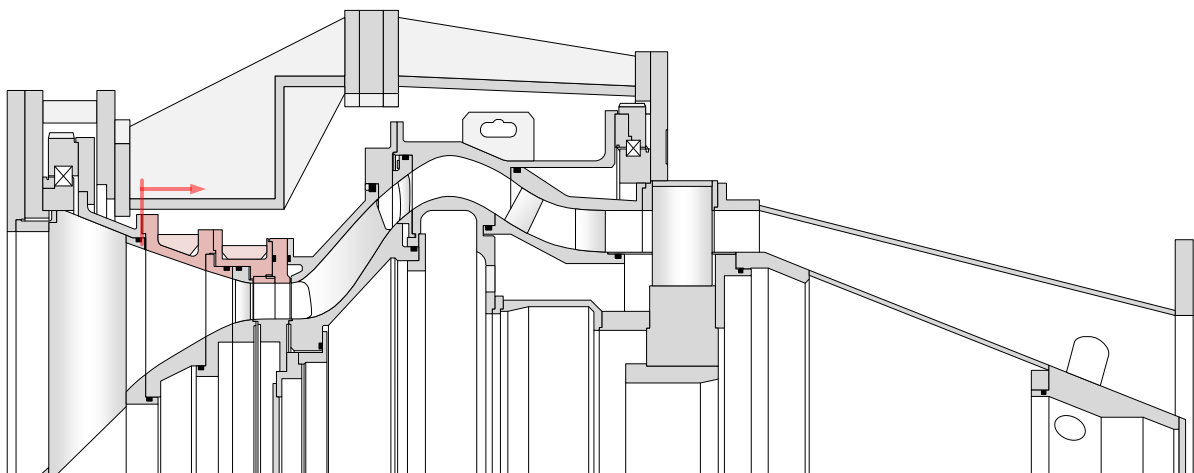


Abbildung 3.55: Fwd-Spaltmanipulation Fall 1 (Außenkontur): Anbringung von Fühlerlehrenbändern am äußeren Einlaufgehäuse.

Im zweiten Fall (siehe Abbildung 3.56) werden die Fühlerlehrenbänder an der Passfläche vom inneren Mittelstück angebracht und bewirken eine Spaltvergrößerung bei Spalt 3 und gleichzeitig eine Verkleinerung der Spalte 4 und 5.

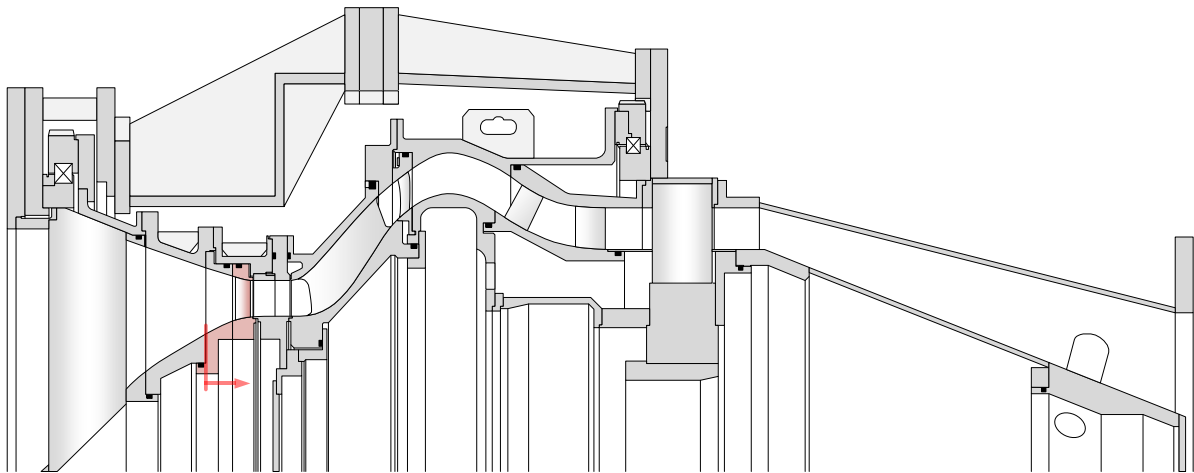


Abbildung 3.56: Fwd-Spaltmanipulation Fall 2 (Innenkontur): Anbringung von Fühlerlehrenbändern am inneren Mittelstück.

Zur Durchführung der Spaltkontrolle ist noch anzumerken, dass diese für den Spalt 5 im geöffneten Zustand erfolgt. Spalt 3 wird wieder rechnerisch analog zur Spaltkontrolle bei den LP Vanes durch vorangegangenes Messen des Spalts zwischen dem äußeren Statorring und dem Rotorcasing bzw. dem Anstreifbelag und durch Kenntnis der axialen Breite des äußeren IGV-Rings ermittelt. Die Spalte 4 und 6 können erst im sehr weit fortgeschrittenen Stadium der Prüfstandsausrichtung erfolgen, wobei bei Spalt 4 sowohl Rotorcasing als auch Instrumentieringring demontiert sind.

Sobald die Prüfstandsausrichtung und die Spaltkontrolle erfolgreich abgeschlossen sind, kann der Prüfstand in der Teilungsebene geschlossen werden. Dies erfolgt über Zwischenplatten, welche als Verbindungsstück zwischen den Fwd- und den Bwd-Beams fungieren (siehe Abbildung 3.54). Die Zentrierung und Verschraubung erfolgt auch hier komplett analog zu sämtlichen Beams und ihren Auflagern mit Hilfe von jeweils zwei für die Einheitsbohrung $\text{Ø}32\text{H}7$ geeigneten Passhülsen (z.B. $\text{Ø}32\text{m}6$) und sechs M24 8.8 Zylinderkopfschrauben. Die Schraubenlänge sollte bei Verwendung einer M24-Mutter und zwei dazu passenden Beilagscheiben zumindest 120 mm betragen



Abbildung 3.57: Geschlossener Prüfstand nach erfolgter Spaltkontrolle und Prüfstandsausrichtung.

3.2.5 Ausrichtung

Die Prüfstandsausrichtung gehört neben der Fundamentierung, dem Aufbau, der Inbetriebnahme und der Initialmessung eindeutig zu den Kernthemen der Erstinbetriebnahme eines Prüfstandes und darf hier natürlich nicht fehlen. Während der Entwicklungsphase wurde der Prüfstand nicht nur auf die Strömungsmechanik hin optimiert, sondern auch mechanisch auf anfallende statische und dynamische Lasten sowie auf thermisch bedingte Wärmeausdehnungen. Des Weiteren wurde auch auf die im Zuge der Prüfstandsausrichtung notwendigen Freiheitsgrade der drei unterschiedlichen Achsen Rücksicht genommen, welche ja letztendlich allesamt fluchten müssen.

Dabei wird die Ausrichtung in zwei Bereiche unterteilt, nämlich in die Grob- und Feinausrichtung. Während bei der Grobausrichtung eher qualitative Messmethoden (Augenmaß, Kreuzlinienlaser und teilweise Messschieber) eingesetzt werden und bei der Ausnutzung der Freiheitsgrade auf rustikalere Methoden (Vorschlaghammer, Hydraulischer Stempel, Stemmeisen mit großem Hebelarm) für die Überbrückung größerer Distanzen im Millimeterbereich zurückgegriffen wird, wird hingegen bei der Feinausrichtung nach deutlicher Reduktion der Freiheitsgrade auf ausschließlich quantitative Messmethoden (Messschieber und Messuhren) und (wenn möglich) auf sanftere Bewegungsmethoden gesetzt, da man hier nur noch einige 1/10 Millimeter vom endgültigen Fluchten der Achsen entfernt ist.

3.2.5.1 Grobausrichtung

In Abbildung 3.58 ist eine Fotoaufnahme des bereits fertig ausgerichteten und geschlossenen Prüfstandes dargestellt, in welcher die drei Achsen und die Positionen der verfügbaren Freiheitsgrade (halbseitig mit Blick von der Versuchswarte auf den Prüfstand) farblich gekennzeichnet und durchnummeriert sind.

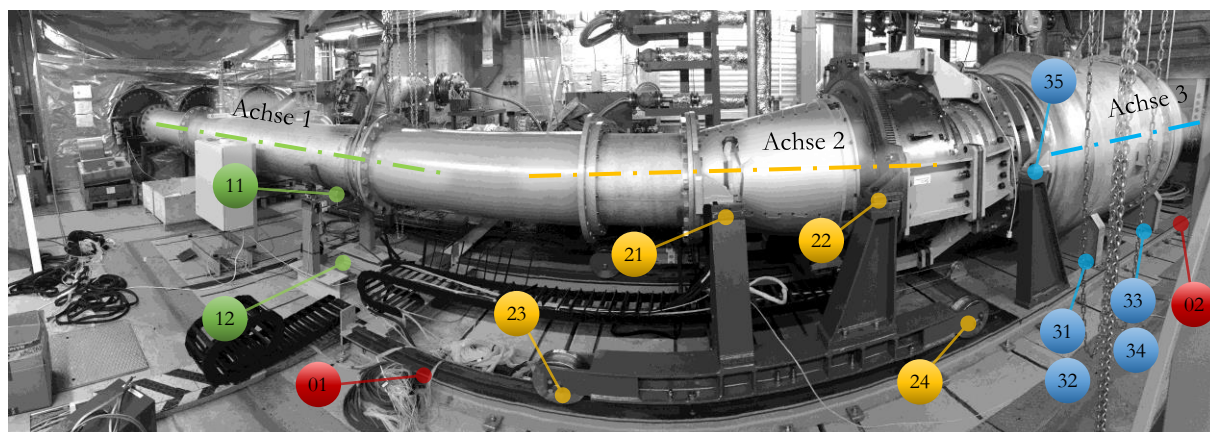


Abbildung 3.58: Fotoaufnahme des ausgerichteten und geschlossenen Prüfstandes mit farblicher Kennzeichnung der auszurichtenden Achsen und der hierfür zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade.

Daraus lässt sich nun ein auf die Ausrichtung bezogenes kinematisches Abstraktionsmodell des Prüfstandes ableiten, welches in Abbildung 3.59 dargestellt ist. Darin sind zur besseren Orientierung die wichtigsten Bereiche beschriftet und dieselben Nummerierungen wie oben mitsamt Richtungen der möglichen Freiheitsgrade für beide Symmetriehälften des Prüfstandes eingezeichnet. Die farbliche Kennzeichnung der Freiheitsgrade erfolgt für die Achse 1 vom Auslaufrohr in hellgrün, für Achse 2 von der Ringgitterkaskade in dunkelgelb und für die Einlaufachse 3 in hellblau.

Die Freiheitsgrade der anfangs noch lediglich mittels Halften gesicherten Längsträger vom gesamten Prüfstand (Achse 0) sind farblich mit dunkelrot dargestellt. Zusätzlich sind die drei Drehpunkte der Achsen ebenfalls zur besseren Übersicht über die resultierenden Drehbewegungen von der jeweiligen betroffenen Achse abgehoben dargestellt.

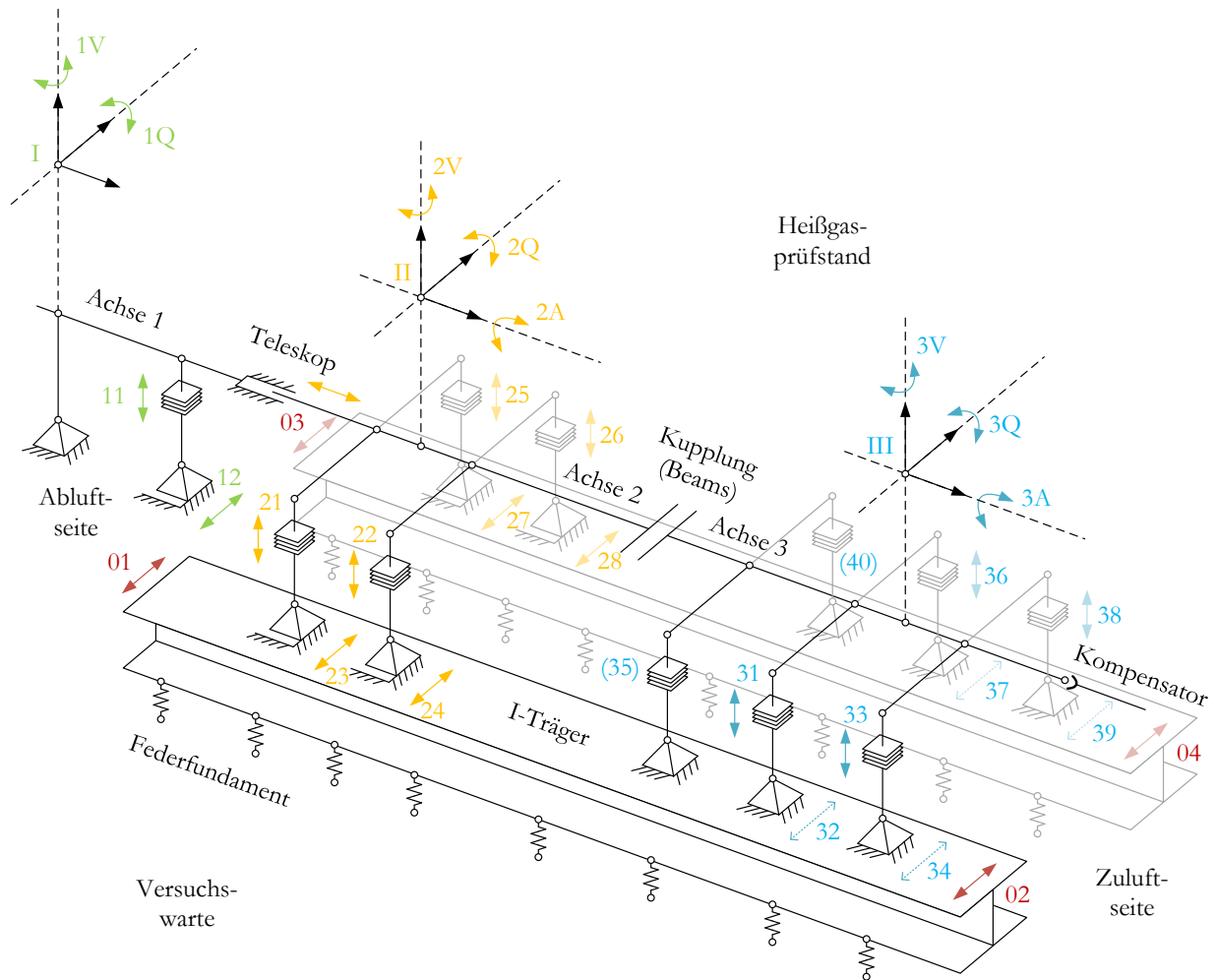


Abbildung 3.59: Kinematisches Abstraktionsmodell vom Prüfstand für die Grobausrichtung.

Das oben dargestellte Abstraktionsmodell gilt bereits für die Grobausrichtung und beinhaltet die wichtigsten Freiheitsgrade des Prüfstandes, welche für die Ausrichtung benötigt werden. Diese sollen nun vor der eigentlichen Beschreibung der Vorgangsweise bei der Ausrichtung für jede einzelne Achse sowohl separat als „Mikrobewegung“ als auch in Kombination zur Erzeugung einer „Makrobewegung“ um den jeweiligen Drehpunkt kurz erläutert werden.

Freiheitsgrade von Achse 0 (I-Profil-Stahl-Längsträger):

- (01) Querbewegung des hinteren Bereichs vom I-Träger bei gelösten Halften. Das Pendant zu diesem Freiheitsgrad am zweiten I-Träger ist der Freiheitsgrad (03).
- (02) Querbewegung des vorderen Bereichs vom I-Träger bei gelösten Halften. Das Pendant zu diesem Freiheitsgrad am zweiten I-Träger ist der Freiheitsgrad (04).

Bei gleichzeitiger Bewegung des Trägers an den Positionen (01) und (02) bzw. (03) und (04) in eine gemeinsame Richtung (entweder hin zur Versuchswarte oder von dieser weg) wird eine homogene Querverschiebung des Trägers erzeugt, wobei die Bauchbildung in Trägermitte aufgrund der großen Länge nachträglich auszugleichen ist, während

eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung eine Rotation um den Drehpunkt auslöst, welcher sich exakt in der Mitte des Trägers befindet.

Freiheitsgrade von Achse 1 (Abluftrohr):

- (11) Vertikale Aufwärtsbewegung des Abluftrohres durch Einlegen von Auflagebacken in gewünschter Stärke in die vordere Rohrabstützung bzw. Abwärtsbewegung durch Entfernung oder Abschleifen von Backen.
- (12) Seitliche Querbewegung des Abluftrohres durch Verschiebung der vorderen Rohrabstützung.

Die vordere Rohrabstützung bildet aufgrund der temporär zugelassenen Freiheitsgrade das Loslager, während die hintere Rohrabstützung das Festlager bildet, welches zugleich als Fix- bzw. Drehpunkt I des Abluftrohres dient. Die Ausnutzung des Freiheitsgrades (11) führt zu einer Drehbewegung 1Q um die Querachse dieses Punktes, wohingegen eine seitliche Verschiebung der vorderen Rohrabstützung (12) zu einer Rotation 1V um dessen Vertikalachse führt.

Freiheitsgrade von Achse 2 (Ringgitterkaskade):

- (21) Vertikale Auf- bzw. Abwärtsbewegung beim Bwd-ALF-90°-Auflagebacken durch Einsatz von Fühlerlehrenbändern bzw. durch Einschleifen des Auflageklotzes. Das spiegelbildliche Gegenstück hierfür ist der Freiheitsgrad (25) beim Bwd-ALF-270°-Auflageklotz auf der dem Heißgasprüfstand zugewandten Seite.
- (22) Vertikale Auf- bzw. Abwärtsbewegung beim Fwd-ALF-90°-Auflageklotz analog zu (21). Das zugehörige Pendant auf der anderen Seite des Prüfstands ist der Fwd-ALF-270°-Auflageklotz (26).
- (23) Seitliche Querbewegung der hinteren Rahmenhälfte unter Ausnutzung des Spiels zwischen den am I-Träger angeschweißten Laufschiene und den Rollen des beweglichen Rahmens. Dieser Freiheitsgrad kann aufgrund des steifen Rahmens nur in Kombination mit seinem Gegenstück (27) auf der anderen Seite genutzt werden.
- (24) Seitliche Querbewegung der vorderen Rahmenhälfte analog zu (23). Auch dieser Freiheitsgrad steht nur in Kombination mit seinem Pendant (28) zur Verfügung.

Eine gemeinsame Ausnutzung der Freiheitsgrade (21) und (22) sowie (25) und (26) in derselben Richtung führt zu einer homogenen Auf- bzw. Abwärtsbewegung der Ringgitterkaskade, während die ebenfalls in derselben Richtung gleichzeitige Verwendung der Freiheitsgrade (23) und (24) sowie (27) und (28) zur einer homogenen Querbewegung führt. Eine gemeinsame Auf- bzw. Abwärtsbewegung bei (21) und (25) bzw. bei (22) und (26) führt zu einer Rotation 2Q in einem resultierenden „Neigungswinkel“ um die Querachse des stationären Drehpunktes II, welcher sich in der Mitte zwischen den vorderen und hinteren Auflageklötzen befindet. Eine gemeinsame Auf- bzw. Abwärtsbewegung bei (21) und (22) bzw. bei (25) und (26) hingegen bewirkt eine Rotation 2A um die Hauptachse der Ringgitterkaskade. Und schlussendlich erzeugt eine Bewegung des hinteren Paares (23) und (27) sowie des vorderen Paares (24) und (28) in entgegengesetzter Richtung eine Rotation 2V um die Vertikalachse des Fixpunktes in einem gewissen Gierwinkel.

Freiheitsgrade von Achse 3 (Einlaufkessel):

- (31) Auf- bzw. Abwärtsbewegung des Bwd-ALF-67,5°-Kesselfußes durch Einlegen bzw. Entfernen von Fühlerlehrenbändern. Das Gegenstück hierfür auf der anderen Seite liegt beim Bwd-ALF-225°-Kesselfuß (36).
- (32) Seitliche Querbewegung des Bwd-ALF-67,5°-Kesselfußes über das entsprechend zugelassene Lochspiel in der Schraubverbindung mit dem Längsträger. Das Pendant hierfür liegt beim Bwd-ALF-225°-Kesselfuß (37).
- (33) Auf- bzw. Abwärtsbewegung vom Fwd-ALF-67,5°-Kesselfuß analog zu (31) mit dem Gegenstück (38).
- (34) Seitliche Querbewegung vom Fwd-ALF-67,5°-Kesselfuß analog zu (32) mit dem Gegenstück (39).

(35) Auf- bzw. Abwärtsbewegung des AIDA-ALF-90°-Auflageklotzes durch das Einlegen von Fühlerlehrenbändern bzw. durch das Einschleifen vom Klotz. Das zugehörige Pendant auf der anderen Seite ist der AIDA-ALF-270°-Auflageklotz (40). Um eine Ausrichtung mit quasi sechs anstelle von vier Auflagern am Fwd-Rig und eine damit einhergehende hochgradige statische Unbestimmtheit gegenüber den theoretisch idealen drei Füßen zu vermeiden, müssen diese beiden Klötze zumindest nicht unbedingt während der groben Prüfstandsausrichtung verwendet werden, da die Verschraubung des Fwd-Rigs mit dem Flansch am Einlaufkessel mit genügend großer Sicherheit ausgelegt ist. Die Verwendung der Klötze bereits während der Ausrichtung wird jedoch empfohlen, da es ohne sie durch das große Gewicht des Fwd-Rigs auf kurzem Raum im Vergleich zum über eine große Länge verteilten Kesselgewicht zu einer ungünstigen Gewichtsverteilung ab dem Kompensator und einer daraus resultierenden extremen Belastung der Bwd-Kesselfüße bei gleichzeitig nahezu kompletter Druckentlastung der vorderen Füße bis hin zum Abheben führt. Abgesehen davon müssen die Klötze sowieso spätestens vor der Inbetriebnahme auf die richtige Höhe eingeschliffen werden, da auch hier wie bei den vier Füßen auf dem beweglichen Rahmen der Ringgitterkaskade jeweils eine quer in die entsprechende Nut eingeführte Passfeder als thermische Zentrierung dient und somit einen thermischen Fixpunkt für axiale Wärmeausdehnungen in diesem Bereich erzeugt.

Die Lage vom Drehpunkt III hängt davon ab, ob die beiden Auflageklötze (35) und (40) im Bereich des Fwd-Rigs bereits während der Grobausrichtung verwendet werden oder nicht. Falls ja (empfohlen), dann wird sich der Drehpunkt auf axialer Höhe der Bwd-Kesselfüße (31) und (36) einstellen, ansonsten wird dessen Lage in der Mitte zwischen den vorderen und hinteren Kesselfüßen angenommen, obwohl dies nur eine vereinfachende Annahme darstellt. Analog zu den bereits für die Achsen 1 und 2 beschriebenen Bewegungsmöglichkeiten sind auch hier bei der Achse 3 durch Kombination verschiedener Freiheitsgrade untereinander in begrenztem Maße Rotationen um die Querachse 3Q (Neigung), die Vertikalachse 3V (Gieren) und die Hauptachse 3A infolge der Ankopplung des Einlaufkessels an die Zuluftleitung über einen s.g. Kompensator möglich. Von diesen sollte jedoch nur bei der anfänglichen Justierung des Kessels in Richtung Abluftleitung Gebrauch gemacht werden, da die Einlaufachse 3 aufgrund der Tatsache, dass die Anschlusspunkte von Zu- und Abluftleitung prinzipiell dieselbe Achse haben, als konstanter Ausgangspunkt für die Prüfstandsausrichtung dienen sollte.

Die Ringgitterkaskade wird in einer Versuchshalle mit dauerhaftem Federfundament aufgebaut, d.h. sie steht auf einem Fundament aus Beton, welches über eine Vielzahl von linienförmig angeordneten Schraubenfedern mit dem statischen Fundament verbunden ist. Die Federkennlinie von Schraubenfedern hat im Normalfall einen linearen Verlauf, dessen Gradient Aufschluss darüber gibt, ob es sich um eine steife bzw. weiche Feder handelt. Durch Änderung der Geometrie (z.B. unterschiedliche Durchmesser) oder den Einsatz von Hilfsfedern kann diese Kennlinie jedoch auch progressiv realisiert werden. Das AnCa-Fundament weist eine flache lineare Federkennlinie auf und wird somit als weich eingestuft. Dieser Umstand kommt jedoch erst bei der Feinausrichtung in Unterabschnitt 3.2.5.2 zum Tragen.

Folgende Ziele werden nun mit der Grobausrichtung des Prüfstandes verfolgt:

1. Beseitigung des Kippfußes nach Unterabschnitt 2.1.3.1 sowohl bei den vier Auflageklötzen der Ringgitterkaskade als auch bei den vier bzw. sechs Auflagern des Einlaufkessels. Dadurch wird auch automatisch der Winkelversatz bezogen auf die seitliche Querachse Q (Neigung) beseitigt.
2. Horizontale Parallelausrichtung aller drei Achsen auf die Hauptachse der Anschlusspunkte von Zu- und Abluftleitung mit Hilfe der Bohrbilder von den insgesamt acht Passbohrungen an den Bwd- und Fwd-Beams

(vier Beam-Paare zu je zwei Passbohrungen) sowie anhand der Beam-Passflächen. Dadurch werden in der Horizontalebene sowohl Parallel- als auch Winkelversatz (Gieren) beseitigt.

3. Schweißvorbereitung für das Verschweißen der zuvor ebenfalls korrekt auf die Hauptanschlussachse ausgerichteten Längsträger über in definierten axialen Abständen zueinander angeordneten Querträgern.

Letztendlich soll sich der Gesamtzustand des Prüfstandes nach der Grobausrichtung so darstellen, dass die von den Achsen A und Q jeweils aufgespannten Ebenen der drei Baugruppen komplett parallel zur Horizontalebene verlaufen und alle Achsen A parallel zu jener von Zu- und Abluftleitung verlaufen.

Begonnen wird nun mit der Kippfußbeseitigung an den vier Füßen (31), (33), (36) und (38) des Einlaufkessels. Durch das große Gewicht des Fwd-Rigs müssen hierfür i.d.R. die beiden Bwd-Kesselfüße bei ALF-67,5° und ALF-225° mit Fühlerlehrenbändern bzw. Metallplättchen unterlegt werden, um diese anzuheben. Sobald mittels Messschieber kein Kippfuß mehr festgestellt werden kann, werden die beiden Konsolen auf den Längsträgern direkt unter den Auflagen (35) und (40) der AIDA-Drehvorrichtung platziert und der noch verbliebene Höhenunterschied ermittelt. Die Differenz zu den entsprechend höheren Auflageklötzen muss an diesen nun abgefräst werden, wobei sämtliche Auflageflächen vor der Montage bearbeitet werden müssen. Diese erfolgt durch Anheben des Fwd-Rigs nach dem Lösen der Schraubenverbindung zum Flansch des Einlaufkessels und anschließendem Einlegen der Auflageklötze. Nach dem Absenken des Fwd-Rigs auf die beiden Auflageklötze der Konsolen und erneuter Verschraubung mit dem Kesselflansch ist bei allen sechs Füßen eine neuerliche Kippfußbestimmung notwendig. Sobald dieser messtechnisch nicht mehr bestimmt werden kann, verläuft die von den Achsen 3A und 3Q aufgespannte Ebene horizontal, was zusätzlich mittels Wasserwaage am Einlaufkessel verifiziert werden sollte.

Als nächstes erfolgt die Kippfußbeseitigung an den vier Konsolen (21), (22), (25) und (26) des beweglichen Rahmens, welcher das Auflager für den Auslaufbereich und den Mittelteil der Ringgitterkaskade bildet. Auch hier werden Messschieber und Wasserwaage als Hilfsmittel herangezogen. Da alle vier Auflageklötze momentan noch unbearbeitet sind, können prinzipiell mehrere Szenarien auftreten, wobei der Lösungsvorgang an sich immer dieselbe ist. Mittels Wasserwaage wird beispielsweise eine Neigung um die Achse 2Q festgestellt. Daraus kann nun abgeleitet werden, wo mit der Kippfußbestimmung begonnen werden muss (entweder vorne oder hinten). Mit Hilfe des Messschiebers und durch iteratives Ausprobieren wird nach dem Lösen der Verschraubung an den betroffenen Auflageklötzen die notwendige zu unterlegende Menge an Fühlerlehrenbändern (z.B. $1 \times 1 + 1 \times 0,5 + 2 \times 0,2 = 1,9$ mm) bestimmt. Wenn die Wasserwaage nach erneuter Verschraubung sowohl entlang der Achse 2A als auch entlang der Achse 2Q keinen Versatz mehr anzeigt, weiß man in diesem beispielhaften Szenario, dass die durch die eingelegten Plättchen erzeugte Höhendifferenz an den unberührten Klötzen abgefräst werden muss. Letztendlich müssen jedoch auch hier sämtliche Auflageflächen bearbeitet sein. Dieser gemeinsame Offset ist beim Abfräsen der Oberflächen zu berücksichtigen.

An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass der Prüfstand während der Ausrichtung zwar geöffnet ist, das Teleskopinnenrohr des Auslaufbereichs hingegen aber bereits in das Teleskopaußenrohr der Abluftleitung eingeführt ist. D.h. sämtliche Lageänderungen der Achse 2 müssen aufgrund des kleinen radialen Spiels zwischen dem Außenrohr bzw. der Air Seal und dem Innenrohr nahezu synchron mit Lageänderungen der Abluftachse 1 erfolgen. Vor allem während der Grobausrichtung macht es daher durchaus Sinn, das Abluftrohr mit dem Drehkran zu sichern, um somit einfach und schnell über die Freiheitsgrade (11) und (12) reagieren zu können.

Nachdem nun alle Kippfüße beseitigt sind, müssen zunächst allen voran die beiden I-Profil-Längsträger, welche als Auflager für den Einlaufkessel und die Ringgitterkaskade dienen, auf die Anschlussachse von Zu- und Abluftleitung ausgerichtet werden, d.h. die beiden Träger sollten überall den gleichen Abstand voneinander haben (= Parallelität) und die Hauptanschlussachse sollte genau in deren Mitte liegen (Deckungsgleichheit in der von den Achsen A und V aufgespannten Ebene).

Hierfür eignet sich ein handelsüblicher Kreuzlinienlaser hervorragend als qualitatives Hilfsmittel. Dieser wird am Geländer auf der Brücke der Versuchshalle angebracht und auf den hintersten Punkt des Abluftrohres auf ALF-0° ausgerichtet (siehe Abbildung 3.60). Dass der Laser sich sehr gut für diese Aufgabe eignet, liegt einerseits an seiner Selbstnivellierung innerhalb von kleinen Winkelbereichen und andererseits an der großen axialen Erstreckung des Prüfstandes. Sowohl die Komponenten Einlaufkessel und Fwd-Rig von Achse 3 als auch der Mittelteil und Auslaufbereich von Achse 2 sowie das Abluftrohr von Achse 1 weisen allesamt eine Mindestlänge von ca. 5m auf. Wenn nun z.B. in der Horizontalebene ein Achsversatz von 0,8 mm in einem Abstand von 0,5 m vorliegt, so ergibt sich ein Achsversatz von bereits 8 mm in einem Abstand von 5 m. Ein derartiger Versatz kann auch bei einer Genauigkeitsabweichung von 0,8 mm/m zumindest tendenziell gut erkannt werden. Darauf aufbauende Korrekturen der Achsen müssen anschließend sowieso iterativ erfolgen.

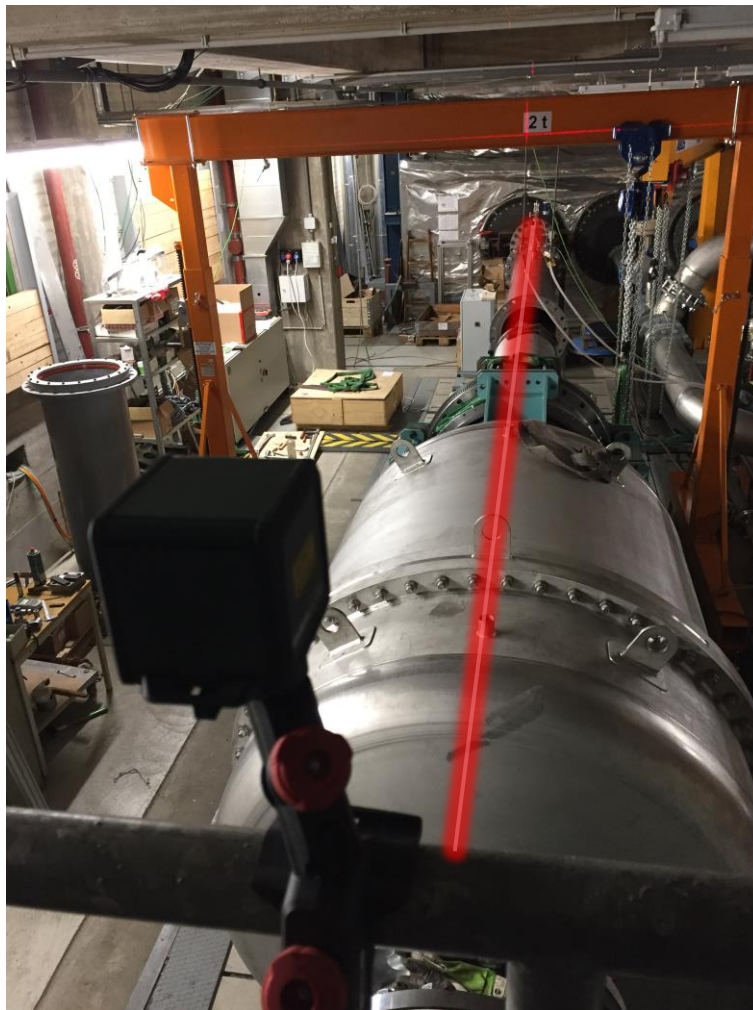


Abbildung 3.60: Qualitative Achsenausrichtung mit Hilfe eines handelsüblichen Kreuzlinienlasers (Nivellierung: $\pm 4^\circ$, Abweichung: 0,8 mm/m).

Im schlimmsten Fall muss von allen Freiheitsgraden in der Querrichtung Gebrauch gemacht werden, konkret ist dabei die Rede von (01), (02), (03), (04), (12), (23), (24), (27), (28), (32), (34), (37) und (39). Vor allem ein seitlicher Versatz der Längsträger über die Freiheitsgrade (01) bis (04) ist alles andere als trivial, da hier auf einmal nicht beliebig große Sprünge möglich sind. Wenn z.B. die Halben des Trägers auf der Seite vom Heißgasprüfstand gelöst werden und mittels eines am anderen Träger abgestützten Hydraulikstempels die Bewegungen (03) und (04) ausgelöst werden, dann wird automatisch das Lochspiel der (zuvor zumindest einseitig zu lösenden) sechs Verschraubungen vom Einlaufkessel sowie das Querspiel zwischen den Rollen vom beweglichen Rahmen und der an den Längsträgern angeschweißten Laufschienen sehr schnell aufgebraucht. Wenn danach immer noch eine Querbewegung des Längsträgers notwendig sein sollte, dann müssen die Komponenten von Achse 2 und 3 zunächst einmal „nachrücken“, bevor die Prozedur von neuem beginnen kann.

Sobald sich die Längsträger in der gewünschten Position befinden und keine gravierenden Achsversätze mehr festgestellt werden können, dann kann es aufgrund des Rollenspiels und einem gewissen Spiel in den Verschraubungen natürlich sein, dass es in der Horizontalebene immer noch einen Winkelversatz zwischen Achse 2 und 3 gibt. Als Bewertungskriterium hierfür wird bei der Grobausrichtung das Bohrbild der Bwd- und Fwd-Beams herangezogen (siehe Abbildung 3.61), genauer jenes der insgesamt acht Passbohrungen (zwei pro Beam-Paarung). Diese sind aufgrund ihres kleinen Passhülsen-Spiels von ca. 1/100 mm, der einfachen Zugänglichkeit und der ausreichend guten Vermessbarkeit hervorragend als Bezugspunkt für die Prüfstandsausrichtung geeignet.

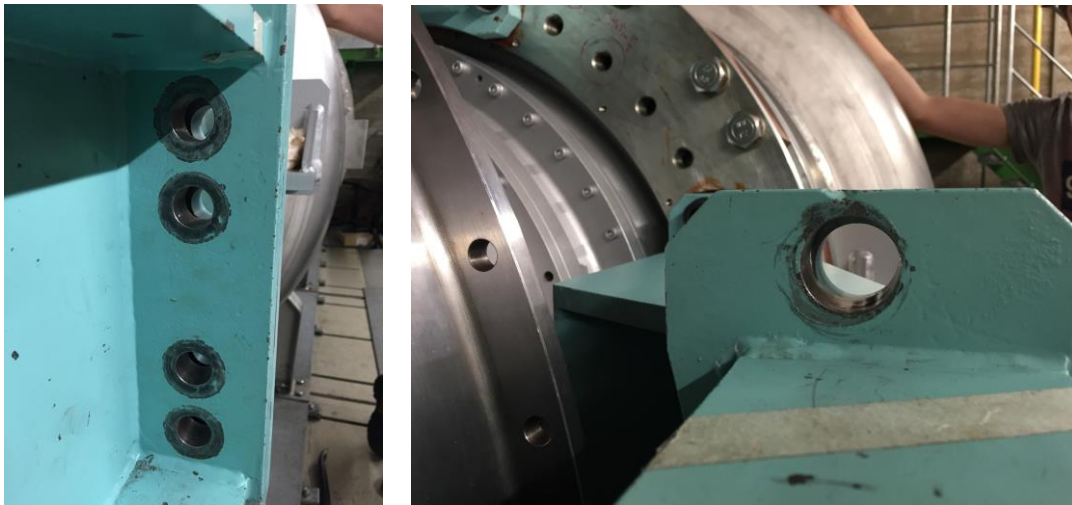


Abbildung 3.61: Fotoaufnahmen vom deutlich zu erkennenden Winkel- und Parallelversatz zwischen Bwd- und Fwd-Beams auf ALF-90° im Zuge der Grobausrichtung.

Aufgrund der Tatsache, dass sowohl der Ursprung als auch der weitere sequentielle Aufbau sämtlicher Beams und der Ringraumkontur bildenden Komponenten aus bearbeiteten Passflächen besteht, ist davon auszugehen, dass die im Zuge der Montage dieser abnahmegeprüften Bauteile entstandene Toleranzkette in einem Bereich liegt, in dem eine Ausrichtung mittels der Beams gleichzeitig eine Ausrichtung der Ringraumkontur bedingt und vice versa.

Als Beispiel hierfür soll ein von der obigen Fotoaufnahme abgeleitetes Abstraktionsmodell in Abbildung 3.62 für die beiden Beam-Paarungen auf ALF-90° und ALF-270° dienen, welches auf der linken Seite einen möglichen Ist-Zustand, bestehend aus einem Winkelversatz und einem Parallelversatz in der Horizontalebene sowie einem Parallelversatz in der Vertikalebene, und auf der rechten Seite den angestrebten Soll-Zustand zeigt. Die notwendigen Korrekturen für

den Winkelversatz werden aus den mittels Messschieber bestimmten unterschiedlichen axialen Abständen zwischen den Beams ermittelt, wohingegen ein Parallelversatz zwischen zwei Bohrungen am besten zuerst mittels Anreißnadel auf der in die Bohrung stehenden Passfläche markiert und erst danach gemessen wird. Die notwendigen Korrekturen für die Erreichung des Soll-Zustandes werden anhand der Freiheitsgrade (23), (24), (27) und (28) zum Beispiel mit Hilfe eines Stemmeisens oder eines Vorschlaghammers erzielt.

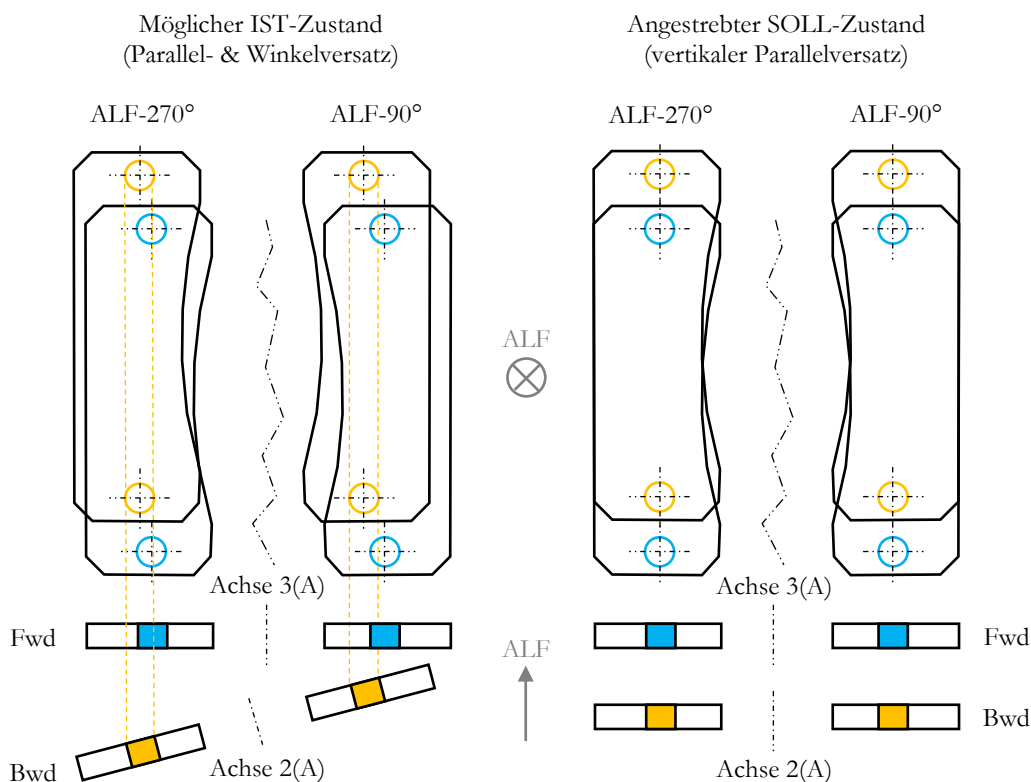


Abbildung 3.62: Abstraktionsmodell für einen möglichen Ist-Zustand (links) und einen gewünschten Soll-Zustand (rechts) bei der Grobausrichtung von Bwd- und Fwd-Beams im Grund- und im Aufriss.

Der im angestrebten Soll-Zustand verbliebene vertikale Parallelversatz zwischen den von Haus aus mit einer größeren Höhe versehenen Auflageklötze vom Bwd-Rig gegenüber dem Fwd-Rig sollte mindestens 8 mm betragen, da die Auswirkungen des an die Grobausrichtung anschließenden Verschweißens der Längsträger miteinander über (zumindest) vier in definiertem axialen Abstand zueinander angeordnete Querträger nur erahnt werden können. Dies hat vor allem zwei Gründe. Zum einen handelt es sich hierbei nicht um eine bereits im Voraus penibel genau geplante Konstruktionsschweißung sondern um eine aus der zuvor durchgeführten Grobausrichtung des Prüfstandes resultierenden und auf die Erfahrung des Schweißers bauende improvisierte Fertigungsschweißung mit lokal eingebrachten Wärmeeinflusszonen (WEZ) innerhalb von zwei sehr langen I-Profil-Stahl-Längsträgern, welche im Zuge der Abkühlphase einen Schweißverzug unbekanntes Ausmaßes hervorrufen. Aus diesem Grund ist es notwendig, sich für die Feinausrichtung einen gewissen Handlungsspielraum offen zu lassen, um ein Fluchten der Achsen mechanisch zu ermöglichen, ohne u.U. gleich neue Auflageklötze aufgrund eines zu großen Verzugs anfertigen zu müssen.

3.2.5.2 Feinausrichtung

Nach erfolgreicher Verschweißung und damit einhergehender Lagefixierung der Längsträger erfolgt nun im idealen Fall bei geringem Schweißverzug eine deutliche Reduktion der notwendigen Freiheitsgrade (siehe Abbildung 3.63). Die Prüfstandsausrichtung kann demnach also durch Einschleifen der vier Auflageklötze (21), (22), (25) und (26) an den Konsolen des beweglichen Rahmens zur Überbrückung der noch ausständigen Höhendifferenz auf die Einlaufachse 3 und durch seitliche Korrektur des entstandenen Schweißverzuges mit Hilfe des Rollen-Schienen-Spiels bei (23), (24), (27) und (28) abgeschlossen werden.

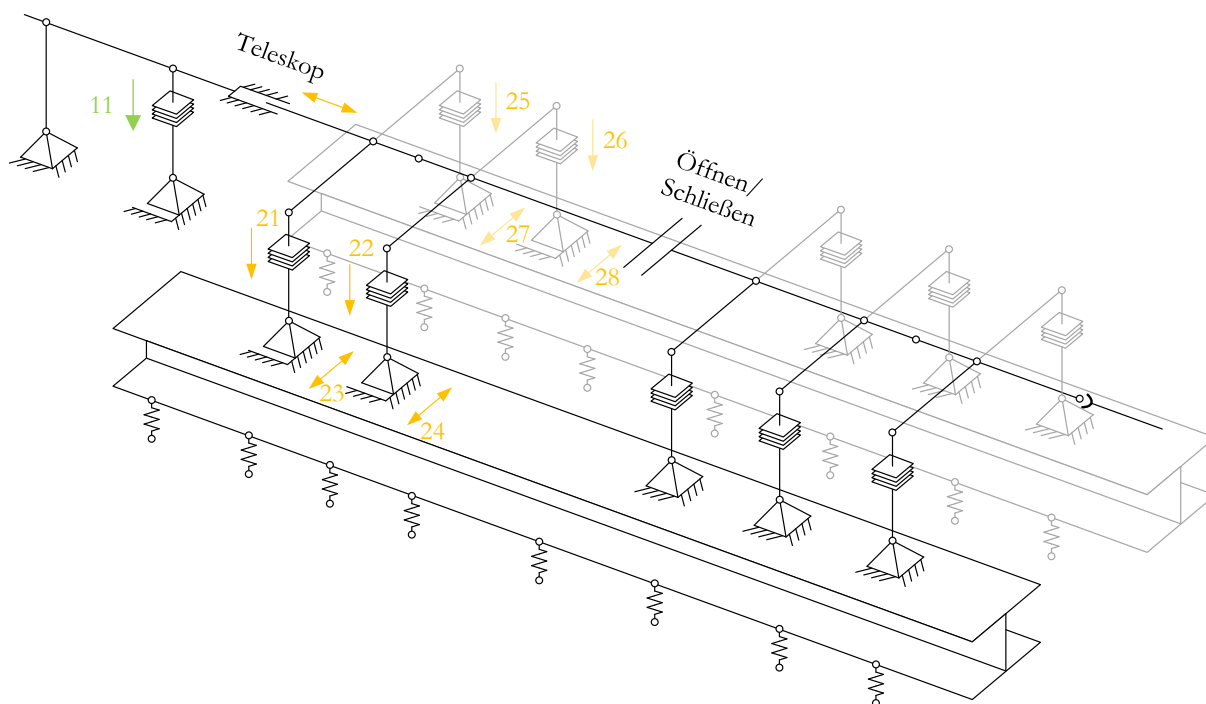


Abbildung 3.63: Kinematisches Abstraktionsmodell vom Prüfstand für die Feinausrichtung.

Diese Aufgabe erscheint zunächst einfach, aber es wird spätestens bei der Ausführung schnell klar, dass die Feinausrichtung die absolute Königsdisziplin des gesamten Prüfstandsbaus darstellt, denn im Gegensatz zur vorangegangenen Grobausrichtung werden hier deutlich höhere Maßstäbe sowohl an die Ermittlung der Ausrichtgrößen als auch an die daraus resultierenden Bauteilbewegungen angesetzt. Konkret wird hier also nach exakten Messwerten mit geringer Fehlertoleranz und nach einer Manipulation von großen Massen im 1/10 Millimeter Bereich verlangt.

Daraus folgt, dass ab sofort nur noch auf quantitative Messuhrenverfahren für die Bestimmung von Parallel- und Winkelversatz und der davon ableitbaren Fußkorrekturen zurückgegriffen werden kann. Spätestens hier kommt auch der flachen Federkennlinie des weichen Fundaments eine wichtige Rolle zu, da sie vor allem auf die Messwerte großen Einfluss nimmt. D.h. während des Einsatzes von Messuhren sollten sich keine unnötigen Massen und nur exakt zwei Personen für das Ablesen der Messwerte auf dem Federfundament aufhalten, eine auf der Seite des Heißgasprüfstandes und eine auf der Seite der Versuchswarte. Es hat sich nämlich gezeigt, dass bereits die Masse einer einzigen Person an einer ungünstigen Position Messabweichungen von einigen 1/10 Millimeter hervorrufen kann.

Eingesetzt werden das Doppelradialverfahren nach Unterabschnitt 2.1.3.2 zur Bestimmung der Fußkorrekturen am beweglichen Rahmen sowie das Radial-Axial-Verfahren nach Unterabschnitt 2.1.3.3 als Referenzmethode. In der nachfolgenden Abbildung 3.64 sind ein paar für den Einsatz von Messuhren geeignete Plan- und Rundflächen farblich hervorgehoben. Im rechten Bild ist eine axiale Abtastung der Stirn- bzw. Planfläche vom Aft Outer Casing zu sehen.

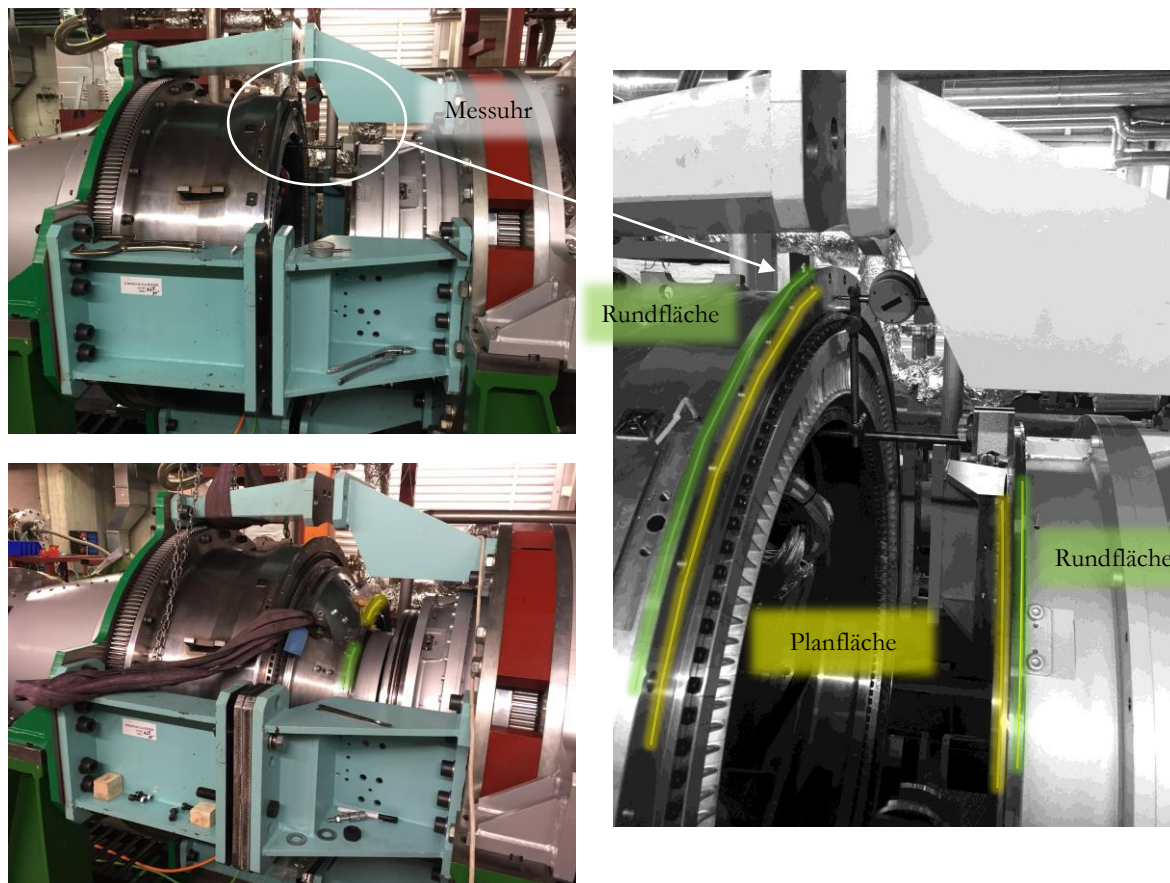


Abbildung 3.64: Fotoaufnahmen von der Feinausrichtung ohne TCF (links oben und rechts als Vergrößerung) und mit TCF (links unten) mit farblicher Hervorhebung von für Messuhren geeigneten Plan- und Rundflächen.

Natürlich können die Messuhrenverfahren zwischen verschiedenen Bauteilpaarungen von Bwd- und Fwd-Rig, wie z.B. Aft Outer Casing und Rotor Casing oder TCF und Fwd-Instrumentierungsring, durchgeführt werden. Wichtig dabei ist nur, dass es sich um bearbeitete Plan- bzw. Rundflächen handelt (lackierte Flächen zählen hier bspw. nicht dazu) und dass es sich immer um traversierbare Komponenten handelt, da die „Wellen“ beider Rigs während der Messung stets synchron zueinander drehen müssen, um den Einfluss von Oberflächenfehlern auszuschließen.

Nach erfolgreicher Bestimmung der notwendigen Fußkorrekturen in den Ebenen A-Q (horizontal) und A-V (vertikal) müssen vor allem die seitlichen Bewegungen des Rahmens mit viel Fingerspitzengefühl durchgeführt werden. Mittels Stemmeisen und Vorschlaghammer ist dies hier nur noch bedingt möglich, deshalb sollten die beiden Exzenter-Klemmvorrichtungen zwischen Rahmen und Schienen auf der zur Warte gewandten Seite des Prüfstandes für die Einstellung exakter Fußkorrekturen (mittels am I-Träger befestigter Messuhr in Echtzeit messbar) quasi missbraucht werden. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten, da ein zu großer Druck auf dem kleinen Rillenkugellager sehr schnell zum Bersten des äußeren Lagerringes führen kann. Nach Abschluss der Korrekturen und endgültiger Justierung des Abluftrohres ist der Prüfstandsaufbau abgeschlossen.

4 MESSTECHNIK

Dieses Kapitel umfasst die wichtigsten Aspekte der eingesetzten Messtechnik, wie den Sondenbau und deren Kalibrierung, die Instrumentierung und das Prinzip der Datenverarbeitung. Davon ausgenommen sind Elektroinstallationen, die Programmierung von virtuellen Instrumenten (VIs) in LabView zur Datenerfassung, Steuerung und Regelung und die Anpassung der Matlab-Auswertungsroutinen für die Messdaten.

4.1 SONDENBAU

4.1.1 Totaldruck- und Totaltemperatursonden

In diesem Abschnitt wird die Endfertigung der s.g. Rakes für die Ebenen A, B1, B0, B, C und D sowie für den Diffusor näher erläutert. Am AnCa-Prüfstand können lt. Unterabschnitt 4.3 insgesamt 16 Rakes instrumentiert werden. Diese sind in Abbildung 4.1 im mechanisch bereits endbearbeiteten Zustand mit zusätzlicher Kennzeichnung ihrer ID (in rot) bzw. ihres jeweiligen späteren Einsatzortes dargestellt (mehr als ein Rake pro ID = Reserve). Die Grundform der Rakes (Schaft und Kielköpfe) wurde nicht spanabhebend, sondern additiv mittels Metall 3D-Druck bzw. Selektivem Laserschmelzen (SLM) hergestellt. Da bei additiven Fertigungsverfahren noch keine hohen Oberflächengüten realisiert werden können, ist neben der Erweiterung der Grundform um Pitot-Rohre (Drucksonden) bzw. Thermoelement-Drähte (Temperatursonden) auch noch eine mechanische Nachbearbeitung notwendig. Die Gestalt der Sonden (Kielkopfabstände und deren Ausrichtung, etc.) wurde auf Basis von CFD-Simulationen und Erfahrung konzipiert.

Die Bezeichnung Rake wird wörtlich mit „Rechen“ übersetzt und wird z.B. für Sonden verwendet, welche aus einem Schaft bestehen, der in eine Strömung eingetaucht wird und auf dem in einem definierten Abstand zueinander mehrere Kielköpfe nach Unterkapitel 2.3 mit integrierten Pitot-Druckröhrchen oder Thermoelementdrähten angeordnet sind, welche eine von der Anzahl der Sonden abhängige radiale Auflösung der Totaldruck- bzw. Totaltemperaturverteilung innerhalb einer definierten Messebene im Ringraum einer Turbomaschine ermöglichen. Derartige Sonden werden im deutschen Sprachraum üblicherweise als s.g. „Kammsonden“ bezeichnet.²⁷

Ein wichtiger Bestandteil der mechanischen Endbearbeitung ist die Gewährleistung der gewünschten Funktionalität eben dieser Kielköpfe. Zum einen müssen die seitlichen Bohrungen hinter den Sonden bzw. unmittelbar vor dem Schaftbeginn fertiggestellt werden, welche im Betrieb zwar kleine Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Kopfes und damit minimale Messabweichungen zulassen, dadurch jedoch die Reaktionszeit unmittelbar nach einer Laständerung bzw. Rig-Traversierung gegenüber einem trägen System mit vollständiger Stagnation des Fluids deutlich erhöhen. Zum anderen bestimmt die Güte und der Winkel der Anfasung an der Eintrittskante in den Kielkopf letztlich die Unempfindlichkeit der Sonde gegenüber dem Anströmwinkel.

²⁷ Vgl. Arts, Boerrigter, Carbanaro, Van den Braembussche (1994), S. 58ff.

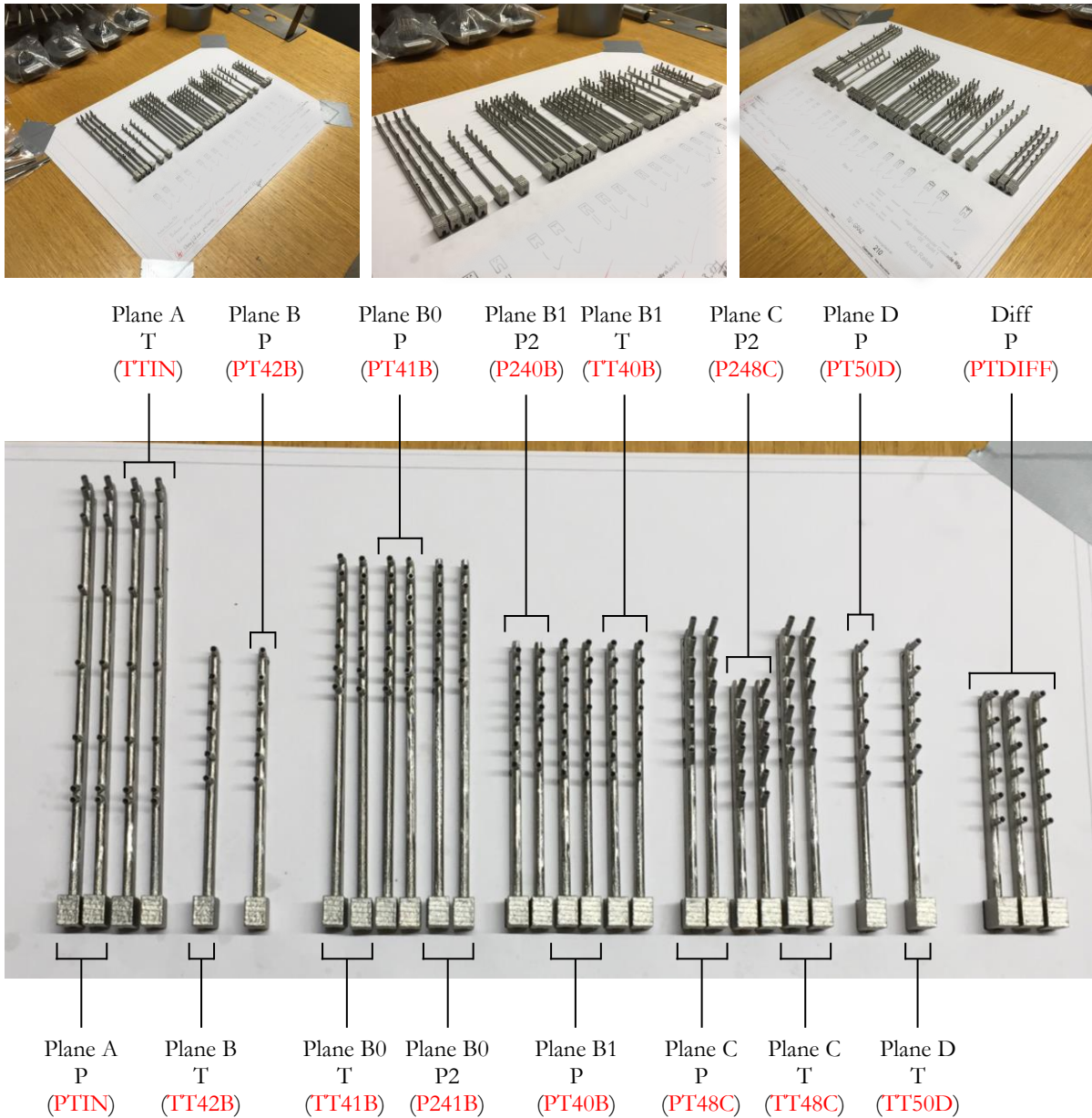


Abbildung 4.1: Fotoaufnahmen der Totaldruck- und Totaltemperaturrekes im mechanisch endbearbeiteten Zustand mit Kennzeichnung ihrer ID (in rot) und ihres jeweiligen Einsatzgebiets am Prüfstand.

Die mechanische Endbearbeitung lässt sich nun in die nachfolgenden fünf Teilarbeitspakete unterteilen:

1. Seitliche Bohrungen je Kielkopf mit einem Durchmesser von $\varnothing 1$ mm bei allen Rakes fertigstellen.
2. Axiale Schaftbohrung je Kielkopf mit $\varnothing 0,8$ mm für alle Druckrakes fertigstellen.
3. Axiale Schaftbohrung je Kielkopf mit $\varnothing 0,6$ mm für alle Temperaturrekes fertigstellen.
4. Eintrittskante je Kielkopf in einem 60° Winkel anfasen.
5. Vom strömenden Fluid im Betrieb benetzte Rake-Oberflächen schleifen und polieren.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Genauigkeit empfiehlt es sich für die Teilaufgaben 1 bis 4 ein Multifunktionswerkzeug (z.B. von Dremel oder Proxxon) einzusetzen und die Rakes während der Bearbeitung je nach benötigter Lage in einem Schraubstock mit (weichen) Aluminiumleisten einzuspannen (siehe Abbildung 4.2). Um später die Pitot-Röhrchen bzw. die TC-Drähte innerhalb des Kielkopfes mittig zentrieren zu können, müssen vor allem die angegebenen Lochdurchmesser bei 2 und 3 möglichst exakt eingehalten werden, um deren Funktion als Führung

gewährleisten zu können. Für Aufgabe 4 wird der Einsatz einer biegsamen Welle in Kombination mit einem 60°-Flammenfräser empfohlen (siehe Abbildung 4.2 rechts) und bei 5 eine händische Bearbeitung mit Schleifpapier.

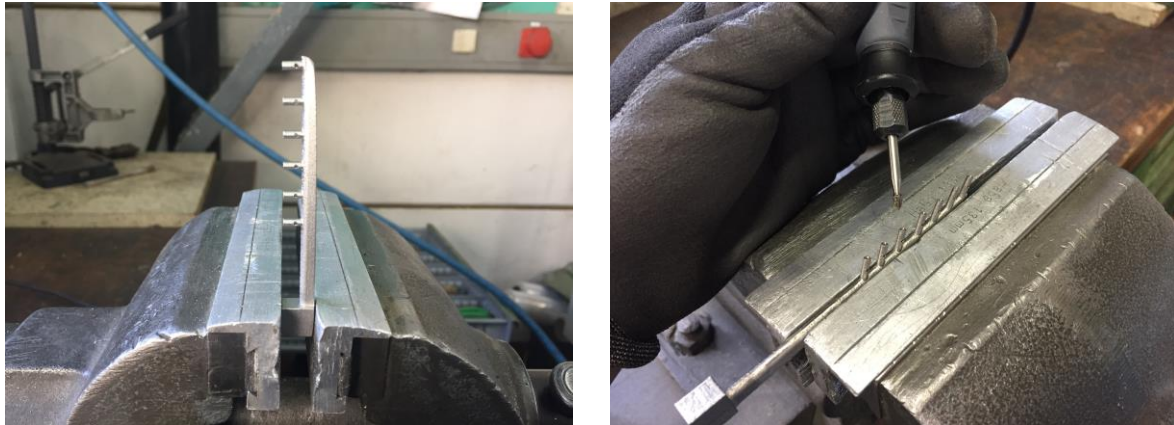


Abbildung 4.2: Fotoaufnahmen von eingespannten Rakes während der mechanischen Bearbeitung.

Generell gilt für derartige Feinbearbeitungen mittels Multifunktionswerkzeug, dass zur Vermeidung von Schwingungen während der Bearbeitung große Abstände zur Einspannung unbedingt vermieden werden sollten und dass Ergebnisse von exaktem Arbeiten bei moderaten Drehzahlen (verschleißmindernd) den hohen Zeitaufwand wieder aufwiegen.

Nach Fertigstellung der mechanischen Nachbearbeitung aller Rakes kann nun mit der Instrumentierung der Pitot-Druckröhrchen bei den Druckrakes begonnen werden. Zur Herstellung der Pitot-Röhrchen werden wie bei den statischen Wanddruckbohrungen Kanülen aus der Medizintechnik eingesetzt, wobei als Abmessungen $\text{Ø}0,80/\text{Ø}0,50 \times 1000$ mm gewählt werden. Die einzelnen Röhrchen werden in der gewünschten Länge mittels Multitool und Trennscheibe abgeschnitten und an den Enden entgratet. Für die Festlegung der Länge gilt, dass die Röhrchen im eingebauten Zustand maximal 40 mm freitragend aus dem Schaftende herausragen sollen. Dies garantiert noch genug Platz sowohl für die Kennzeichnung als auch für den Druckschlauchanschluss und minimiert das Schadensrisiko.

Die nachfolgenden Arbeitsschritte bei der Vorabinstrumentierung (ohne Einsatz von Harz) sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Diese dient dazu, sämtliche Pitot-Röhrchen eines Rakes mittels „Biegestein“ (= Stahlblock mit Bohrungen verschiedener Durchmesser) und einer feinen Drahtzange in den gewünschten Winkel zu biegen, einzeln in die Führungen der Kielköpfe einzufädeln und letztendlich gemeinsam im vom Rake-Schaft ausgeformten Kanal so zu verstauen, dass die Röhrchen von der Seite betrachtet den Schaftrücken nicht überragen, da ansonsten eine spätere Instrumentierung der Rakes in die passgenauen Bohrungen am AnCa-Prüfstand praktisch unmöglich wäre.

Die Lage der eingelegten Röhrchen muss qualitativ mittels Augenmaß beurteilt werden. Zum einen müssen diese in der Frontalansicht (siehe Abbildung 4.3 links unten) zentrisch innerhalb des Kielkopfes liegen und zum anderen müssen sie in der Seitenansicht (siehe Abbildung 4.3 rechts unten) die beiden seitlichen Bohrungen überlappen, nicht zu wenig, da sonst die Abströmung starken Einfluss auf die Messung nimmt, und nicht zu viel, damit die durch die speziell ausgeformte Eintrittskante vom Kielkopf bewirkte Unempfindlichkeit gegenüber dem Anströmwinkel nicht wieder aufgehoben wird. Etwaige kleine Korrekturen können mittels dünner widerstandsfähiger Nadelwerkzeuge auch im eingelegten Zustand durchgeführt werden, während für größere Korrekturen eine Entnahme und erneutes Biegen im Biegestein notwendig ist.

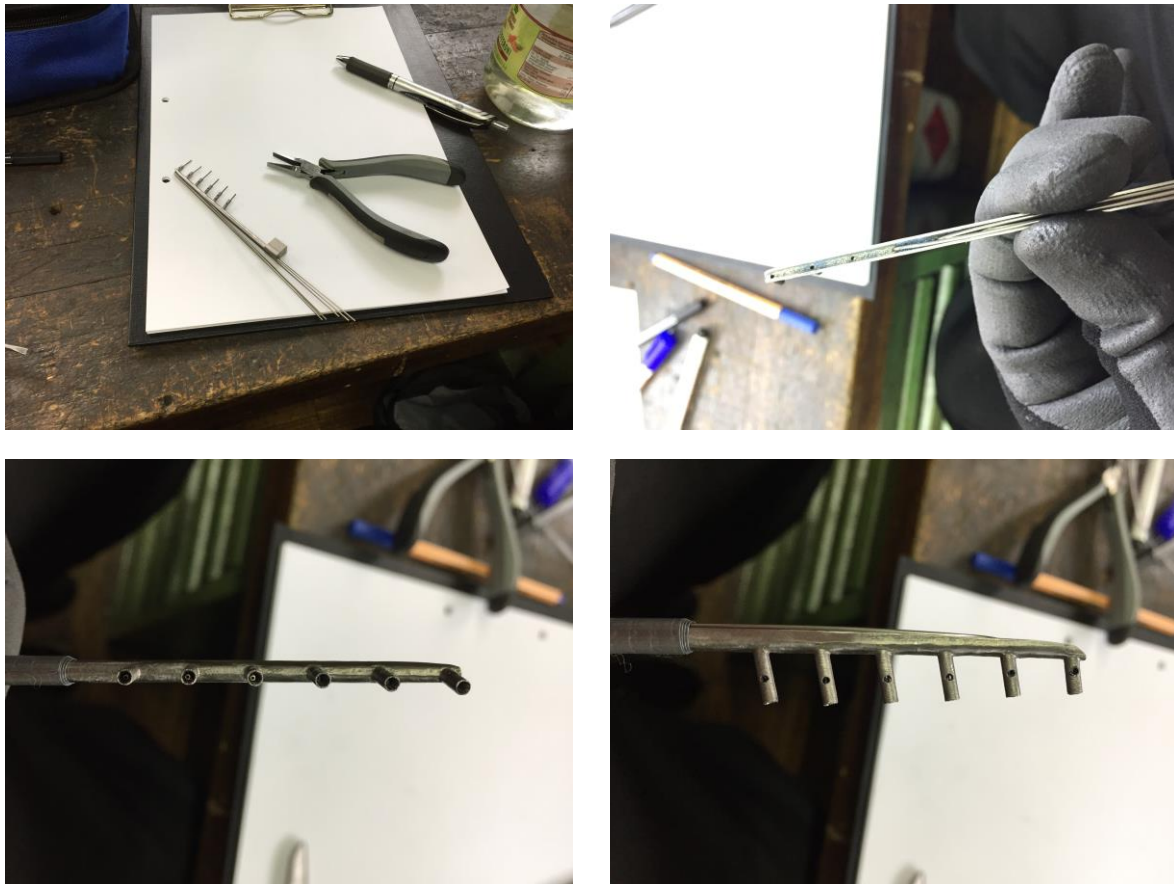


Abbildung 4.3: Fotostrecke der „Trockeninstrumentierung“ von Pitot-Röhrchen in die Rakes.

Bevor ein Röhrchen nun endgültig eingefädelt wird, muss zuvor noch eine Durchgangsprüfung mittels Druckluftpistole und einem Behältnis mit Wasser durchgeführt werden sowie eine Kennzeichnung am Röhrchenende erfolgen, die unmissverständlich einen Aufschluss über die radiale Messposition im Ringraum gibt. Hierfür wird der ITTM-Standardfarbcode verwendet, welcher in Abbildung 4.4 (rechts) schematisch dargestellt ist und in Form von Schrumpfschläuchen entsprechender Farbe mittels Heißluftgebläse auf die Röhrchen aufgeschumpft wird. Das Zwischenergebnis ist in Abbildung 4.4 (links) dargestellt.

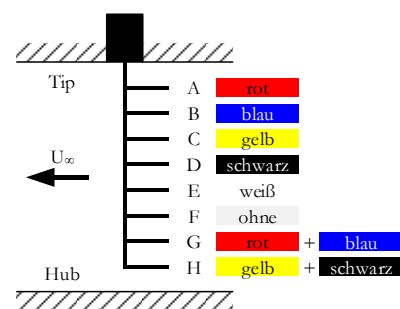


Abbildung 4.4: Fotoaufnahme der Totaldruckrakes mit den vorerst noch mittels Klebeband in Position gehaltenen Pitot-Röhrchen (links) und Schrumpfschlauch-Farbcode für Pitot-Röhrchen anhand der radialen Position im Ringraum (rechts).

Für die endgültige Lagefixierung der Pitot-Röhrchen im jeweiligen Rake, muss nun dessen Schaftkanal mit einem Zwei-Komponenten-Epoxydharzkleber (Mischungsverhältnis aus Harz und Härter von 1:1, Verarbeitungszeit ca. 90 min, Belastbarkeit nach ca. 24 h) so aufgefüllt werden, dass das Harz sämtliche Zwischen- bzw. Hohlräume ausfüllt ohne dabei Luftblasen zu bilden. Je länger die in ihrer Zähigkeit bei Raumtemperatur stark an Honig erinnernde Mischung aus Harz und Härter mittels Heißluftgebläse leicht erhitzt wird, desto dünnflüssiger wird sie und desto stärker neigt sie dazu, sämtliche noch so kleine Poren aufzufüllen.

Doch dieses durchaus erwünschte Fluidverhalten bringt auch die Gefahr mit sich, dass die Flüssigkeit einerseits über die Ränder des Schaftkanals strömt und anschließend beim Abfließen die seitlichen Bohrungen der Kielköpfe versperert oder andererseits durch infolge von Werkzeugtoleranzen zu groß geratene Schaftbohrungen sogar in die Innenräume der Kielköpfe fließt und diese zusammen mit den darin positionierten Sonden nach dem Trocknen komplett verschließt. Eine „Rake-Ertüchtigung“ nach einem solchen Ereignis ist zwar möglich (Aufbrennen des soliden Harzes bei Temperaturen über 200 °C, Reinigung und erneutes Auftragen von Harz), aber auch mühsam und zeitaufwändig sowie keinerlei Garantie für ein anschließend funktionierendes Rake und sollte daher bereits im Vorhinein durch gute Vorbereitung verhindert werden.

Da die Pitot-Röhrchen momentan noch ausschließlich mittels Klebeband in ihrer Lage gehalten werden und sie aufgrund der langen Trocknungszeit des Epoxydharzklebers anfänglich mit anderen Mitteln fixiert werden müssen, wird der Einsatz eines für Metall geeigneten Sekundenklebers (z.B. Loctite Superkleber Control) empfohlen. Dieser wird sowohl für die „Abdichtung“ der Schaftbohrungen hin zu den Kielköpfen als auch zur anfänglichen Lagefixierung der Pitot-Röhrchen eingesetzt, bis das getrocknete Harz diese Funktion übernehmen kann.

Die seitlichen Bohrungen werden durch doppelte Ummantelung mittels Isolierband und/oder Malerband vor den Folgen eines Übertritts des Harzes über die Schaftkanten geschützt. Nach erfolgter Trocknung muss das überstehende Harz (am besten händisch mit Schleifpapier) abgeschliffen werden, sodass es mit den Kanten der Schaftwände abschließt und mit diesen eine homogene Rückfläche bildet, die ein späteres Einführen des Rakes in die zugehörige Führung am Prüfstand ermöglicht. Fotoaufnahmen einzelner Arbeitsschritte und des Ergebnisses sind in Abbildung 4.5 zusammengefasst dargestellt.

Abschließend müssen die nun bereits einsatzfähigen Druckrakes noch einbaufertig gemacht werden, indem sie mit den zugehörigen Aufnehmern bzw. Plugs ebenfalls unter Einsatz des Zwei-Komponenten-Epoxydharzklebers physisch verbunden werden (siehe Abbildung 4.6). In Letztere müssen zuvor noch die für die Aufnahme der Rakes notwendigen Nuten eingefräst werden. Dieser Vorgang geschieht bewusst erst jetzt, da nun auf die tatsächlichen Rückenhöhen der fertiggestellten Rakes im begrenzten aber ausreichenden Maß Rücksicht genommen werden kann.

Nach dem Einlegen des Rakes in die Aufnahmenut und dem Befüllen Letzterer mit der analog zu oben erwärmten Harz-Härter-Mischung wird das quaderförmige Schaftende zum Plug mit Hilfe eines rechten Winkels ausgerichtet und mittels Sekundenkleber in seiner Lage fixiert. Die mittige Ausrichtung in der Nut erfolgt mit Hilfe von Fühlerlehrenbändern geeigneter Dicke, welche hier als Abstandshalter fungieren. Diese sind vor Ende der Verarbeitungszeit (90 min) wieder zu entfernen.



Abbildung 4.5: Fotoaufnahmen vom Einbetten der Pitot-Röhrchen in die Rakes mit Epoxydharz.

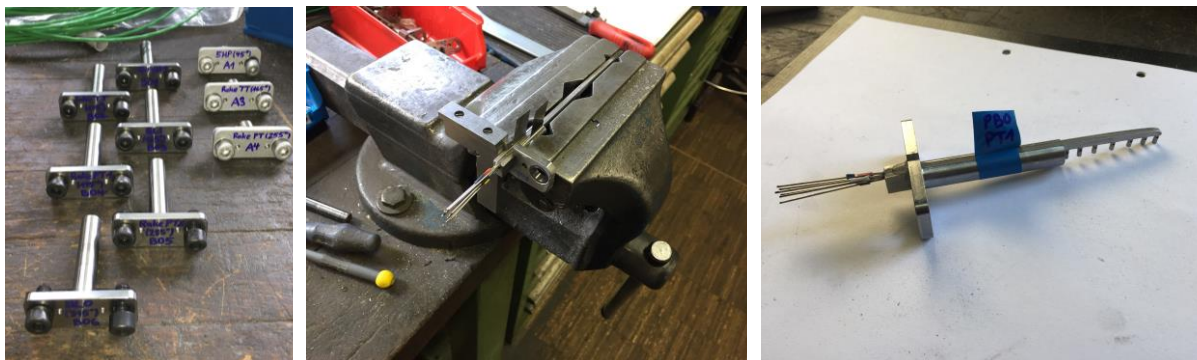


Abbildung 4.6: Herstellung einer physischen Verbindung zwischen Rake und Aufnehmer (Plug).

Die Instrumentierung der Thermoelementdrähte in den Temperaturrakes erfolgt analog zu den Druckrakes, nur dass hier ein wesentliches Augenmerk auf die Unversehrtheit der dünnen Drähte ($\text{Ø}0,6\text{mm}$) und der an den Drahtenden befindlichen Sondenköpfe zu legen ist. Das Biegen der Drähte in die Endposition sollte bevorzugt bereits beim ersten Versuch gelingen, da diese bei mehrmaligem Biegen sehr schnell abreißen. Aus diesem Grund ist auch die Überprüfung der Maßgenauigkeit von den Bohrungen im Schaft idealerweise mit einem nicht mehr zu verwendenden bzw. ausgemusterten Thermoelement-Draht durchzuführen (siehe Abbildung 4.7 links oben).

Des Weiteren sind die Lötstellen (= Übergänge auf grüne Schutzkabel), welche für die Drähte eine kritische Sollbruchstelle bilden, mittels Schrumpfschlauch und einem Heißluftgebläse so zu ummanteln, dass sich eine starre Verbindung zwischen Rake-Schaft und dem grünen Kabelbündel ausbildet (siehe Abbildung 4.7 rechts oben). Alle übrigen Arbeitsschritte (Einkleben der Drähte, Trocknen, Abschleifen, Einkleben der Schäfte in die zuvor ausgefrästen Führungsaufnehmer bzw. Plugs, Trocknen, Abschleifen) erfolgen wie bereits oben für die Druckrakes beschrieben (siehe Abbildung 4.7).



Abbildung 4.7: Ausgewählte Fotoaufnahmen von der Endfertigung der Temperaturrakes.

4.1.2 Grenzsichtkämme

Die Endfertigung der Grenzsichtkämme weist starke Parallelen zu jener von den Druck- und Temperaturrakes auf, wobei es sein kann, dass die Kammbündel entweder direkt in die Aufnahmenut des jeweiligen Führungsplugs oder zuerst in einen Schaft und anschließend erst in die Nut geklebt werden. Letztere Bauweise wird für jene Kämme verwendet, welche zwar von der Außenseite (Tip) des Rigs eingeführt werden, die Messstelle sich jedoch an der Ringrauminnenkontur (Hub) befindet. Für die Herstellung der Kämme werden dieselben Kanülen wie bei den Druckrakes eingesetzt ($\varnothing 0,8$ mm). Dabei weist jedes einzelne Pitot-Rohr in einem Bündel einen ebenfalls auf Basis von CFD-Simulationen definierten Neigungs- (Pitch) sowie Gierwinkel (Yaw) auf. Die Neigungswinkel lassen sich am besten durch deren Einzeichnen auf einem Blatt Papier und iterativem Biegen der einzelnen Röhrchen mittels Biegestein und Zange mit guter Genauigkeit realisieren. Die Gierwinkel hingegen können mit Hilfe eines feinen Nagelwerkzeugs und Augenmaß lediglich näherungsweise erreicht werden. Sobald ein Bündel komplett ist, wird es durch Weichlöten ($T < 450$ °C) mit einem Zinn-Basis-Lot physisch miteinander zu einem Kamm verbunden (siehe Abbildung 4.8 links). Zuletzt werden die Röhrchen am Eintritt abgefräst und entgratet, sodass sich eine homogene Eintrittsebene ausbildet.

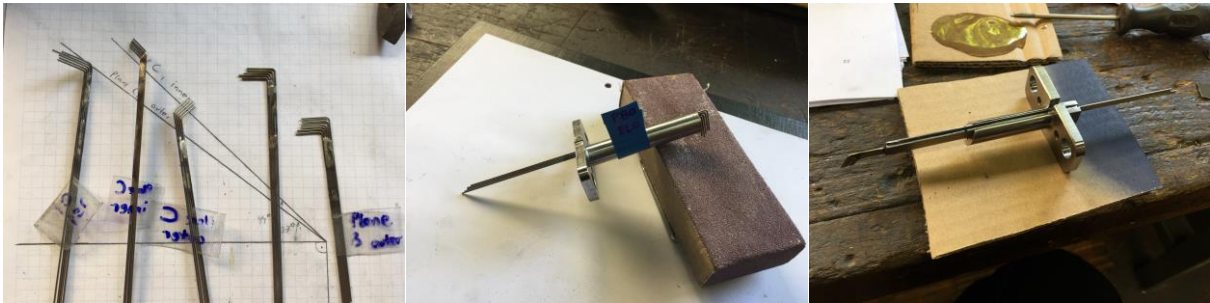


Abbildung 4.8: Ausgewählte Fotoaufnahmen von der Grenzsichtkamm-Fertigung.

Nach der Durchgangsprüfung mittels Druckluftpistole und Wasserglas sowie dem bereits oben beschriebenen Einkleben der Kämme mit/ohne Schaft in die Aufnahmenut der Führungsplugs werden diese noch mit Schleifpapier abgeschliffen und können anschließend montiert und instrumentiert werden. Die radiale Position jedes einzelnen Pitot-Röhrchens im Ringraum geht hier bereits aus der Lage in der Aufnahmenut hervor (siehe Abbildung 4.9 rechts).

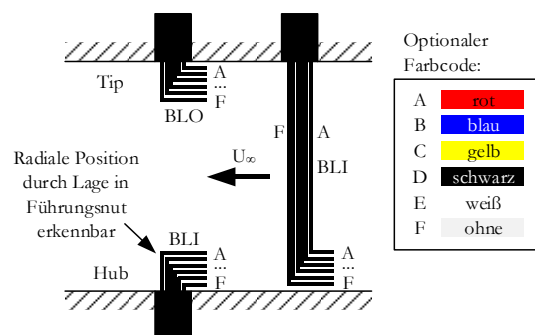


Abbildung 4.9: Fotoaufnahme von vier einbaufertigen Grenzsichtkämmen (links) und Schema für Positionscode bzw. optionalen Farbcode (rechts).

4.2 KALIBRIERUNG

Die Kalibrierung der Totaldruck- und Totaltemperaturrekes lässt sich in drei Bereiche unterteilen:

1. Statische Kalibrierung der Thermolemente für die Temperaturrekes in ruhendem Fluid,
2. Bestimmung des Recovery-Faktors für die Temperaturrekes in Abhängigkeit von der Mach-Zahl und
3. Kontrolle der theoretischen Unempfindlichkeit der Druckrakes gegenüber verschiedenen Anström winkeln.

Beispielhaft für Punkt 3 sind in der nachfolgenden Abbildung 4.10 die aus der Rake-Kalibrierung im Kalibrierkanal des Projektpartners stammenden prozentualen Messabweichungen für den Totaldruck in Abhängigkeit vom Anström-winkel bei konstanter Mach-Zahl für drei ausgewählte Kielköpfe (Ränder und Mitte) für das Druckrake PT50D dargestellt, wobei auf der linken Seite die Kalibrierkurven für den Gierwinkel (Yaw Angle) und auf der rechten Seite jene für den Neigungswinkel (Pitch Angle) zu sehen sind. Da die Anströmrichtung mit Rakes nicht erfasst werden kann, muss die Ausrichtung der Kielköpfe mittels CFD-Simulationen festgelegt werden, deren Genauigkeit innerhalb der lt. Kalibrierung tolerierbaren Abweichung liegen muss (z.B. Gierwinkel vom Rake PT50D ca. $\pm 20^\circ$).

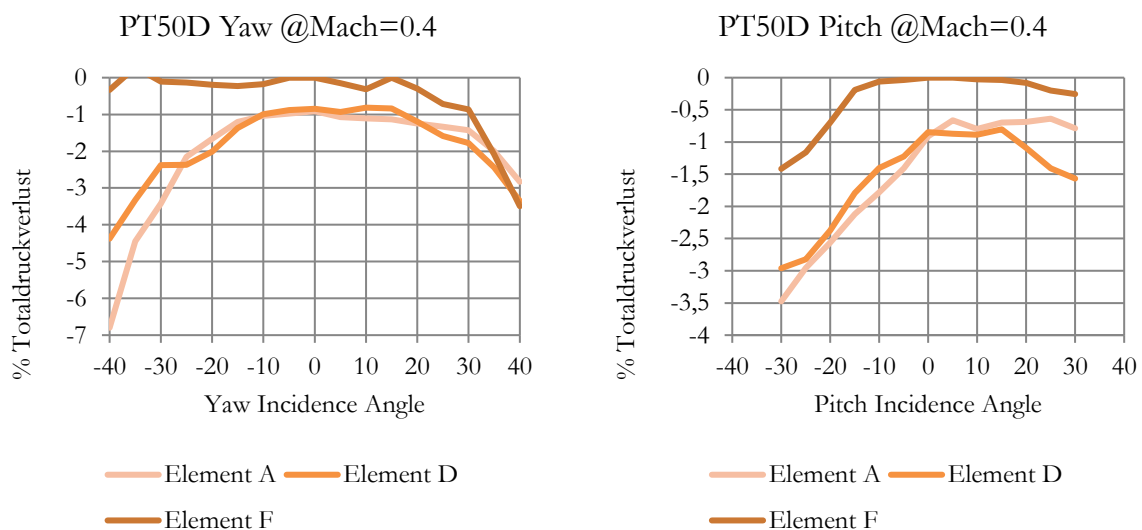


Abbildung 4.10: Beispielhafte Kalibrierkurven für das Totaldruckrake PT50D bei verschiedenen Anström winkeln.

Bei Annahme eines offenen adiabaten thermodynamischen Systems (z.B. der Kalibriertunnel), durch das ein ideales Gas bei konstantem Massenstrom ohne jegliche Verrichtung von Arbeit strömt, ergibt sich aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dass die Totalenthalpie konstant sein muss. Durch Ersetzen der Totalenthalpie mit der Totaltemperatur ergibt sich folgende Gleichung, welche gleich um den s.g. „Recovery-Faktor“ r erweitert wurde:

$$T_{t,tatsächlich} = T + r \cdot \frac{c^2}{2c_p} = T + r \cdot (T_{t,ideal} - T) \quad (4.1)$$

Dieser Faktor berücksichtigt irreversible Effekte (z.B. Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Dissipation) bei der Aufstauung eines Fluids an einem Strömungshindernis, wie z.B. einem TC-Sondenkopf.²⁸

²⁸ Vgl. Heitmeir (2015), S. 9-23.

Beispielhaft für Punkt 2 sind nun in der nachfolgenden Abbildung 4.11 die relativen Messabweichungen für die Totaltemperatur von den Temperaturrekes TT42B, TT48C und TT50D in Abhängigkeit von der Mach-Zahl dargestellt.

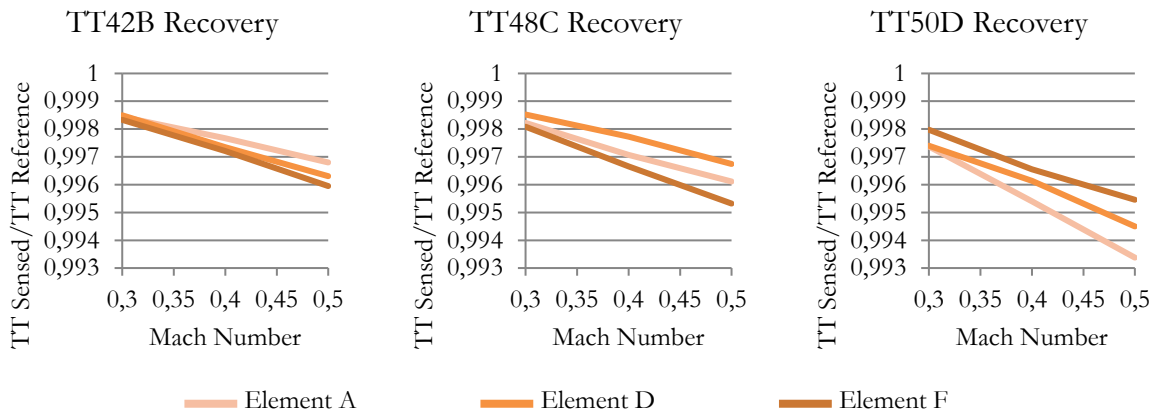


Abbildung 4.11: Kalibrierkurven in Bezug auf den Recovery-Faktor ausgewählter Temperaturrekes.

Da jedoch neue Thermoelemente eingesetzt werden, ist auf jeden Fall eine statische Temperaturkalibrierung (Punkt 1) durchzuführen. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Dabei wird eine im Kalibrierofen befindliche Flüssigkeit auf verschiedene Temperaturen innerhalb des Kalibrierbereichs von +30 °C bis +80 °C aufgeheizt. Pro Thermoelement werden also mindestens sechs Messpunkte angefahren, wobei jeweils eine Einschleifdauer von ca. 5 min beachtet werden sollte. In die aufgeheizte Flüssigkeit werden nun zwei Messsonden gleichzeitig eingetaucht, und zwar das zu kalibrierende Typ K Thermoelement (Messbereich: -270 °C bis +1300 °C) sowie das Pt100-Hochpräzisionswiderstandsthermometer (Anzeigergerät: GMH 3750 mit einer Genauigkeit von $<\pm 0,03$ °C bei einer Auflösung von 0,01 °C) für die Referenzmessung. Der Sensor bzw. das Messgerät, an dem das Thermoelement angeschlossen ist, muss exakt dasselbe sein, welches auch später während der Versuchsfahrten am AnCa-Prüfstand zum Einsatz kommt (\rightarrow Kalibrierung der Messkette). Für jedes Thermoelement werden bei den eingestellten Temperaturen die jeweiligen Abweichungen zur Referenzmessung notiert, woraus sich im Endeffekt eine Kalibrierkurve mit/ohne konstantem Offset ergibt, welche zur direkten Messdatenkorrektur in die Matlab-Auswerterroutinen einprogrammiert werden kann.

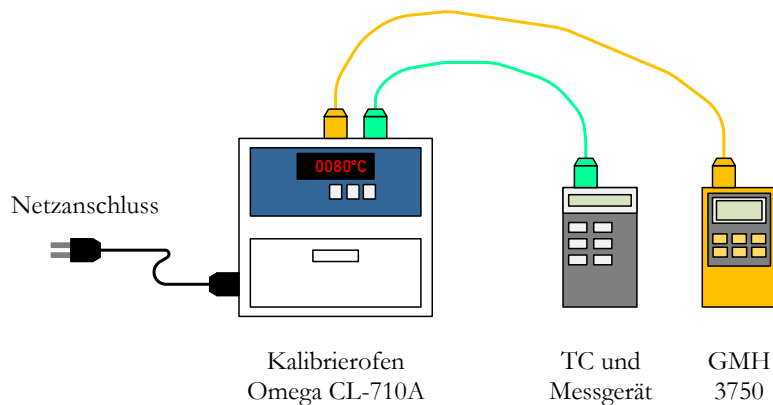


Abbildung 4.12: Schematische Anordnung für die Kalibrierung von Thermoelementen.

4.3 INSTRUMENTIERUNG

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich damit, einen Überblick über die Lage der Messebenen und der instrumentierten Sonden zu schaffen, um die im Unterkapitel 5.2 behandelten Messergebnisse örtlich zuordnen zu können. Als Gesamtüberblick soll hier das in Abbildung 4.13 dargestellte 2D-Schnittbild der Ringgitterkaskade dienen, in welchem die Lagen der in den nachfolgenden Abschnitten näher beschriebenen Messebenen zusammengefasst eingezeichnet sind. Zusätzlich sind die traversierbaren Komponenten vom Bwd- und Fwd-Rig farblich hervorgehoben und die Richtungen zu den Sonden für die Betriebsdatenerfassung im Beruhigungskessel (39XX) und im Abluftrohr (Delta Flow) sowie innere Druckschlauchausleitungen angedeutet.

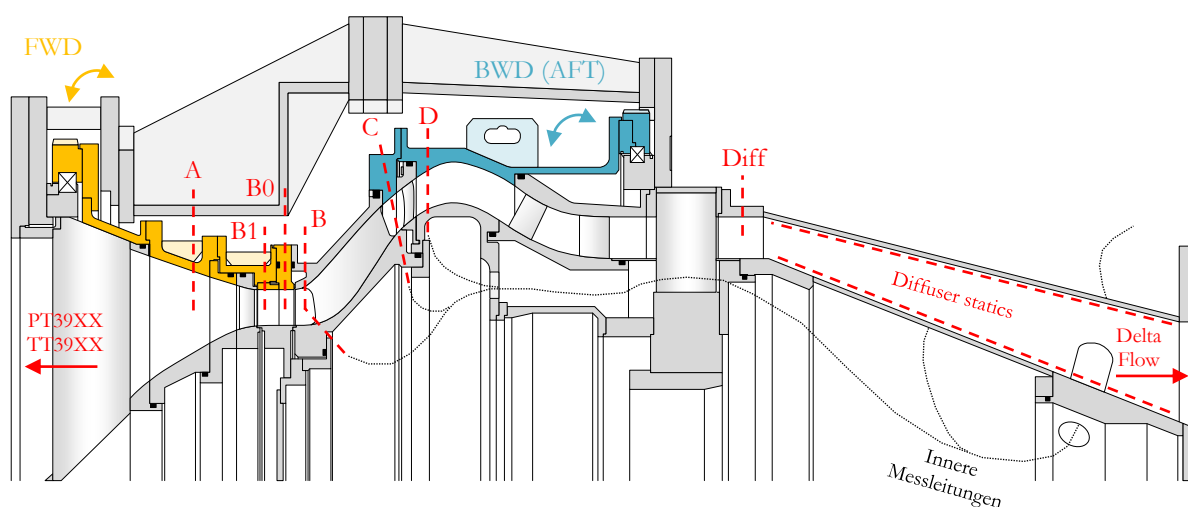


Abbildung 4.13: 2D-Schnittbild der Ringgitterkaskade mit Kennzeichnung der Messebenen.

Die Messebenen sind dabei nicht willkürlich gewählt, sondern sollen ganz gezielt Aufschluss über die nachfolgenden lokalen Strömungszustände innerhalb des Ringraums Aufschluss geben:

- Messebene A (IN): Zustand der Abströmung aus dem Beruhigungskessel und Anströmung der IGVs.
- Messebene B1 (40B): Zustand der Abströmung von den IGVs. Bei der Prüfstandskonfiguration mit Speichenrad zusätzlich interessant als Zustand der Anströmung der Speichen.
- Messebene B0 (41B): Zustand der Anströmung des TCFs. Bei der Prüfstandskonfiguration mit Speichenrad zusätzlich interessant als Zustand der Abströmung von den Speichen.
- Messebene B (42B): Weitere Eintrittsebene in das TCF.
- Messebene C (48C): Zustand der Abströmung vom TCF und Anströmung der LP Vanes.
- Messebene D (50D): Zustand der Abströmung von den LP Vanes.
- Diffusor: Zustand der Anströmung (Diff) und statischer Druckverlauf des Diffusors.

Mit Ausnahme der Messebene B können alle anderen um 360° über den Umfang traversiert werden und ermöglichen dadurch eine komplette azimutale Abtastung des Ringraumes innerhalb der jeweiligen Ebene mit nur einem Rake. Diese Form der Automatisierung bringt jedoch auch einen erhöhten Instrumentierungsaufwand mit sich sowie die Gefahr von abgerissenen Druckschläuchen bzw. Kabeln und eingeklemmten Schläuchen während des Betriebs. Um derartige Fehlerquellen zumindest zum größten Teil ausschließen zu können, muss ein besonderes Verlegungskonzept für die Messleitungen angewandt werden, welches in Abbildung 4.14 schematisch dargestellt ist.

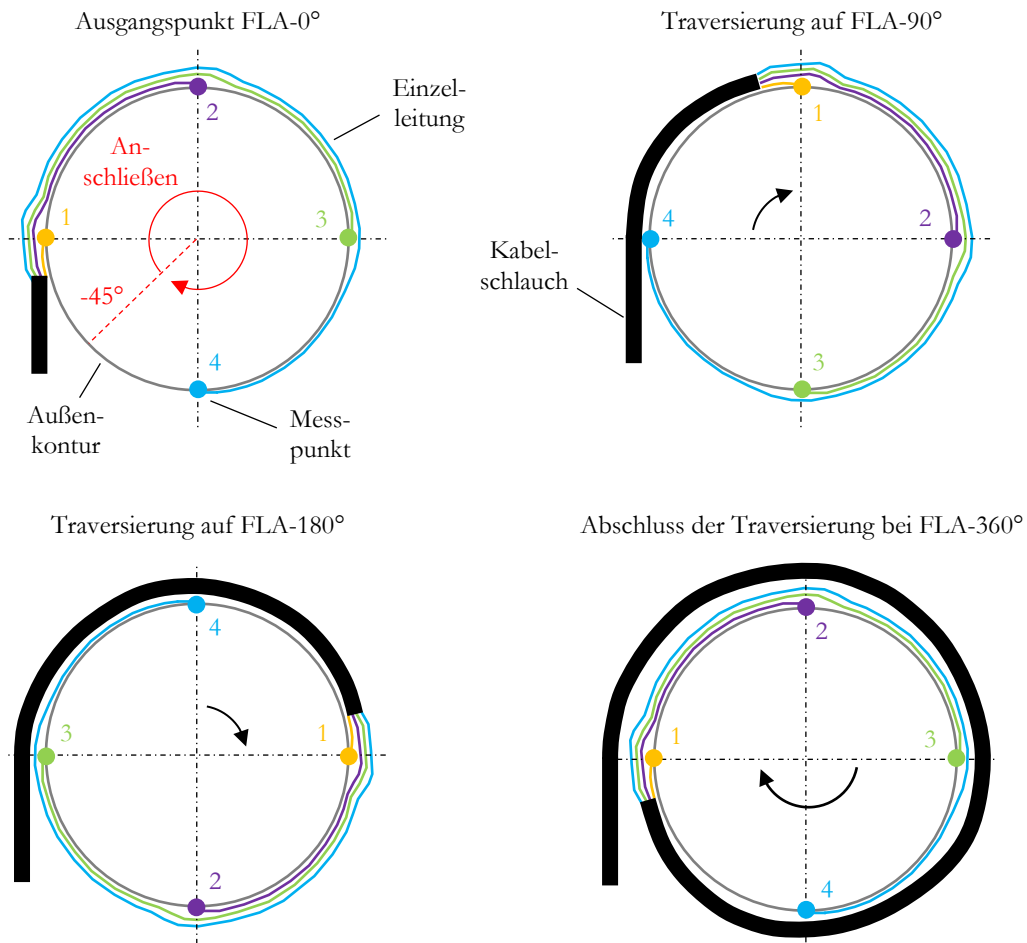


Abbildung 4.14: Schematische Darstellung des Verlegungskonzepts für Messleitungen in traversierbaren Ebenen anhand eines stark vereinfachten Beispiels mit vier Messpunkten an den azimutalen Positionen 0°, 90°, 180° und 360° (Blick in Strömungsrichtung).

Vereinfachend soll hier davon ausgegangen werden, dass das Verlegungskonzept nur für insgesamt vier Messpunkte (jeweils einer zwischen zwei Kreisquadranten) und auch nur für eine Messebene angewandt wird. Links oben ist die Ausgangsposition der Traversierung bei 0° dargestellt. Sämtliche Messleitungen befinden sich dabei zum Schutz in einem gemeinsamen Kabelschlauch. Die freie Länge der Einzelleitungen sollte so gering wie möglich gehalten werden. Ab einem minimalen Winkel von -45° (zur Vermeidung von Knicken des Leitungsbündels) werden die Einzelleitungen im Uhrzeigersinn über die Kontur zu den entsprechenden Messpositionen bis zu einem Winkel von $+225^\circ$ geleitet und dort angeschlossen. An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass die Umfangsrichtung der anfänglichen Aufwicklung mit jener der Traversierung übereinstimmen muss, d.h. wenn im Uhrzeigersinn aufgewickelt wird, dann muss später auch im Uhrzeigersinn traversiert werden und umgekehrt. In den weiteren drei Darstellungen sind ausgewählte Stadien der Aufwicklung bei den Traversierpositionen 90°, 180° und 360° (maximale Auslenkung) zu sehen.

Nun muss die Theorie am realen Prüfstand noch in die Praxis umgesetzt werden. Hierbei ist vor allem zu beachten, dass aufgrund der Teilungsebene jeweils ein eigenes Verlegungskonzept für Fwd-Rig (Messebenen A, B1 und B0) und Bwd-Rig (Messebenen C und D) angewandt werden muss, wobei die jeweiligen traversierbaren Messebenen mit nur einer einzigen gemeinsamen Aufwicklung zu versorgen sind. Die in Abbildung 4.15 dargestellte Fotostrecke zeigt die Realisierung am AnCa-Prüfstand. Zusätzlich sind oben die beiden induktiven Sensoren (Fwd- und Bwd-Rig) für die Nullposition der Traversierung zu sehen. Hierbei wird mit Hilfe eines stationär (z.B. am ALF-0°-Beam) montierten

induktiven Näherungsschalters (Schaltabstand ca. 1 mm) und einem an der rotierenden Kontur montierten und zuvor noch geschliffenen Metallplättchens ein Endschaltersystem für den jeweiligen Traversiermotor bewerkstelligt.



Abbildung 4.15: Fotoaufnahmen der Verlegungs- und Endschalterkonzepte am Bwd- und Fwd-Rig (oben) und vom fertig instrumentierten Prüfstand (unten).

In der nachfolgenden Tabelle ist eine Gesamtübersicht für die eingesetzten Sonden und Wanddruckbohrungen in den einzelnen Messebenen zusammengestellt, wobei die Gesamtanzahl der wandnahen Messpositionen zusätzlich auf die Außen- (A) sowie die Innenkontur (I) aufgesplittet wird. Die angegebenen erreichbaren Traversierwinkel werden stets in der Umfangsrichtung ALF CCW (stromaufwärts gegen den Uhrzeigersinn) positiv gezählt. Die Kammsonden in Ebene B1 kommen bei der stationären Konfiguration ohne Speichenrad nicht zum Einsatz.

Tabelle 4.1: Gesamtübersicht über die in den einzelnen Messebenen eingesetzten Sonden

| Messebene | Druckkammsonden | Temperaturkammsonden | Grenzschichtkämme | Wanddruckbohrungen | Traversierbarer Winkel |
|-----------|-----------------|----------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| A | IN | 1 | - | $7_{(A)}+0_{(I)}=7$ | 360° (Fwd) |
| B1 | 40B | (2) | - | $8_{(A)}+0_{(I)}=8$ | 360° (Fwd) |
| B0 | 41B | 2 | $1_{(A)}+1_{(I)}=2$ | $8_{(A)}+0_{(I)}=8$ | 360° (Fwd) |
| B | 42B | 1 | $1_{(A)}+1_{(I)}=2$ | $8_{(A)}+8_{(I)}=16$ | 0° |
| C | 48C | 2 | $1_{(A)}+1_{(I)}=2$ | $8_{(A)}+8_{(I)}=16$ | 360° (Bwd) |
| D | 50D | 1 | - | $8_{(A)}+8_{(I)}=16$ | 360° (Bwd) |
| Diffusor | 1 | - | - | $40_{(A)}+14_{(I)}=54$ | 0° |

4.3.1 Planung und Umsetzung

Unabhängig vom Ausmaß der eingesetzten finanziellen Mittel für die Realisierung eines Prüfstandes sowie für die Anschaffung hochpräziser Messaufnehmer und geeigneter Automatisierungstechnik muss man sich einer Tatsache von Anfang an bewusst sein: „Die erfolgreiche Durchführung einer Messung steht und fällt zu einem großen Teil mit der dargelegten Professionalität bei der Umsetzung des Instrumentierungsplans.“ Denn selbst die teuerste Messtechnik kann eine während den oftmals äußerst trivial und monoton erscheinenden Instrumentierungsarbeiten auftretende fehlerhafte Zuordnung zwischen Messleitung und Messposition nicht kompensieren. Im schlimmsten Fall kommt es in weiterer Folge zu einer Fehlinterpretation der Messdaten oder sogar zur Wiederholung von ganzen Versuchsfahrten. Aus diesem Grund ist vor allem aufgrund der stark konzentrationsmindernden Monotonie der Messleitungs-instrumentierung hier ganz besonders auf genaues Arbeiten zu achten.

Bei der Instrumentierung wird konkret zwischen zwei Arten von Messleitungen unterschieden (siehe Abbildung 4.16):

1. Thermoelementkabel zur Temperaturmessung, welche aufgrund ihrer relativ kleinen Anzahl von der Messstelle direkt zum CompactRIO-Schaltkasten weitergeleitet und dort angeschlossen werden, sowie
2. Druckmessschläuche für Wanddruckbohrungen, Grenzschichtkämme und Kammsonden (Rakes), welche an s.g. Konnektoren als portable Schnittstelle zu den PSI-Schränken angeschlossen werden.

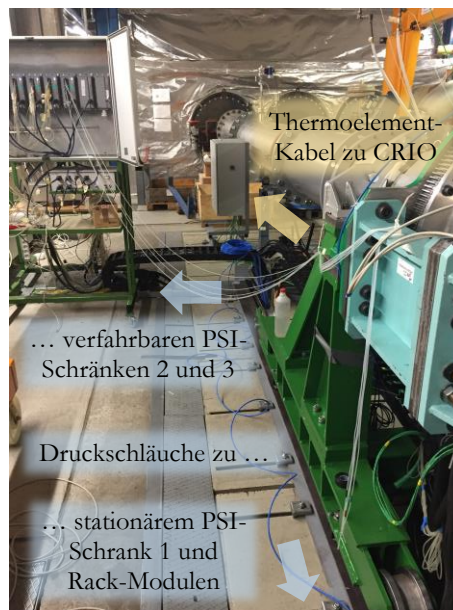


Abbildung 4.16: Anschlussdestinationen für Thermoelementkabel und Druckmessschläuche.

Sämtliche Messleitungen haben jedoch gemein, dass deren eindeutige und unmissverständliche Zuordnung sowohl zur Mess- als auch zur Anschlussstelle gewährleistet sein muss. Da die Leitungen i.d.R. Längen von mehreren Metern aufweisen, werden sie vor bzw. während der Instrumentierung an beiden Enden mit Etiketten versehen, auf welchen die der jeweiligen Messleitung zugeordnete Bezeichnung aus dem Instrumentierungsplan steht. Außerdem sollten mehrere Leitungen, welche dieselbe Anschlussdestination (z.B. einen gemeinsamen Konnektor) haben, immer in einem Kabelschlauch zusammengefasst werden, um die empfindlichen Leitungen vor mechanischen Einwirkungen von

außen weitestgehend abschirmen zu können, wie z.B. vor Abknicken, Einklemmen oder Abschneiden. Die Zuordnung der Messleitungen zu den Messstellen (am Prüfstand) erfolgt dabei lt. Instrumentierungsplan wie folgt:

- Bei den Totaldruck- bzw. Totaltemperaturrakes sowie bei den Grenzschichtkämmen erfolgt die Zuordnung der Messleitung zur Messstelle mit den in Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 erläuterten Farbcodes.
- Bei den wandstatischen Druckbohrungen erfolgt die Zuteilung über die azimutale Lage der Bohrungen unter Anwendung der ALF-Konvention bei der Traversierposition Null.

Nachdem die Messleitungen lt. den obigen Vorgaben an den Messstellen des Prüfstands angeschlossen worden sind, gibt der Instrumentierungsplan zum Abschluss noch die Zuteilung der einzelnen Messleitungen zu den Anschlussstellen der Sensoren bzw. Messaufnehmer vor. Am einfachsten gestaltet sich diese bei den Thermoelement-Kabeln, welche direkt am vorgegebenen Steckplatz im CRIO-Schaltkasten angeschlossen werden können. Bei den Druckmessschläuchen gestaltet sich aufgrund ihrer Vielzahl die Angelegenheit etwas komplizierter, denn prinzipiell kann man nicht davon ausgehen, dass zum gewünschten Zeitpunkt ebenso viele Messaufnehmer zur Verfügung stehen, wie aus dem Prüfstand Druckschläuche ausgeleitet worden sind.

Aus diesem Grund wird ein flexibles Anschlusskonzept mit Hilfe von kreisförmigen pneumatischen Konnektoren der Fa. Scanivalve eingesetzt (siehe Abbildung 4.17). An jedem Konnektor können bis zu 48 Druckschläuche angeschlossen werden, wobei die Nummerierung mit der Zahl 0 beginnt und sämtliche geraden Zahlen in Form einer Skala von weißen Teilstrichen auf schwarzem Hintergrund gekennzeichnet sind. Aufgrund der Vielzahl von Anschlüssen auf engem Raum gestaltet sich die Leitungsinstrumentierung tlw. jedoch als sehr mühsam und zeitaufwändig. Um Verletzungen an den Fingern vorzubeugen und zur Erhöhung der Haftreibung sollten dabei dünne sowie für Feinmechanik geeignete Arbeitshandschuhe getragen werden.

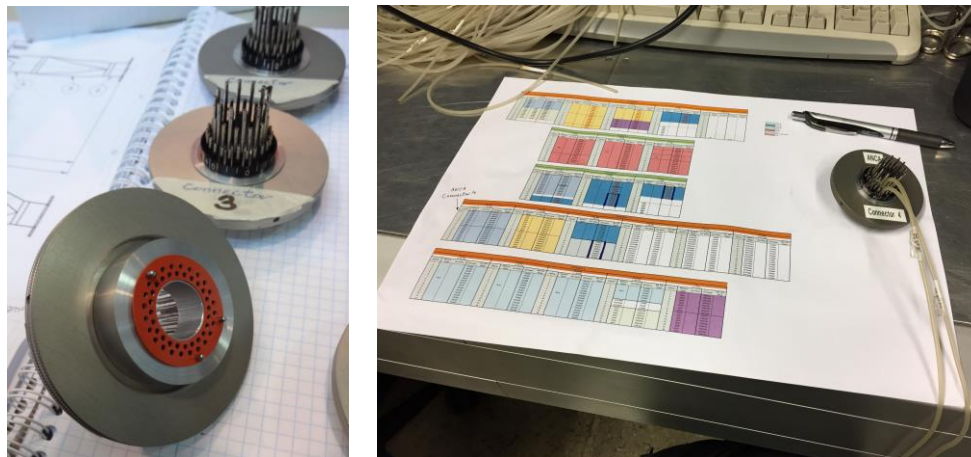


Abbildung 4.17: Freie Konnektoren (links) und Instrumentierung eines Konnektors mit ihm laut Instrumentierungsplan zugewiesenen Druckmessleitungen (rechts).

Die Konnektoren sind dabei im Grunde selbst keine Messaufnehmer, sondern sie bilden vielmehr ein portables bzw. austauschbares Bindeglied zwischen den Messleitungen vom Prüfstand und den eigentlichen Drucksensoren (PSI-Module in Messschränken bzw. stationäre PSI-Rack-Module) beinhalten. In Abbildung 4.18 sind Fotoaufnahmen vom Innenleben eines solchen Messschrankes bei bereits angeschlossenen Konnektoren dargestellt. Hierbei kann man sehr gut erkennen, dass sich die Anzahl der eingebauten Messaufnehmer aus der Anzahl der Konnektoren ergibt, welche gleichzeitig angeschlossen werden können (in diesem Fall zwei Konnektoren zu je 48 Messleitungen = 96 Aufnehmer).



Abbildung 4.18: Fotoaufnahmen vom Inneren eines PSI-Messschrankes bei angeschlossenen Konnektoren.

Das Prinzip dahinter soll nun anhand der schematischen Skizze in Abbildung 4.19 erläutert werden. In diesem Beispiel wird der Messschrank 2 betrachtet, welcher die sechs PSI²⁹-Module 2103, 2105, 2106, 2107, 2111 und 1096 enthält. Jedes Modul beinhaltet insgesamt 16 Druckaufnehmer, sodass je ein Konnektor mit drei Modulen bedient werden kann. Dabei ist das Innere vom Messschrank (begrenzt durch die dunkelgrüne Umrandung) als fixiert anzusehen, d.h. die Messleitungen 0-15 (blau), 16-31 (rot) und 32-47 (hellgrün) der stationären Anschlussstellen A und B sind fest zugeteilt und ändern sich damit nicht. Was sich jedoch sehr wohl ändern kann, sind die angeschlossenen Konnektoren (im dargestellten Fall die Nummern 2 und 3), wodurch man sowohl auf eine begrenzte Verfügbarkeit an Messaufnehmern durch die Vornahme einer Priorisierung reagieren kann als auch binnen Sekunden von einem Messsystem auf das andere umschalten kann (z.B. von Rake- auf Fünflochsondenmessung, etc.). Daraus folgt, dass sich der Instrumentierungsplan im Hinblick auf die Druckmessleitungen ausschließlich auf die Konnektoren als „Sensor“-Anschlussstellen bezieht und man in weiterer Folge während einer Versuchsfahrt nur noch mitprotokollieren muss, wann welcher Konnektor an welchem Schranksteckplatz angeschlossen war (z.B. Versuchsfahrt 10 / 20:30 Uhr bis 03:45 Uhr / Messschrank 2 / Steckplatz A: Konnektor 2 / Steckplatz B: Konnektor 3).

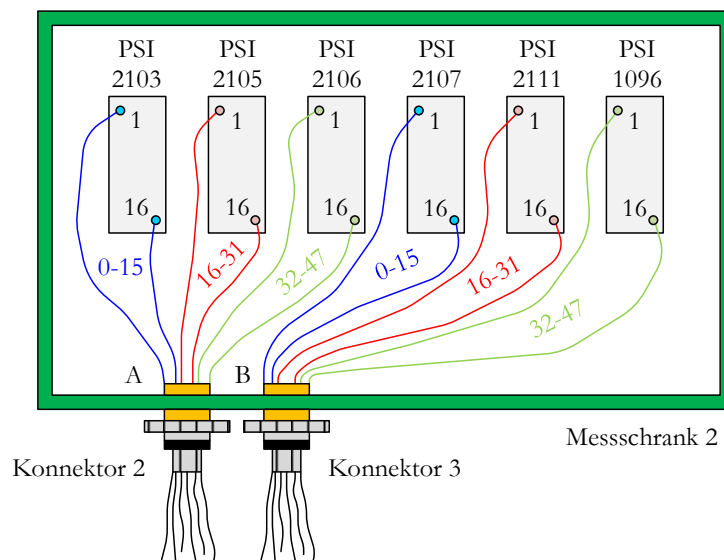


Abbildung 4.19: Schematische Darstellung vom Druckanschlusskonzept mit Konnektoren.

²⁹ Fa. Pressure Systems Inc. (PSI)

4.3.2 Messebenen A und B1

Der Messebene A bzw. IN sind die großen Einlaufstützschaufeln (Inlet Vanes) vorgelagert und die Schaufeln des Hochdruckstators (Inlet Guide Vanes) nachgelagert. Die Messebene B1 bzw. 40B befindet sich unmittelbar hinter den IGVs und ist vor allem bei der Prüfstandskonfiguration mit Speichenrad interessant. Eine qualitative Darstellung der Messpositionen beider Ebenen in der stationären Konfiguration erfolgt in Abbildung 4.20 sowie Abbildung 4.21.

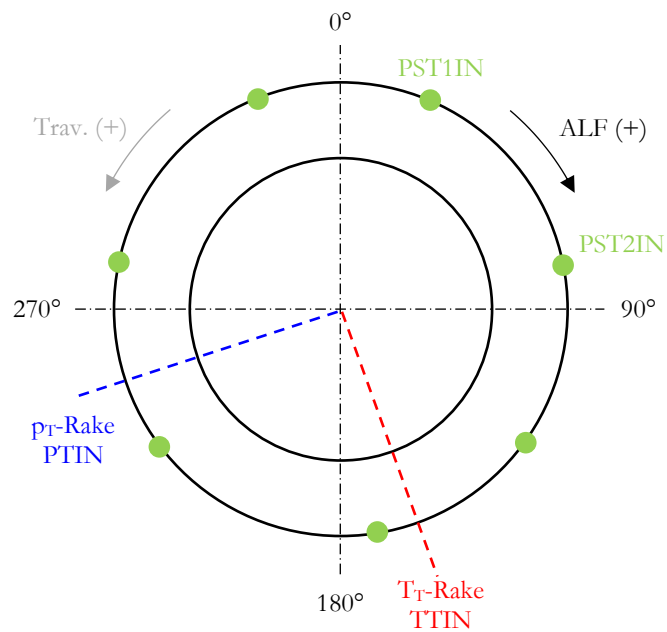


Abbildung 4.20: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene A mit Blick stromaufwärts.

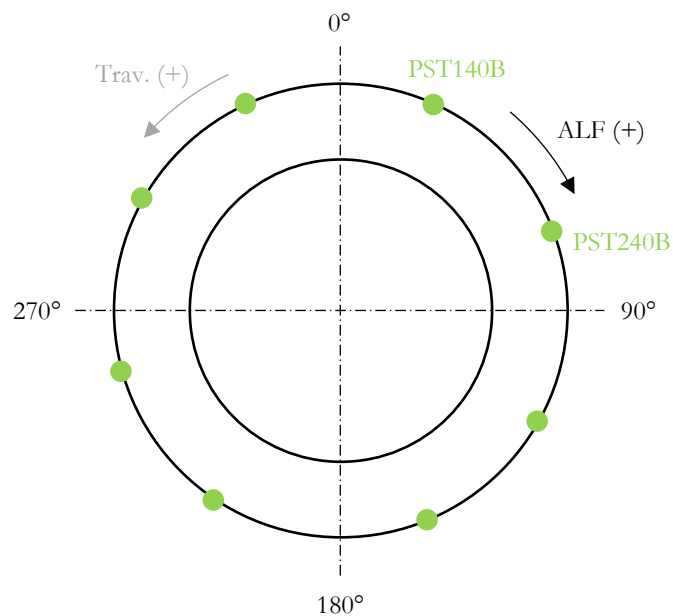


Abbildung 4.21: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene B1 mit Blick stromaufwärts.

Beide Ebenen können gemeinsam mit der Außenkontur des Fwd-Rigs um 360° traversiert werden, wobei sich weder die Einlaufstützschaukeln noch die IGVs mitdrehen. In der Ebene A werden das Totaldruckrake PTIN und das Totaltemperaturrake TTIN über die zugehörigen Plugs durch Verschraubung mit jeweils zwei M8 8.8 Zylinderkopfschrauben an der entsprechend bearbeiteten Fläche instrumentiert.

In der Messebene B1 kommen bei der stationären Prüfstandskonfiguration ohne Speichenrad die normalerweise vorgesehenen Totaldruckrakes PT40B und P240B sowie das Totaltemperaturrake TT40B nicht zum Einsatz, da die entsprechende Instrumentierung der Messebenen B0 und B hier vollkommen ausreicht.

Sowohl in Ebene A als auch in Ebene B1 befinden sich Wanddruckbohrungen an jeweils acht äußeren Umfangspositionen, wobei jene von Ebene B1 mit denen von Ebene B0 übereinstimmen. Die Instrumentierung läuft dabei nach dem bereits gewohnten üblichen Schema ab. Die Durchgangsprüfung der Wanddruckbohrungen ist vor allem bei lackierten Bauteilen wie hier unbedingt durchzuführen. Diese erfolgt im Idealfall natürlich bereits vor der Montage mit Hilfe von dünnen Drähten bzw. am besten mit einem längeren 5/10 mm-Bohrer. Für die Instrumentierung werden wieder Kanülen aus der Medizintechnik mit den Abmessungen $\varnothing 1,60/\varnothing 1,30 \times 1000$ mm verwendet, welche mit einem Multitool (z.B. von Proxxon oder Dremel) auf eine passende Länge gekürzt und an den beiden Enden entgratet sowie angefast werden. Auf der Montageseite werden die Röhrchen bis zum Anschlag in die Bohrungen eingeführt und anschließend mit Epoxidharz und zugehörigem Härter eingeklebt. Auch hier gilt, dass die Röhrchen nur so weit wie für den Schlauchanschluss nötig aus der Bohrung ragen, um die Gefahr von Schäden an der Instrumentierung zu minimieren (maximal notwendige Röhrchenlänge in Ebene A ca. 30 mm und in Ebene B1 ca. 45 mm).

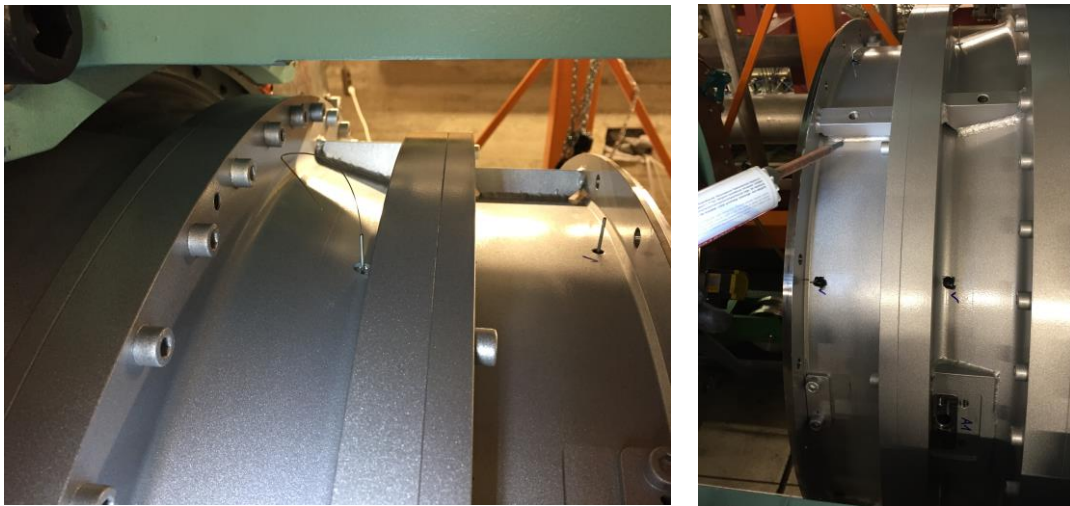


Abbildung 4.22: Durchgangsprüfung mit anschließender Instrumentierung der Wanddruckbohrungen durch Einkleben von Kanülen in den Messebenen A und B1.

4.3.3 Messebene B0

Der Instrumentierungsring des Fwd-Rigs bildet die Messebene B0 bzw. 41B. Da sie die letzte um 360° drehbare Messebene vor dem stationären TCF ist, wird sie insgesamt mit fünf Messsonden (Totaldruckrakes PT41B und P241B, Totaltemperaturrake TT41B sowie jeweils ein Grenzschichtkamm für Innen- und Außenkontur) und acht Wanddruckbohrungen instrumentiert (siehe qualitative Darstellung der Messpositionen in Abbildung 4.23).

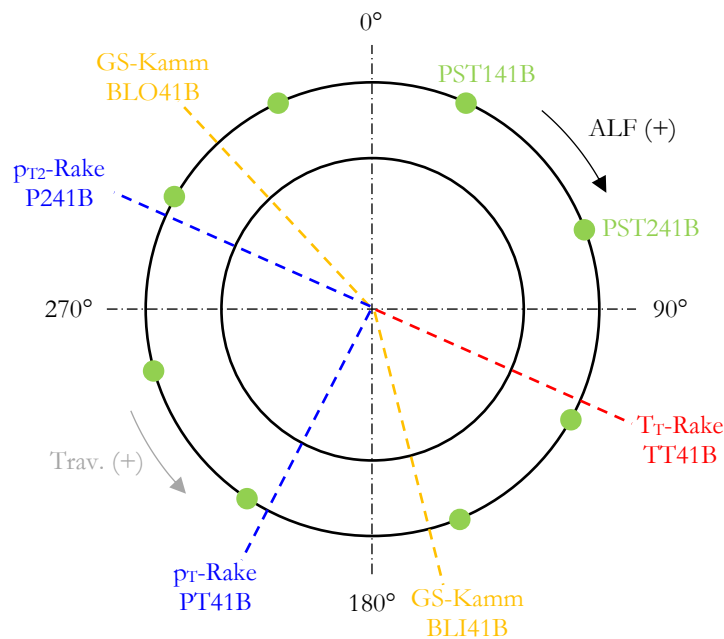


Abbildung 4.23: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene B0 mit Blick stromaufwärts.

Die Instrumentierung der in den Ringraum eintauchenden Messsonden erfolgt wie gewohnt über zugehörige Halterungen (Plugs), welche mit jeweils zwei Stück M8 8.8 Zylinderkopfschrauben an der Führungsposition verschraubt werden. In Abbildung 4.24 ist beispielsweise die Instrumentierung des inneren Grenzschichtkammes BLI dargestellt.

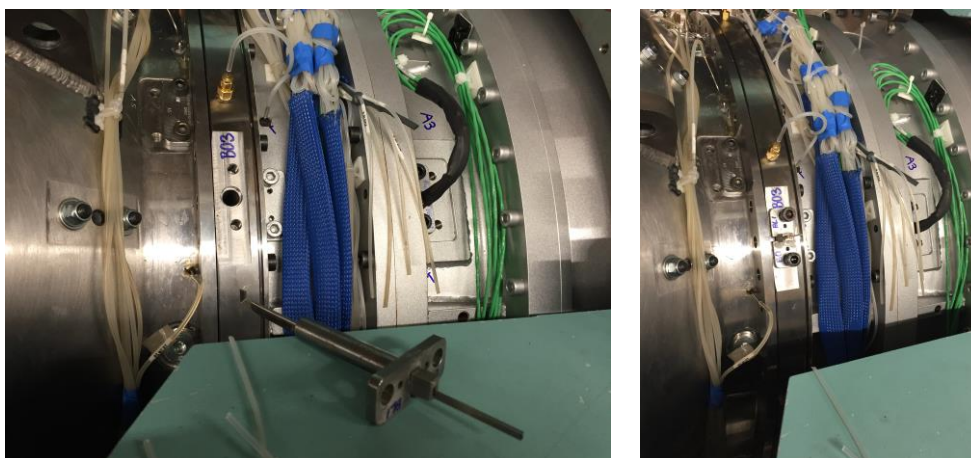


Abbildung 4.24: Instrumentierung des Grenzschichtkammes BLI41B in der Messebene B0 (Instrumentierungsring).

Da der Instrumentierungsring über eine genügend große Breite mit horizontal verlaufender Außenfläche verfügt und noch dazu genügend Material radial nach innen zur Verfügung steht, kann hier für die Messung des statischen Wanddruckes an der äußeren Ringraumkontur eine besonders elegante Methode für die Instrumentierung gewählt werden, und zwar mit Gyrolok-Schneidringverschraubungen des Typs 1CM2 von der Fa. Hoke, welche mit einem amerikanischen selbstständig dichtenden kegeligen Fein-Rohraußengewinde NPTF 1/8" in das entsprechend zuvor in den Instrumentierungsring an der Position der durchgehenden Wanddruckbohrung geschnittene Gegengewinde eingeschraubt wird. Am anderen Ende befindet sich eine äußere Hülse mit einer Öffnung vom Durchmesser 1/16" auf einem zweiten Gewinde. In diese Öffnung wird nun eine passende Kanüle bis zum Anschlag eingeführt. Durch Einschrauben der Außenhülse wird eine innere Hülse gegen einen feststehenden Keil verschoben und ihr Durchmesser dadurch reduziert, wodurch eine vollständig abdichtende Klemmung und Lagefixierung der Kanüle erfolgt. Die Darstellung einer solchen Verschraubung im angelieferten Zustand sowie nach dem Einbau erfolgt in Abbildung 4.25.

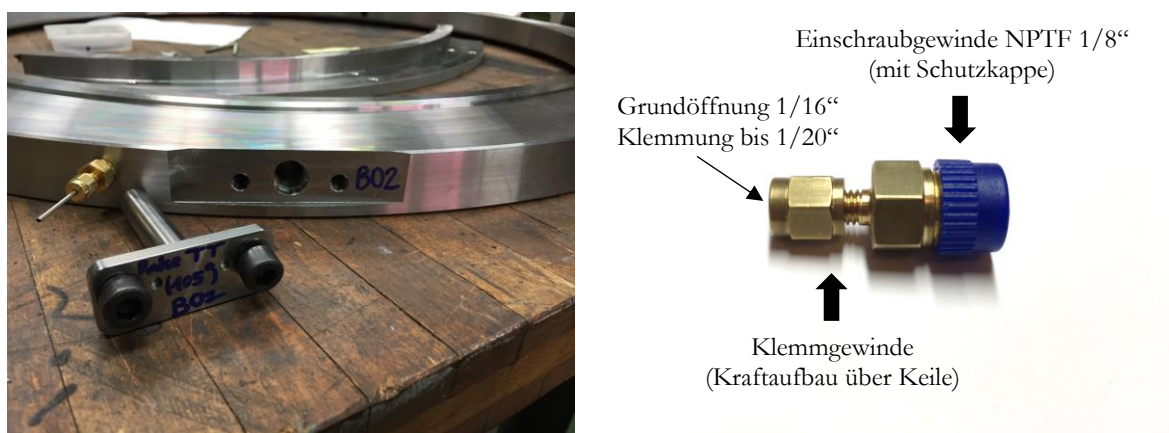


Abbildung 4.25: Fotoaufnahmen eines noch nicht gefrästen Blind Plugs für ein Temperaturregler und von der Instrumentierung der Wanddruckröhrchen mit Hilfe von Schneidringverschraubungen in der Messebene B0 (Instrumentierungsring).

Weiters sind in Abbildung 4.25 noch die bereits am Prüfstand instrumentierten Messsonden PT41B, P241B, BLI41B sowie TT41B in zwei Fotoaufnahmen vom Fwd-Rig im Zuge der Kontrolle bei geöffneter Teilungsebene dargestellt.

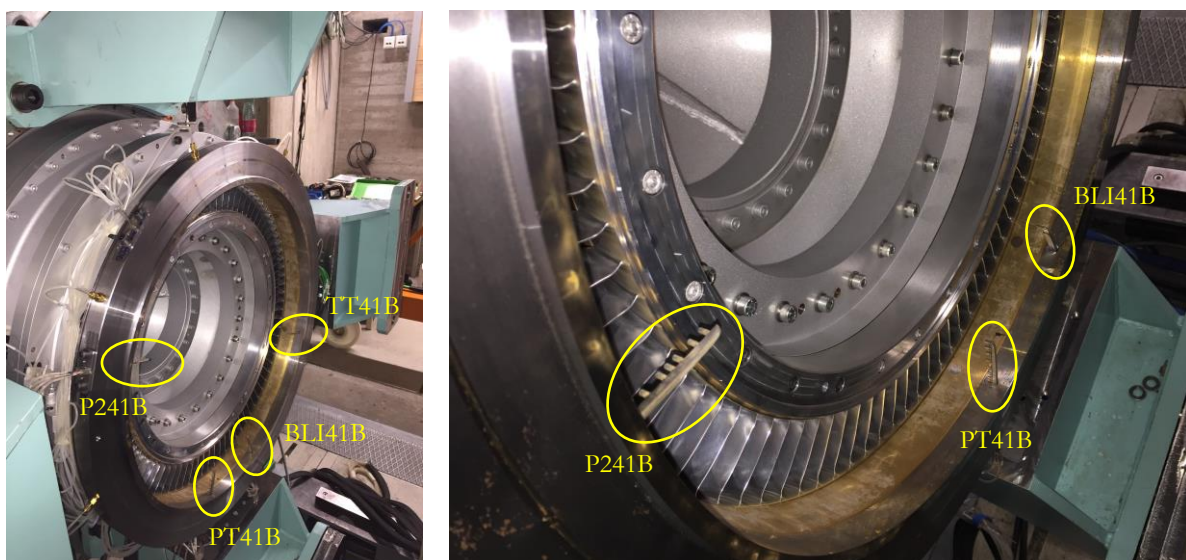


Abbildung 4.26: Fotoaufnahmen der fast komplett instrumentierten Messebene B0 (Instrumentierungsring).

4.3.4 Messebene B

Die Messebene B bzw. 42B liegt direkt am Eintritt in das stationäre TCF und ist daher nicht drehbar. Ihr sind die Leitschaufeln des Hochdruckstators (IGVs) vorgelagert und die Stützschaukeln vom Turbinenübergangskanal nachgelagert. In dieser Ebene kommen als Messsonden das Totaldruckrake PT42B, das Totaltemperaturrake TT42B sowie die beiden Grenzschichtkämme für die Innen- (BLI42B) und Außenkontur (BLO42B) zum Einsatz. Zusätzlich sind in dieser Ebene zum ersten Mal neben den üblichen acht äußeren wandstatischen Druckbohrungen (PST142B bis PST842B) auch acht innere Wanddruckbohrungen (PSH142B bis PSH842B) vorhanden. Die Instrumentierung von letzteren erfolgte gemeinsam mit dem Grenzschichtkamm BLI42B bereits während der in Unterabschnitt 3.2.3.2 beschriebenen Montage des Turbinenübergangskanals. Die Instrumentierung sämtlicher äußeren Wanddruckbohrungen sowie von außen eingeführten Messsonden erfolgt nach dem oben bereits beschriebenen Procedere.

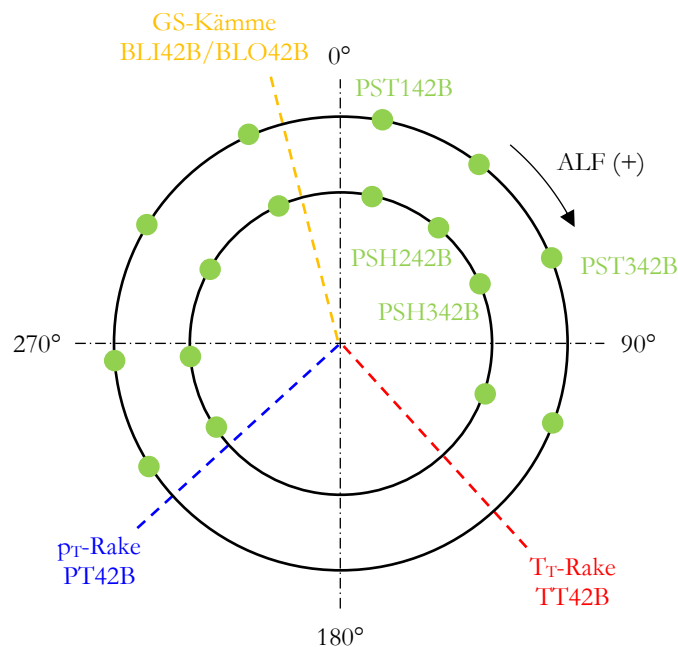


Abbildung 4.27: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene B mit Blick stromaufwärts.

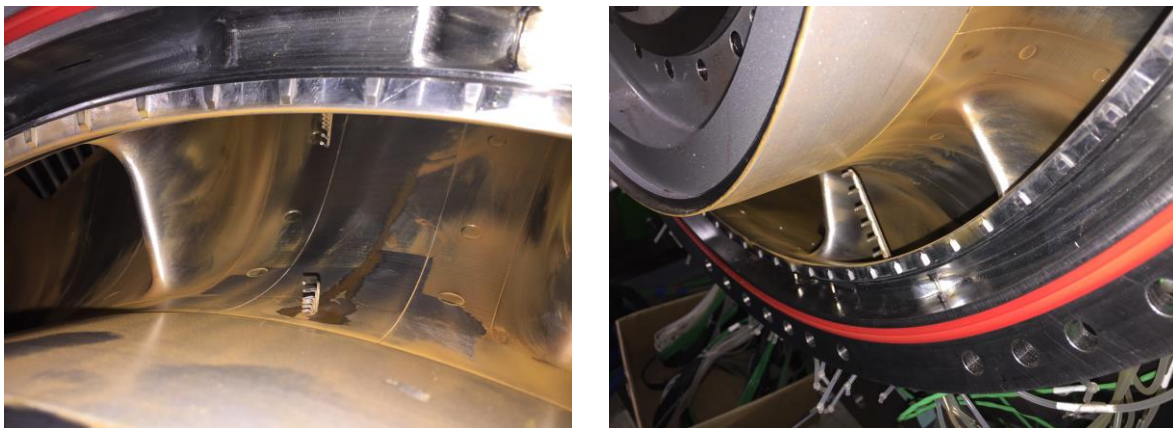


Abbildung 4.28: Fotoaufnahmen der instrumentierten Sonden BLI42B, BLO42B (links) und TT42B (rechts).

4.3.5 Messebene C

Der Instrumentierungsring des Bwd-Rigs bildet die Messebene C und ist die erste um 360° drehbare Messebene nach dem TCF. Als Messsonden kommen hier die Totaldruckrakes PT48C und P248C sowie das Totaltemperaturrake TT48C als auch die beiden Grenzschichtkämme BLI48C und BLO48C zum Einsatz. Deren azimutale Lage innerhalb der Ebene ist in Abbildung 4.29 qualitativ dargestellt. Fotoaufnahmen von der Instrumentierung sind beispielhaft für den inneren Grenzschichtkamm BLI48C (leicht zu erkennen an dem langen Schaft) in Abbildung 4.30 dargestellt. Auch hier stehen aufgrund der guten Zugänglichkeit während der in Unterabschnitt 3.2.3.2 beschriebenen Montage des Mittelteils neben den acht äußeren Wanddruckbohrungen (PST148C bis PST848C) zusätzlich noch acht innere (PSH148C bis PSH848C) zur Verfügung. Die Instrumentierung erfolgt analog zur bereits erfolgten Beschreibung.

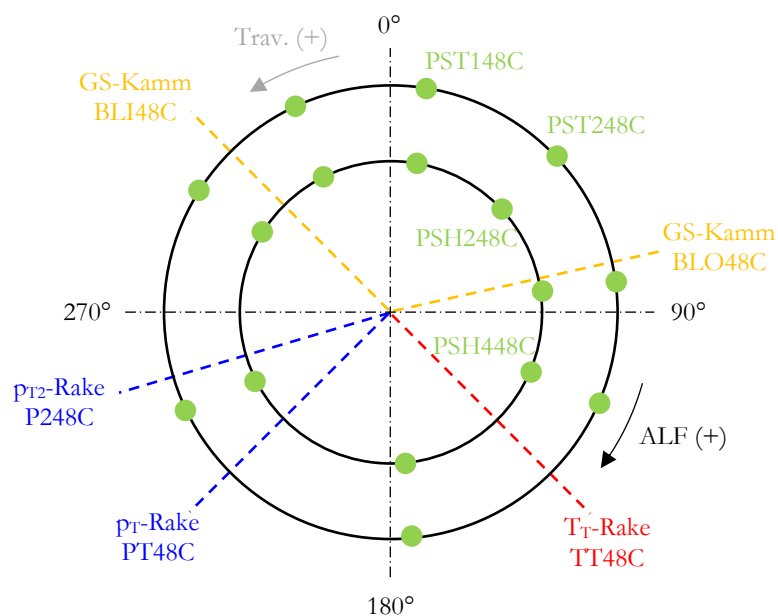


Abbildung 4.29: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene C mit Blick stromaufwärts.



Abbildung 4.30: Instrumentierung des Grenzschichtkammes BLI48C in Messebene C.

4.3.6 Messebene D

Der Messebene D sind die Leitschaufeln des Niederdruckstators (LP Vanes) vor- und die Schaufeln des turbinen-imitierenden stationären Deswirlers nachgelagert. Analog zur Messebene C kann auch diese Ebene gemeinsam mit der Außenkontur des Bwd-Rigs um einen Winkel von 360° umfangstraversiert werden. Da hier keine große Netzfeinheit mehr notwendig ist, werden nur noch zwei Sonden eingesetzt, nämlich das Totaldruckrake PT50D und das Totaltemperaturrake TT50D. An der Ringraumaußenkontur (Tip) stehen acht wandstatische Druckbohrungen (PST150D bis PST850D) zur Verfügung und an der Ringrauminnenkontur (Hub) ebenfalls acht (PSH150D bis PSH850D). Sämtliche von der Außenseite des Prüfstands durchzuführenden Instrumentierungen erfolgen analog zu oben, während jene an der Innenkontur bereits in Unterabschnitt 3.2.3.1 beschrieben wurden.

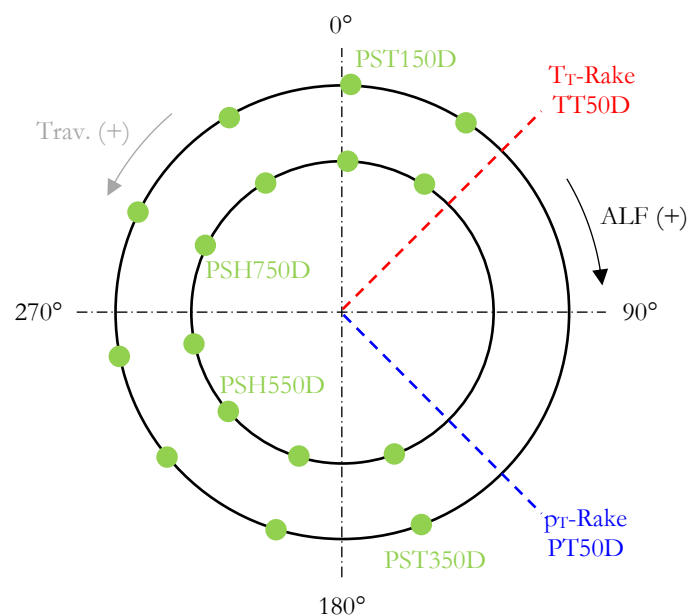


Abbildung 4.31: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene D mit Blick stromaufwärts.

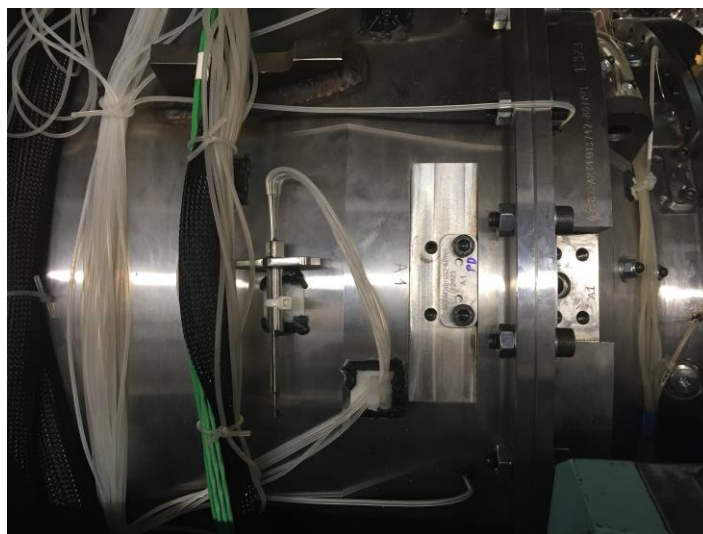


Abbildung 4.32: Fotoaufnahme kurz vor der Instrumentierung der Totaldrucksonde PT50D in Messebene D.

4.3.7 Diffusor

Beim Auslaufdiffusor wird der Schwerpunkt auf den statischen Druck gelegt, welcher zur Überprüfung des Diffusorwirkungsgrades mit dem Flächenverhältnis (Area Ratio) gegenübergestellt werden kann. Hierfür werden insgesamt 54 Wanddruckbohrungen an Außen- und Innenkontur herangezogen, welche gleichmäßig entlang der Wand in einem Abstand von 70mm angeordnet auf vier Umfangspositionen außen (vier Reihen zu je zehn Bohrungen 90° relativ zueinander) und zwei innen (zwei Reihen zu je sieben Bohrungen 90° relativ zueinander) aufgeteilt werden. Zusätzlich wird an einer Umfangsposition ein Totaldruckrake montiert (siehe Abbildung 4.33). Eine Fotoaufnahme des fertig instrumentierten Diffusors von außen ist in Abbildung 4.34 dargestellt.

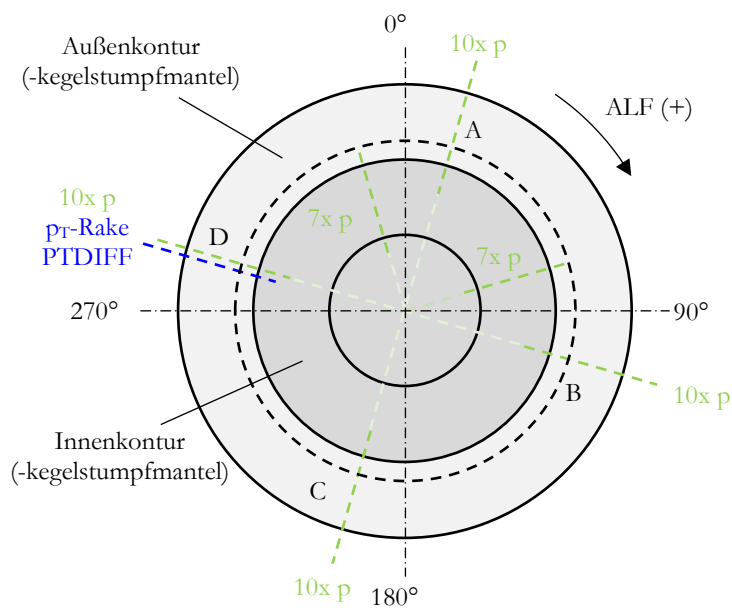


Abbildung 4.33: Qualitative Darstellung der Messpositionen am Diffusor mit Blick stromaufwärts.

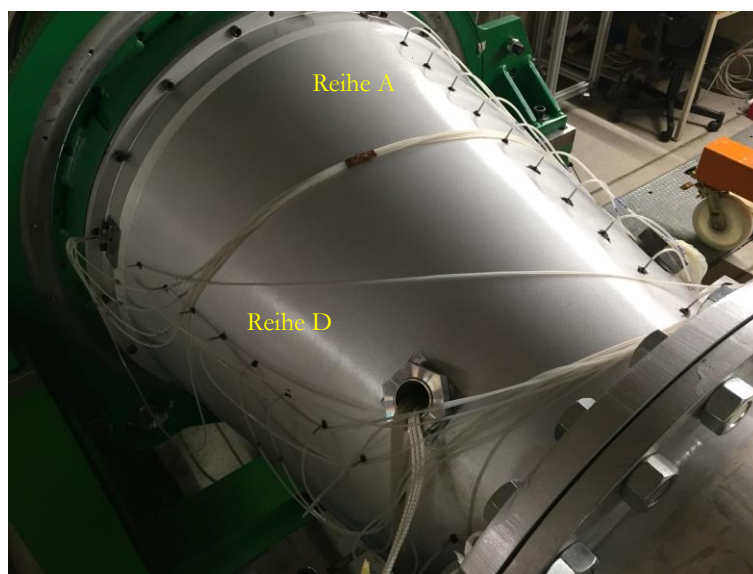


Abbildung 4.34: Äußere Fotoaufnahme der Instrumentierung am Diffusor.

4.4 DATENERFASSUNG UND –VERARBEITUNG

Eine schematische Darstellung der Anlagenschaltung hinsichtlich Prüfstandsregelung und Datenerfassung erfolgt in Abbildung 4.35 für die Anlagenkonfiguration ohne Stäbchenlaufrad und zugehörigem Elektromotor.

In drei Bereichen des Prüfstandes kommen Messsonden zum Einsatz, im Zuströmbereich (inlet) innerhalb vom Einlauf- bzw. Beruhigungskessel und im Abströmbereich (outlet) kurz vor dem Abluftturm, in welchen die Betriebsdatenerfassung (BDE) erfolgt, sowie im Messbereich, welcher sich über die gesamte Ringgitterkaskade erstreckt.

Die BDE im Zuströmbereich erfolgt mittels einer Totaldruckmessung und einer Totaltemperaturmessung, wobei sowohl die Druckleitung als auch das Kabel vom Widerstandsthermometer direkt mit dem CRIO-Schaltkasten (wird weiter unten näher besprochen) verbunden sind. Auch die Sonden für die BDE im Abströmbereich sind mit diesem direkt verbunden, wobei hier zusätzlich neben der Messung des Drucks und der Temperatur eine messtechnische Ermittlung des Massenstromes über eine s.g. Deltaflow-Staudrucksonde erfolgt.

Im Messbereich werden neben Rakes für die Erfassung von Totaltemperaturen und Totaldrücken auch statische Wanddruckbohrungen eingesetzt. Während die Thermoelement-Kabel auch hier mit dem CRIO verbunden werden, erfolgt die Ankopplung sämtlicher Druckschläuche an die PSI-Module, welche als Sensoren für die Umwandlung der erfassten physikalischen Größe „Druck“ in die informationstechnisch verarbeitbare elektrische Größe „Spannung“ zuständig sind, jedoch im Gegensatz zum CRIO keine Steuerungs- bzw. Regelungsaufgaben übernehmen.

Insgesamt gibt es drei dynamisch beanspruchte Dichtstellen. Die erste befindet sich bei der 360°-Umfangstraversierung am Forward-Rig, welche durch einen schleifenden O-Ring realisiert ist. Bei der zweiten handelt es sich ebenfalls um eine 360°-Umfangstraversierung, hier jedoch am Backward-Rig. Diese ist aufgrund des deutlich größeren Umfangs durch eine mittels CRIO elektronisch angesteuerte Luftdichtung (air seal) gekennzeichnet, welche sich während des Betriebs der Anlage unmittelbar vor einem ausgelösten Traversiervorgang automatisch öffnet und nach Abschluss des Vorganges wieder verschließt. Die dritte und letzte Dichtstelle befindet sich am Beginn des stationären Teleskop-Außenrohres, welches das Innenrohr der Ringgitterkaskade aufnimmt. Solange die Anlage nicht in Betrieb und das händisch zu betätigende Ventil der gesamten Druckluftversorgung vom Prüfstand geschlossen ist, kann die Ringgitterkaskade infolge der drucklosen Luftdichtung (air seal) für Wartungs- und Montagearbeiten axial verfahren werden.

Die o.a. Umfangstraversierungen werden durch je einen Elektromotor betrieben, an dessen Antriebsseite ein über ein s.g. Harmonic Drive Getriebe sehr stark untersetztes Ritzel montiert ist, welches in das jeweilige Zahnrad der Ringgitterkaskade eingreift, wodurch sich die Drehbewegung der entsprechenden drehbar gelagerten Komponenten ergibt. Die Ansteuerung der Motoren erfolgt über die in der Versuchswarte installierte ABB-Motorsteuerung mit einem 24V-DC-Modul.

Sowohl die eingesetzten PCs als auch die Motorsteuerung sowie das CRIO und die PSI- bzw. Rack-Module sind über einen s.g. Switch im Ethernet des Instituts miteinander verbunden, wobei jede Komponente über eine statische IP-Adresse direkt angesteuert werden kann.

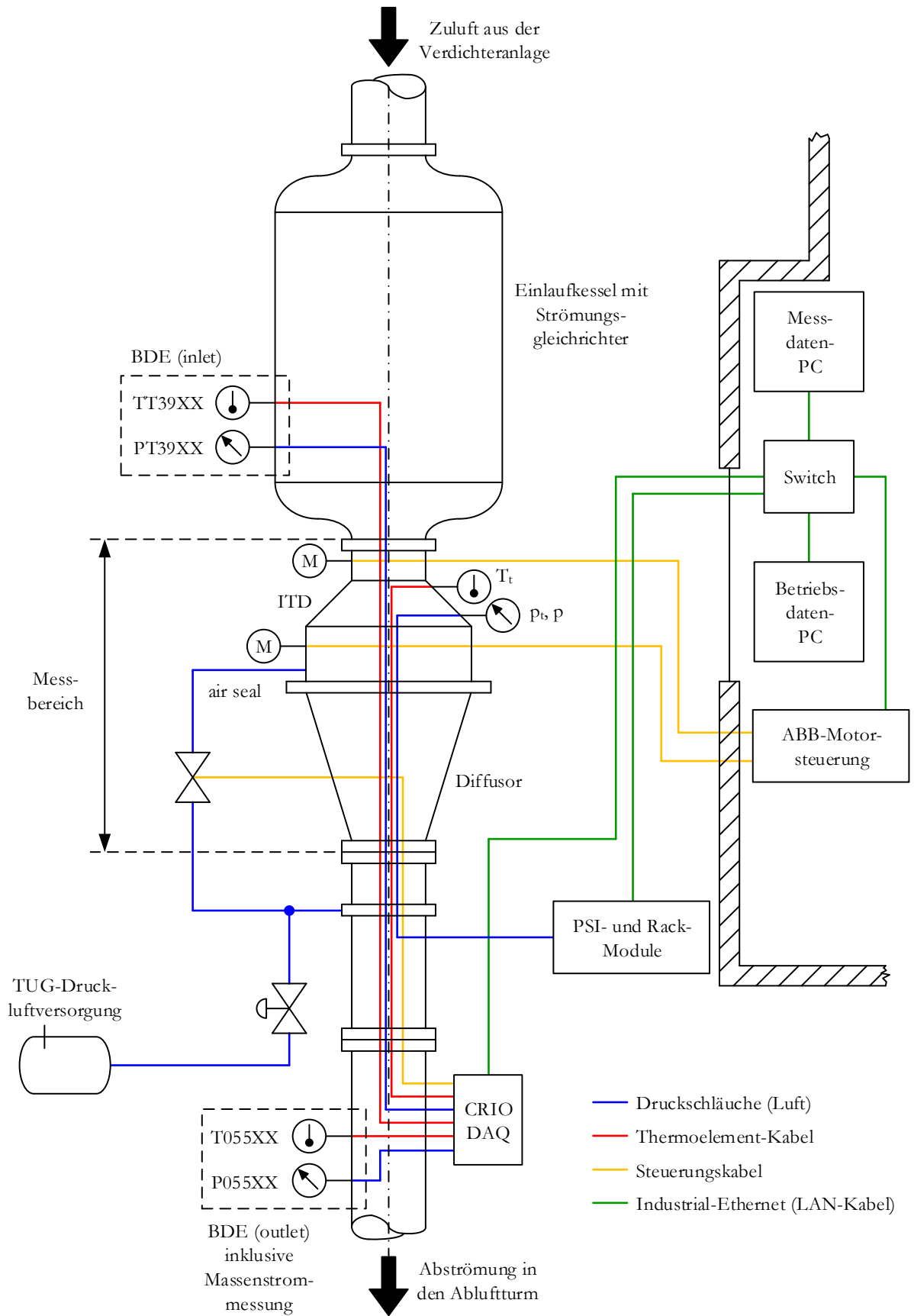


Abbildung 4.35: Anlagenschema der Ringgitterkaskade.

Sowohl die Ansteuerung diverser Prüfstandskomponenten als auch die Datenerfassung erfolgt durch Embedded Controller des Typs CompactRIO der Firma National Instruments. Das s.g. CRIO setzt sich grob aus einem Controller bspw. mit Echtzeitbetriebssystem und einem FPGA sowie rekonfigurierbaren IO-Modulen zusammen. In Abbildung 4.37 links ist der CRIO-Schaltkasten im Aufbaustadium vor der Instrumentierung und Verschaltung dargestellt.

Das Prinzip der Datenerfassung ist in Abbildung 4.36 schematisch dargestellt. Sämtliche während des Anlagenbetriebs erfassten Signale, wie z.B. von den PSI-Modulen in Spannungen umgewandelte Drucksignale oder von den Thermoelementen in Spannungen umgewandelte Temperatursignale, werden in Form eines gesammelten Datenflusses an den Betriebsdaten-PC weitergeleitet. Dieser liest die Rohdaten ein und bereitet diese anschließend auf, wie zum Beispiel durch die Erstellung einer standardisierten Datenmatrix und die Berechnung von zur Betriebspunkteinstellung notwendigen indirekten Messdaten wie den korrigierten Massenstrom aus den direkten Messdaten. Diese aufbereiteten Daten werden anschließend an den Messdaten-PC weitergeleitet. Außerdem führt der Betriebsdaten-PC alle 1,5 Sekunden eine umfassende Datensicherung durch.

Während der Betriebsdaten-PC diese Tätigkeiten ab dem Hochfahren der Anlage bis hin zum Herunterfahren permanent durchführt, erfolgt der aktive Einsatz des Messdaten-PCs lediglich während der tatsächlichen Messung. Die vom Betriebsdaten-PC aufbereiteten Messdaten der Rakes werden auch hier in Echtzeit grafisch dargestellt. Sobald sich ein stabiler Zustand ohne Gradienten eingestellt hat, wird die Messung ausgelöst und mit einer Abtastrate von 200 ms werden 30 Messwerte erfasst und anschließend in einem Messdatenfile im zuvor definierten Verzeichnis abgespeichert. Danach erfolgt automatisch die Traversierung der Messsonden zur nächsten radialen Messlinie am Umfang des Prüfstands und der Prozess beginnt erneut von vorne. Die Traversierkoordinaten werden ebenfalls am Anfang definiert.

Diese gesamte Funktionalität wurde mit der Software LabVIEW der Firma National Instruments durch Erstellung und Programmierung von teils allgemeingültigen und teils spezifisch auf diesen Prüfstand zugeschnittenen virtuellen Instrumenten mitsamt Frontpanels und Blockdiagrammen realisiert. Vor der Inbetriebnahme des Prüfstandes sind daher am Betriebsdaten-PC nachfolgende VIs in der angegebenen Reihenfolge auszuführen:

1. AnCaMain.vi
2. DataAcquisitionAll_AnCa_PSI_CRIO_Rack.vi
3. OnlineVis.vi

Für die Durchführung einer Messung mittels Rakes sind des Weiteren am Messdaten-PC noch folgende VIs bzw. LabView-Bibliotheken (*.llb) vor dem Start der Messung auszuführen:

1. AnCa_Rake_Trav_Airseal.llb
2. RakeMonitoring.vi
3. DataAcquisitionMeas_AnCa_PSI_CRIO.vi

Abbildung 4.37 rechts zeigt eine Aufnahme aus der Warte während der Durchführung einer Versuchsfahrt, in der die unterschiedlichen VIs von Betriebsdaten-PC (Echtzeit-Überwachung des Betriebszustandes) und Messdaten-PC (Steuerung der Traversiervorrichtungen und Auslösung der Messung) zu erkennen sind.

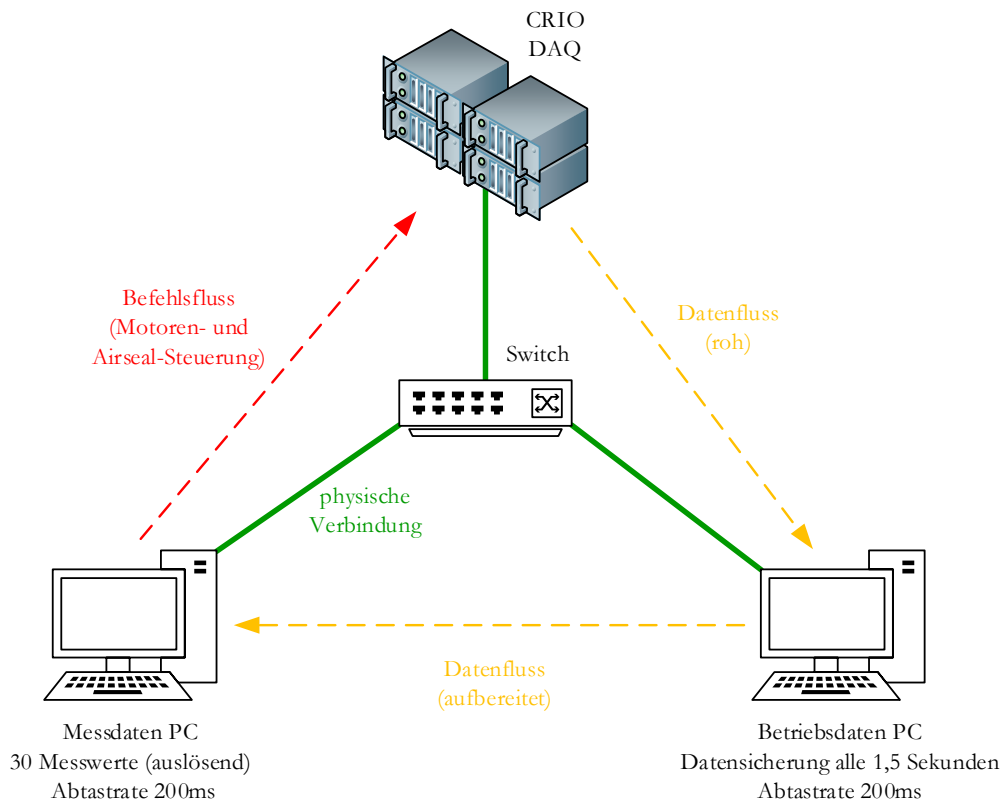


Abbildung 4.36: Schematische Darstellung vom Prinzip der Datenerfassung.

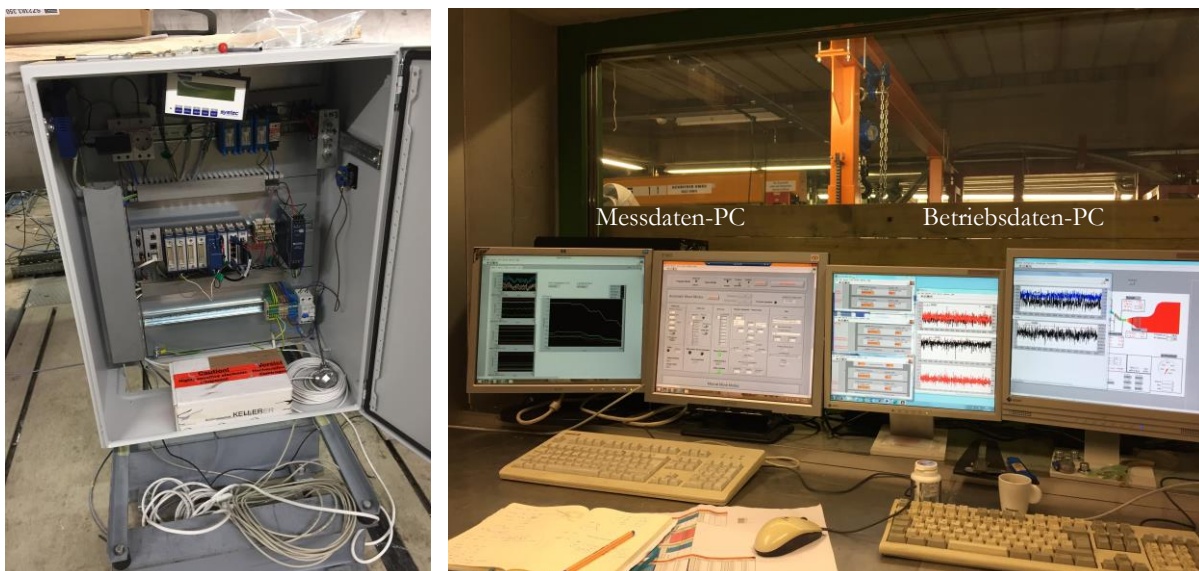


Abbildung 4.37: NI CompactRIO (links) und Versuchswarte (rechts).

5 INBETRIEBNAHME UND INITIALMESSUNG

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Betriebspunkteinstellung vom vorgegebenen Aero Design Point (ADP) des AnCa-Prüfstands eingegangen. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Initialmessung diskutiert, welche zur Verifizierung der Tauglichkeit des Prüfstands für die nachfolgenden Untersuchungen dient. Mit diesem Ziel vor Augen werden sozusagen die „Abnahmekriterien“ Zuströmqualität, TCF-Druckverlust, Austrittsdiffusorgüte und Anlagendruckverlauf für den Fall mit IGVs ohne Speichenrad näher erläutert.

5.1 INBETRIEBNAHME UND BETRIEBSPUNKTEINSTELLUNG

5.1.1 Aero Design Point (ADP) der Ringgitterkaskade

Der AnCa-ADP ist durch die Vorgabe von Werten für die folgenden Größen vollständig definiert:

- Die Totaltemperatur TT41B sollte einen definierten Wert unter 100°C annehmen und im Hinblick auf die Einstellung des Gesamtdruckverhältnisses mit genügend Spielraum nach oben und unten ausgewählt werden.
- Der reduzierte Massenstrom in Ebene B0 ist vorgegeben. Nach (2.35) kann daraus der korrigierte Massenstrom berechnet werden. Das Verhältnis vom korrigierten IST- zum korrigierten SOLL-Massenstrom wird dabei auf 100% eingestellt (→ **Machzahlähnlichkeit**).
- Das **Gesamtdruckverhältnis** π_{tot} ist als Verhältnis vom im Einlaufkessel gemessenen Totaldruck PT39XX zum im Abluftrohr gemessenen statischen Druck P055XX definiert und nach Festlegung der oberen beiden Werte nicht mehr frei wählbar. Es sollte bei der ersten Versuchsfahrt ermittelt und fortan immer gleich eingestellt werden, um den aus Messwerten ermittelten TCF-Druckverlust nicht zu verfälschen.

Die o.a. Richtwerte dienen beim Hochfahren der Anlage zur Betriebspunkteinstellung und werden auch danach noch über den gesamten Verlauf der Versuchsfahrt mit Hilfe des Betriebsdaten-PCs überwacht, um z.B. im Falle der zu erwartenden Temperaturdrift in der Nacht rechtzeitig die notwendige Anlagenregelung vornehmen zu können. Der Verdichteranlage können diese Parameter zwar nicht direkt vorgegeben werden, aber sie erlaubt durch Regelung diverser Leiteinrichtungen, Motordrehzahl und Rückkühlleistung im nachgeschalteten Kühler die Einstellung einer gewünschten Luftmenge bei einer definierten Zulauftemperatur, wodurch sich ein bestimmter Anlagendruck einstellt.

In Abbildung 5.1 sind nun die Verläufe von Totaldruck in Ebene A (Eintritt Ringgitterkaskade) sowie die Totaltemperatur und der korrigierte Massenstrom in der Ebene B0 (= letzte traversierbare Messebene unmittelbar vor dem Eintritt in das TCF) dargestellt. Man erkennt sofort, dass der zeitbestimmende Faktor bei der Betriebspunkteinstellung, welche nicht selten ein Drittel der gesamten Versuchsdauer ausmacht, die Temperatur ist. An einem heißen Sommertag beispielsweise, an dem gegen Abend die Außentemperatur noch ansteigt und die Rückkühlleistung bereits bei 100% liegt, muss der Wendepunkt des Temperaturanstiegs (Abkühlungsbeginn) abgewartet werden, denn erst ab diesem Zeitpunkt kann die Temperatur nach der Verdichteranlage tatsächlich mittels Regelung beherrscht werden.

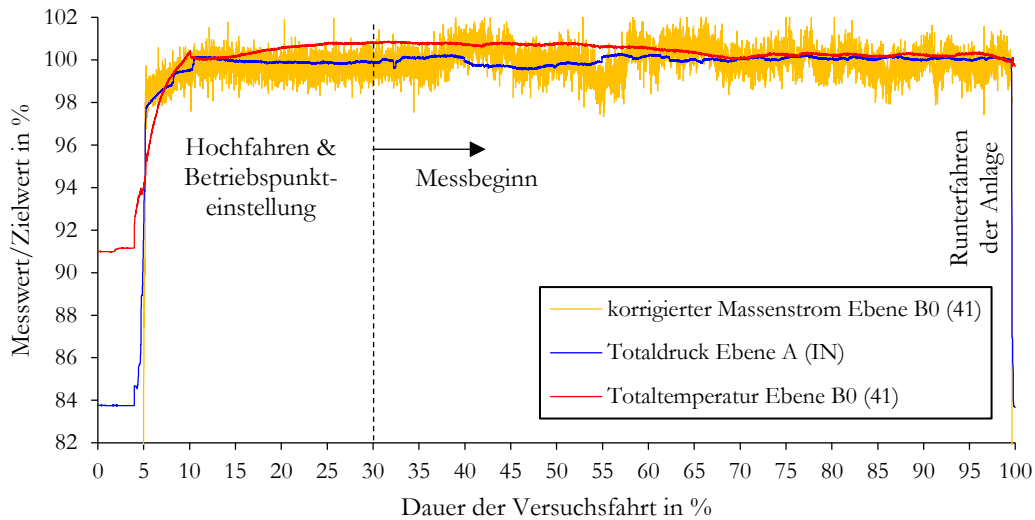


Abbildung 5.1: Betriebskurve der Versuchsfahrt.

Bei genauerer Betrachtung der Hochlaufkurve in Abbildung 5.2 kann man sowohl im Verlauf des korrigierten Massenstromes (blau) als auch in jenem vom Gesamtdruckverhältnis (rot) sehr gut die Zuschaltzeitpunkte der beiden in Serie geschalteten Schraubenverdichter und der beiden parallel geschalteten Turboverdichter erkennen.

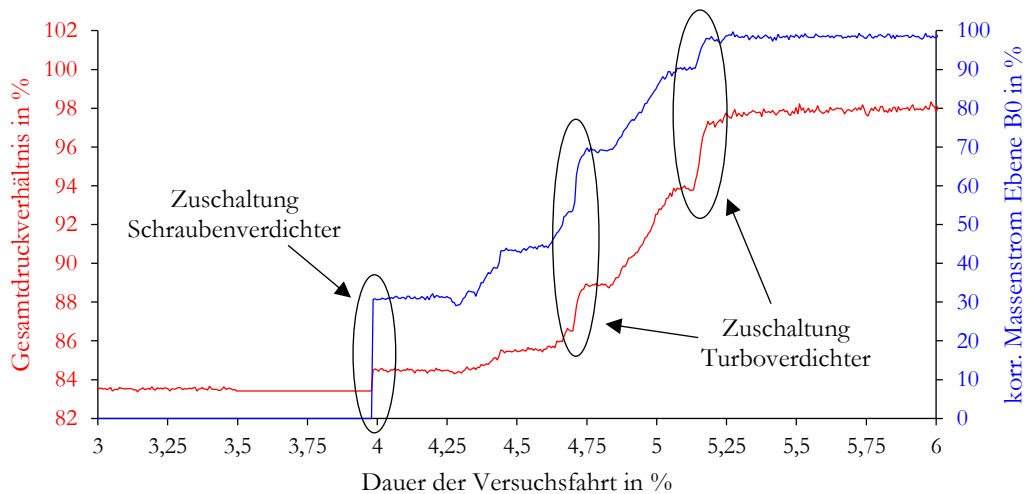


Abbildung 5.2: Hochlaufkurve der Versuchsfahrt.

Während der Messung muss nach jedem Traversiervorgang im Zuge der Echtzeitüberwachung der Kammsonden darauf geachtet werden, dass der manuell auszulösende Messvorgang erst nach erfolgter Stabilisierung der Totaldrücke („Einschleifdauer“) gestartet wird. Abbildung 5.3 zeigt die typischen zeitlichen Totaldruckverläufe in den Ebenen A, B0 und C. Während der Totaldruck in Ebene A aufgrund fehlender Hindernisse stromaufwärts sehr homogen verläuft, sind in den Verläufen der Ebenen B0 und C deutlich die Zeitpunkte zu erkennen, an denen die Rakes die Nachläufe der vorgelagerten IGV- bzw. TCF-Schaufeln passiert haben. Beim feinen Auflösen der Verläufe kann man die Einschleifdauern deutlich erkennen, welche bei der Initialmessung im Schnitt ungefähr 40 Sekunden betragen.

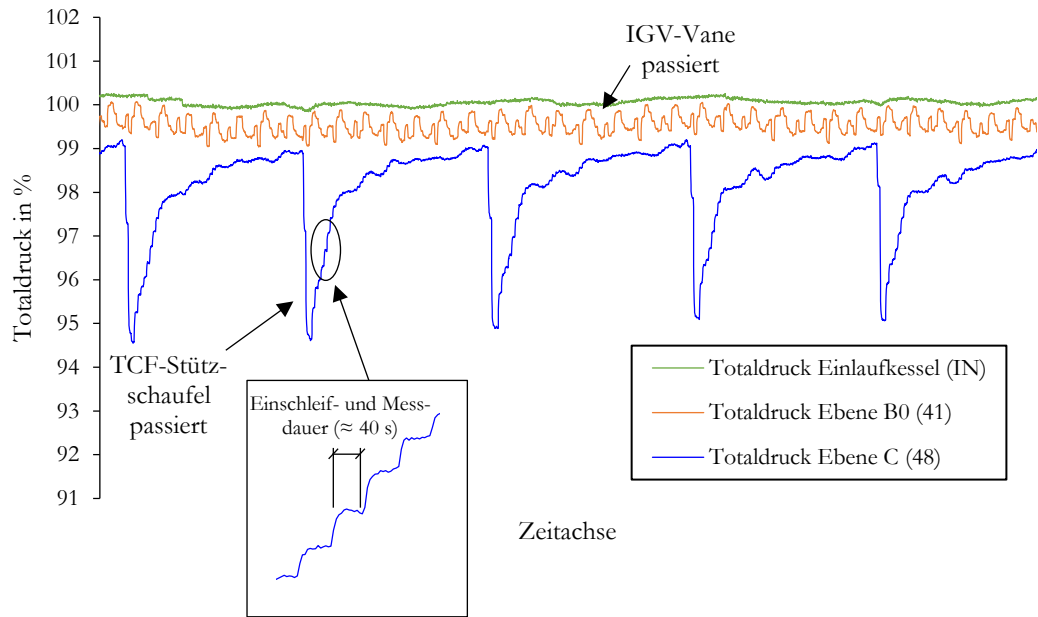


Abbildung 5.3: Detaillierte Darstellung der Einschleif- und Messdauern innerhalb der Betriebskurve.

5.2 INITIALMESSUNG

Die Initialmessung wurde neben den über sämtliche Versuchsfahrten dauerhaft eingesetzten Messonden (wandstatische Druckbohrungen sowie Sonden im Zu- und Abluftbereich) mit Hilfe der instrumentierten Totaldruck- und Totaltemperaturrekes in den Ebenen A (IN), B0 (41), B (42), C (48) und D (50) im Nennpunkt (ADP) durchgeführt, wobei sämtliche traversierbaren Kammsonden zeitsynchron verfahren wurden. Die Traversierung erfolgte über den gesamten Umfang (360°) und es wurden insgesamt 720 radiale Messlinien angefahren (= azimutale Netzfeinheit bzw. Traversierschrittweite von $0,5^\circ$). Dies in Kombination mit der zur Stabilisierung der Echtzeit-Messwerte benötigten Einschleifdauer nach jeder Traversierung bzw. vor dem Start einer lokalen Messung bestimmt die Gesamtmessdauer.

5.2.1 Messraster

Der Messraster spannt sich durch Kombination der Anzahl der radial angeordneten Pitot-Röhrchen bzw. Thermo-elemente an einem Rake und den im Laufe der Versuchsfahrt mittels Traversierung angefahrenen Umfangspositionen auf. Da an einem Rake aus Platz- und Fertigungsgründen keine beliebig feine radiale Auflösung realisiert werden kann, wurde auf die in Abschnitt 2.4.2 angesprochene Problematik mit dem Measurement Grid Selection Error in Bezug auf die messtechnische Ermittlung des TCF-Druckverlustes insofern reagiert, dass die hierfür relevanten Messebenen B0 und C nicht mit einem sondern mit zwei Totaldruckrakes mit unterschiedlichen Radialpositionen ihrer Pitot-Röhrchen ausgestattet wurden (siehe Abschnitte 4.3.3 und 4.3.5), sodass sich durch Kombination der beiden Rakes bei der Auswertung der Messergebnisse ein doppelt so feines Netz ergibt, für das auch der angegebene Restfehler gültig ist.

Da bei einer Messung mittels Fünflochsonde (FLS) bzw. Five Hole Probe (FHP) neben der 3D-Anströmungsrichtung sich auch die Totaltemperatur und der statische Druck aus der Kalibrierung berechnen lassen, ist somit auch die lokale Dichte bekannt und damit eine Massenmittelung über den Messraster möglich. Bei der Messung mit Rakes hingegen ist sowohl die lokale Totaltemperatur am Messpunkt aufgrund der i.d.R. unterschiedlichen Netzfeinheit von Totaldruck- und Totaltemperaturrekes als auch der lokale statische Druck (statische Wanddruckbohrungen nur an der Ringraumkontur) unbekannt, was dazu führt, dass bei der Auswertung von Rake-Messungen immer die **Flächenmittelung** zum Einsatz kommt. Das Prinzip dahinter ist in der nachfolgenden Abbildung 5.4 schematisch dargestellt. Die Reduktion des 2D-Messrasters (farbiger Konturplot) auf eine 1D-Linie (Messgrößenverlauf über den Ringraumradius) erfolgt über die **Umfangsmittelung** und von dort auf einen 0D-Punkt (repräsentativer Wert) über die **Radialmittelung**.

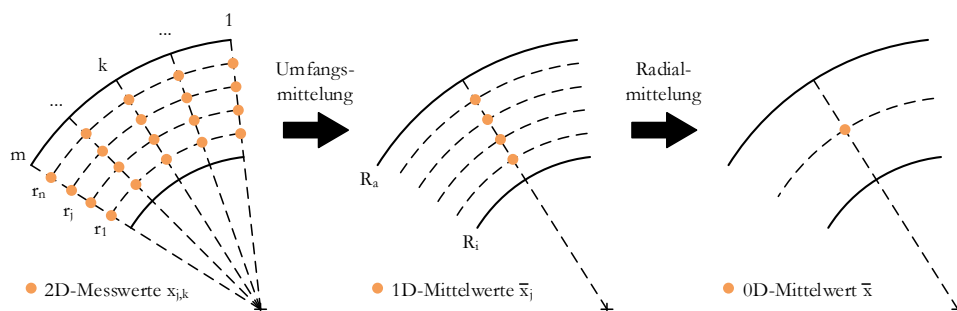


Abbildung 5.4: Flächenmittelung anhand einer Kreisring-Messebene im Ringraum für Rake-Messungen.

D.h. der Einfluss eines lokal erfassten Messpunktes auf das Gesamtergebn wird anhand der von diesem in der Messebene eingenommenen Fläche (Bogenlänge entlang desselben Radius und Kreisringfläche über den Radius) gewichtet. Im Zuge dieses Verfahrens werden auch s.g. „Ausreißer“ durch einen Vergleich ihrer Abweichung zu einer vorgegebenen Anzahl vor- und nachgelagerter Messpunkte bei Überschreiten einer bestimmten Fehlergrenze automatisch aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Das Vorgehen bei den beiden o.a. Mittelungsmethoden soll nun anhand der schematischen Darstellung eines einzelnen Messpunktes j,k in Abbildung 5.5 etwas genauer beschrieben werden.

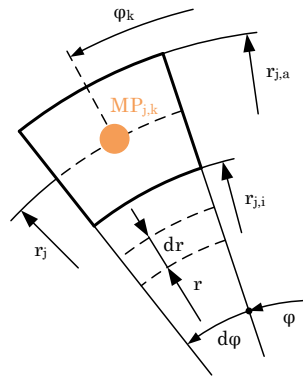


Abbildung 5.5: Definition des Integrals eines Kreisringsektors um einen beliebigen Messpunkt j .

Für die **Umfangsmittelung** \bar{x}_j entlang des festen Radius r_j lässt sich anhand eines infinitesimal kleinen Kreisringsegments die vom Messpunkt eingenommene Bogenlänge $b_{j,k}$ über den Traversierwinkel φ_{Trav} bestimmen.

$$b_{j,k} = \int_0^{\varphi_{Trav}} \int_0^{r_j} dr d\varphi = r_j \cdot \varphi_{Trav} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = r_j \cdot \frac{360^\circ}{720} \cdot \frac{2\pi}{360^\circ} = r_j \cdot \frac{\pi}{360} \quad (5.1)$$

Die einzelnen Anteile werden nun auf die gesamte Bogenlänge bezogen. Bei einer gleichmäßigen Traversierung (wie hier der Fall) mit konstanter Schrittweite entspricht diese Form der Mittelung exakt der arithmetischen Mittelung.

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^m x_{j,k} b_{j,k}}{\sum_{k=1}^m b_{j,k}} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{j,k} b_{j,k}}{b_j} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{j,k} \cdot r_j \frac{\pi}{360}}{r_j \cdot 2\pi} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{j,k}}{720} \quad (5.2)$$

Pro umfangsgemittelten Radiuswert \bar{x}_j der entsprechenden Messgröße lassen sich nun im Zuge der **Radiusmittelung** \bar{x} anhand der Anordnung der Pitot-Röhrchen bzw. Thermoelemente auf einem (einzelnen oder fiktiv kombinierten) Rake die zugehörigen Kreisringflächen auf die gesamte Kreisringfläche der Messebene im Ringraum beziehen.

$$A_j = \int_0^{2\pi} \int_{r_{j,i}}^{r_{j,a}} r dr d\varphi = 2\pi \cdot \frac{r^2}{2} \Big|_{r_{j,i}}^{r_{j,a}} = (r_{j,a}^2 - r_{j,i}^2)\pi \quad (5.3)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{x}_j A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{x}_j A_j}{A} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{x}_j \cdot (r_{j,a}^2 - r_{j,i}^2)\pi}{(R_a^2 - R_i^2)\pi} \quad (5.4)$$

Damit steht nun ein für die Messebene repräsentativer und gewichteter Wert zur Verfügung, welcher bspw. für die Berechnung vom TCF-Druckverlust herangezogen werden kann.

5.2.2 Bewertung der Qualität der Zuströmung

Neben der Einstellung des korrekten ADPs ist aufgrund der Forderung nach einem Clean Inflow vor allem eine hohe Zuströmqualität ein essenzielles Bewertungskriterium im Zuge der Erstinbetriebnahme der Ringgitterkaskade. Im Folgenden wird diese anhand der Messdaten in Ebene A beurteilt. Hierfür sind nun in Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 die entsprechenden Konturplots (= 2D-Messraster) für Totaldruck und -temperatur dargestellt.

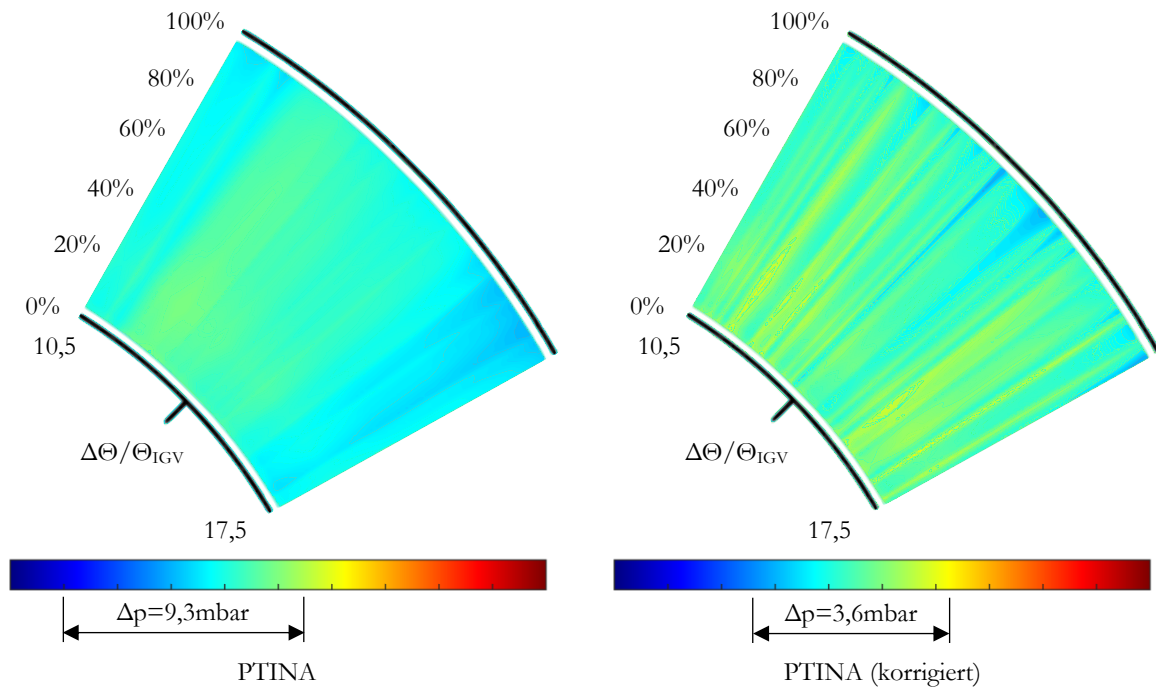


Abbildung 5.6: Konturplot vom Totaldruck in Ebene A unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts).

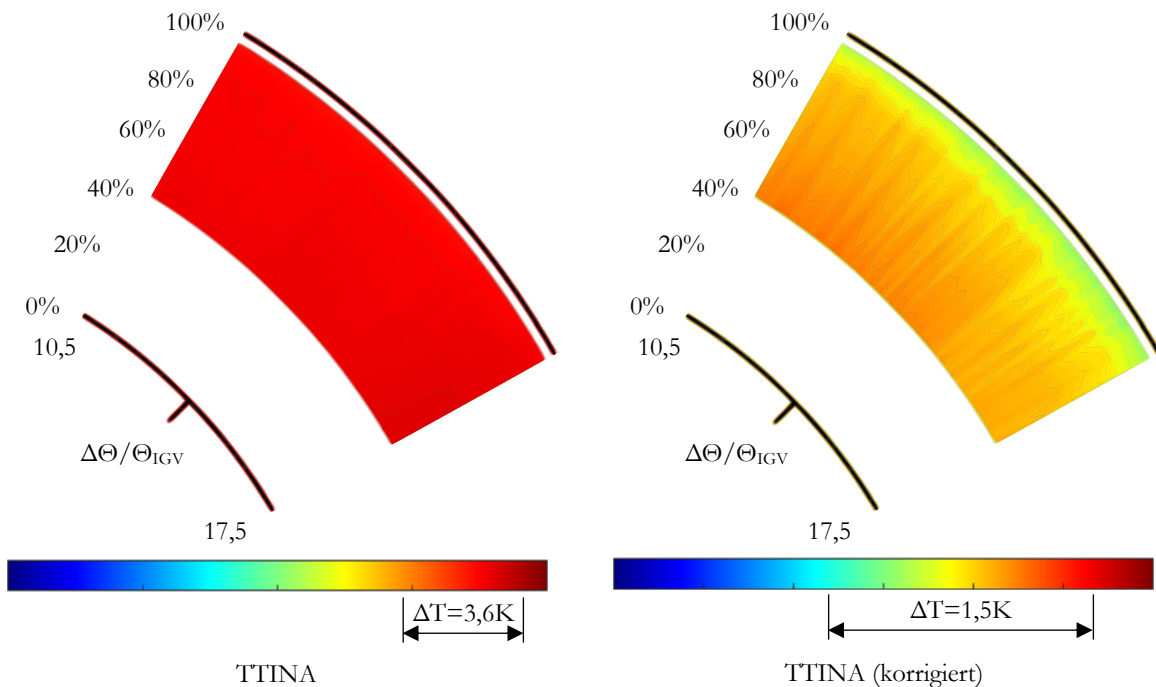


Abbildung 5.7: Konturplot von der Totaltemperatur in Ebene A unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts).

Für eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse wurde hierfür ein Winkelbereich gewählt, der genau noch eine TCF-Stützschaufel miteinschließt (an der ALF-Position 14-facher Teilungswinkel der IGVs). Auch hier ist der Blick wie üblich stromaufwärts gerichtet. Auf der linken Seite sind die Rohdaten der erfassten Messwerte und auf der rechten Seite die tages- und betriebspunktkorrigierten Messdaten grafisch dargestellt.

Bei genauerem Vergleich der Plots fällt auf, dass sowohl bei Totaldruck als auch bei Totaltemperatur die Messwerte einerseits infolge der Tageskorrektur auf ein anderes Niveau gehoben werden und andererseits infolge der Betriebspunktkorrektur aufgrund einer „Glättung“ des Betriebspunktes über die Messdauer feiner aufgelöst werden können.

Die Wichtigkeit der Betriebspunktkorrektur soll nun anhand der grafischen Darstellung der radial gemittelten Totaldruckverläufe vom Einlaufkessel und von Ebene A über den zeitlichen Verlauf der Messung bzw. über den mittels Traversierung zurückgelegten Umfangsweg in Abbildung 5.8 verdeutlicht werden.

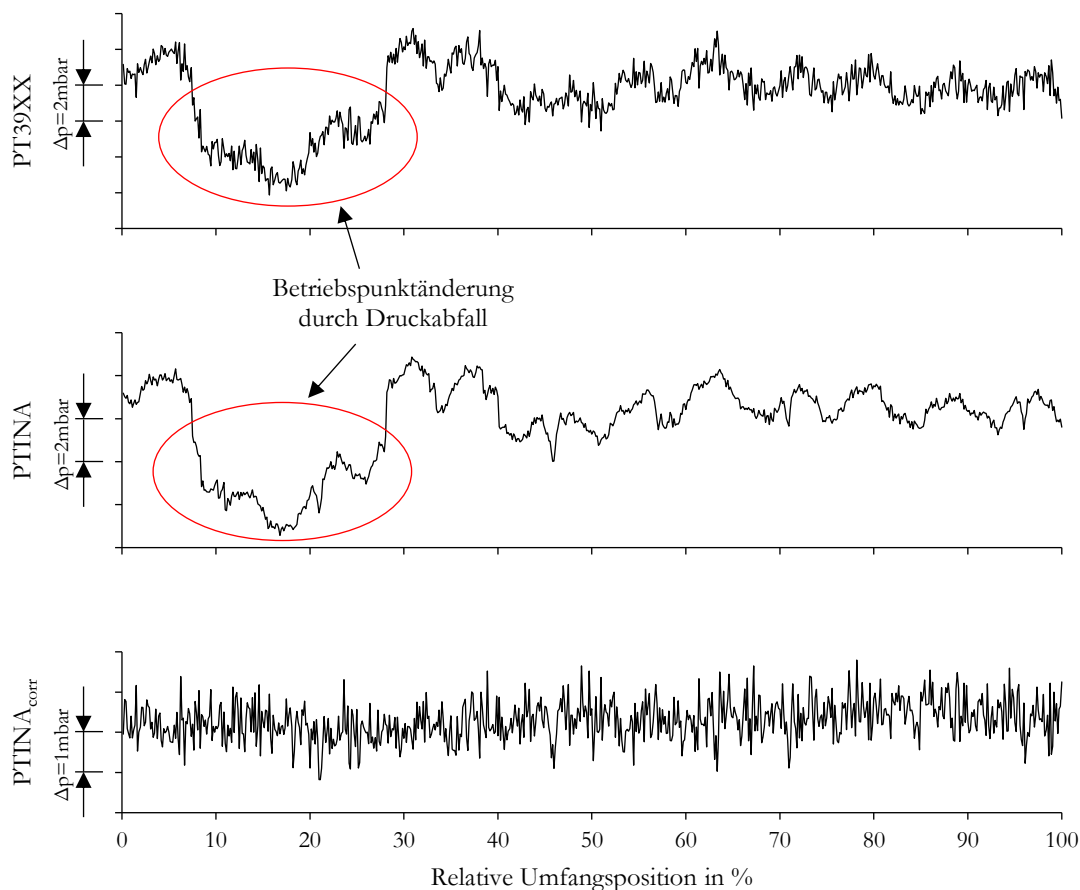


Abbildung 5.8: Grafische Darstellung der Tages- und Betriebspunktkorrektur beim Totaldruck in Ebene A.

Ganz oben ist der radial gemittelte Totaldruckverlauf im Einlaufkessel (Ebene 39) dargestellt. Man erkennt deutlich, dass bereits kurz nach Beginn der Messung ein (relativ) deutlicher Druckabfall (Betriebspunktänderung) stattgefunden hat, welcher insgesamt ca. 20 % der gesamten Messdauer angedauert hat. Dieser Druckabfall macht sich logischerweise natürlich auch in der Messebene A in der gleichen Art und Weise bemerkbar, wodurch eine Lokalisierung und auch Korrektur derartiger Schwankungen möglich gemacht wird. Beispielhaft soll nun die hierfür notwendige Gleichung

anhand des radialen Mittelwerts bei etwa 17% der Messdauer nach (2.19) angeschrieben werden, wo sich die Messsonde PTINA ungefähr im Bereich von ALF-180° befunden hat.

$$PTINA_{mean,17\%,corr} = PTINA_{mean,17\%} \cdot \frac{PT42B_{ref}}{PT42B_{mean}} \cdot \frac{PT39XX_{mean}}{PT39XX_{meas,17\%}}$$

Der somit erhaltene korrigierte Verlauf ist in Abbildung 5.8 (unten) dargestellt. Ohne die Schwankungen im Betriebspunkt steigt die Auflösung der Messwerte infolge einer Annäherung der Minima und Maxima zueinander.

Bei den in Abbildung 5.7 dargestellten Konturplots der Totaltemperatur in Ebene A ist zu erkennen, dass zwei der unteren Thermoelemente ausgefallen sind. Da jedoch das unterste Thermoelement noch funktioniert hat und demnach lediglich der Übergang bis zu diesem fehlt, sind die Ausfälle verkraftbar. Viel interessanter hingegen ist ein Phänomen, welches zwar nicht aufgrund des kleinen Winkelausschnitts im obigen Konturplot, dafür aber im Verlauf der Radialmittelwerte von der Totaltemperatur über die Messdauer bzw. den Traversierweg in Abbildung 5.9 zu sehen ist.

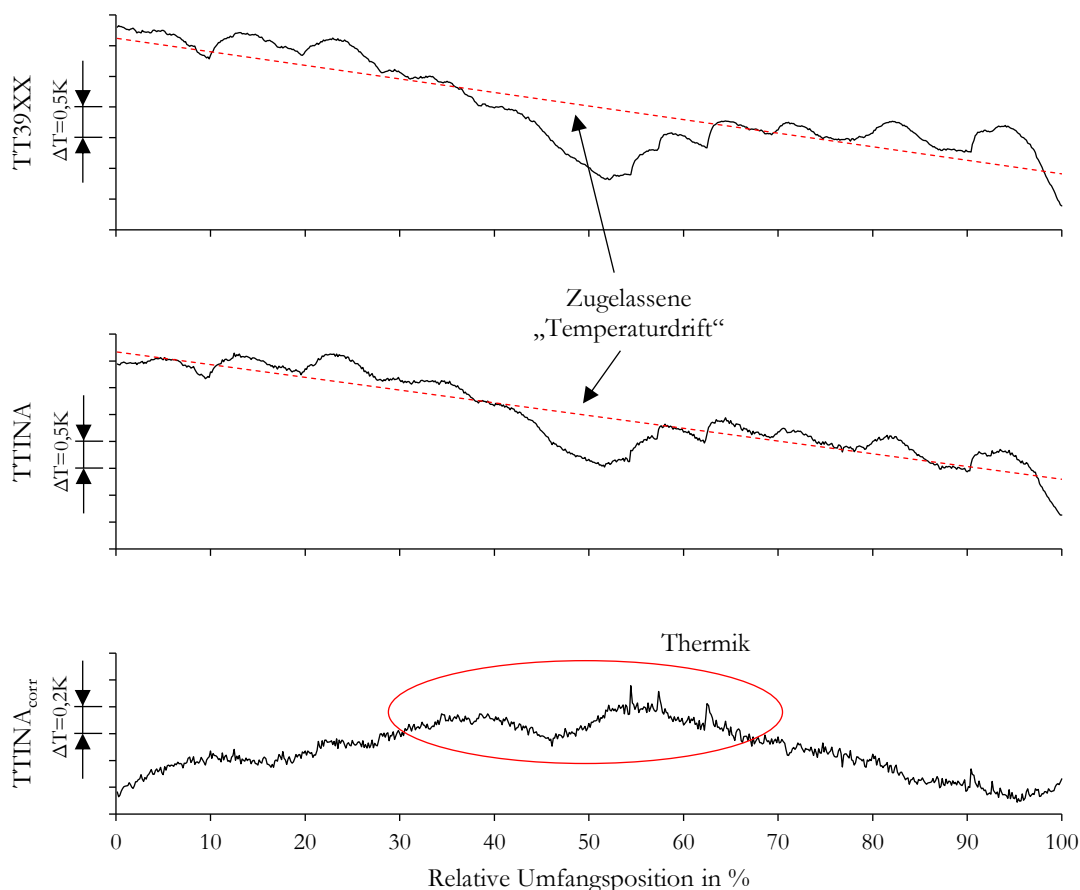


Abbildung 5.9: Grafische Darstellung der Tages- und Betriebspunktkorrektur bei der Totaltemperatur in Ebene A.

Die Betriebspunktkorrektur erfolgt analog mit (2.20), nur dass hier kein „Loch“ in der Betriebskennlinie, sondern vielmehr eine „Drift“ der Totaltemperatur zu erkennen ist, welche typisch für Nachtversuchsfahrten ist und in einem gewissen Rahmen ohne Einregelung der Rückkühlanlage zugelassen wird. Nach erfolgter Korrektur kann man nun im untersten Verlauf der Totaltemperatur sehr gut einen „Peak“ bei etwa 50 % der Messdauer erkennen. Das Totaltemperaturrake TTINA hat seine Nullposition zu Beginn einer Versuchsfahrt bei etwa ALF-180°. D.h. die Sonde

wird zwischen 25 % und 75 % der Messdauer von ALF-90° über ALF-0° bis hin zu ALF-270° gegen den Uhrzeigersinn traversiert und befindet sich demnach in diesem Zeitraum in der oberen Hälfte der Ringgitterkaskade. Es kann daher durchaus sein, dass sich im Einlaufkessel aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten in einem kleinen Ausmaß ein Thermik-Effekt einstellt ($\Delta T \approx 0,6$ K), wodurch warme Luft aufgrund geringerer Dichte in den oberen Bereich aufsteigt und von dort aus ohne nennenswerte Vermischung mit der (relativ) kälteren Luft des unteren Bereichs in die Ringgitterkaskade beschleunigt wird.

Der Clean Inflow verlangt nach einer in hohem Ausmaß gleichmäßigen bzw. homogenen Zuströmung, welche sich in Bezug auf den Schwerpunkt TCF-Druckverlust-Bestimmung natürlich vor allem anhand des Totaldruckverlaufs beurteilen lässt. Hierfür sind nun in der unteren Abbildung 5.10 die umfangsgemittelten Messwerte für Totaldruck und -temperatur für die Sonden PTINA und TTINA in roher und korrigierter Form über die relative Kanalhöhe dargestellt. Der über zusätzliche Radialmittelung erhaltene repräsentative Mittelwert ist jeweils als rot-strichlierte Linie erkennbar.

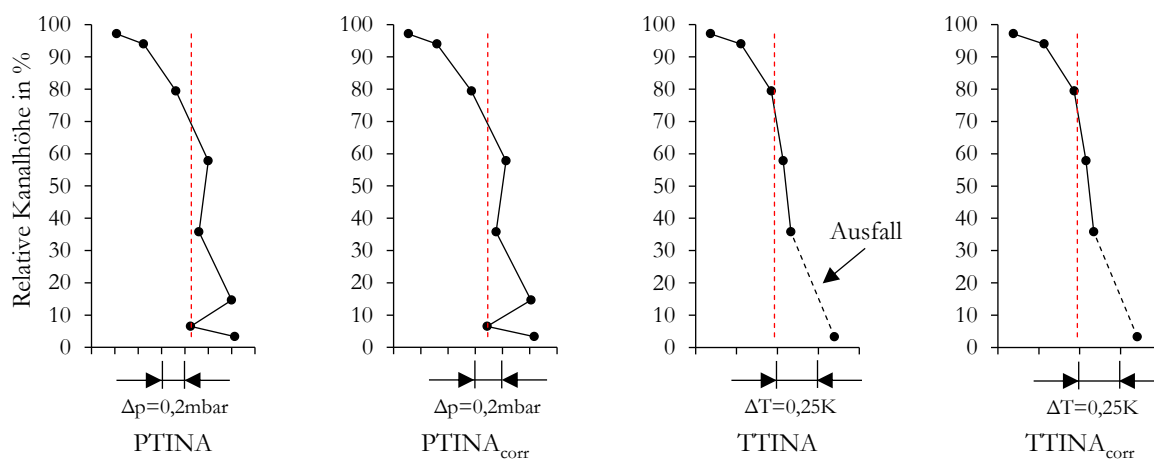


Abbildung 5.10: Radiale Verläufe (schwarz/Umfangsmittelung) und Ringraummittelwerte (rot/Radialmittelung) von Totaldruck und -temperatur (unkorrigiert/korrigiert) in Ebene A über der prozentualen Kanalhöhe.

Die beiden bereits zuvor erwähnten ausgefallenen Thermoelemente sind in den Totaltemperaturverläufen anhand der schwarz-strichlierten Linie zu erkennen, welche eine „angenommene“ Verbindungslinie zum untersten Messwert vom noch intakten Thermoelement darstellt. Im Einlaufbereich um die Messebene A wird die Luft in Richtung ITD beschleunigt. Der Totaldruckverlauf zeigt einen leichten Druckanstieg von der Außenkontur (Tip) in Richtung der Innenkontur (Hub), wobei der gemessene Druck bei ca. 6,5 % der Kanalhöhe einen minimalen Ausreißer darstellen könnte, was in dieser Größenordnung vermutlich weniger auf eine lokale Falschanströmung sondern vielmehr auf eine geringfügige Versperrung entweder des Pitot-Rohrs selbst oder des angeschlossenen Druckschlauchs schließen lässt, was beim Einschleifvorgang zu einer größeren Trägheit und damit längeren Einschleifdauer im Vergleich zu den anderen nicht verlegten Leitungen führt. Generell kann die Zuströmung jedoch durchaus als homogen bewertet werden, da die mittlere Abweichung der Umfangsmittelwerte zum repräsentativen Radialmittelwert nur 0,02 % beträgt.

5.2.3 Ermittlung vom TCF-Druckverlust

Hauptaufgabe der Ringgitterkaskade ist die Ermöglichung der Erzeugung eines Clean Inflows sowie verschiedener Verlustmechanismen vor dem Eintritt in den Turbinenübergangskanal, um dessen Druckverlust in seine Hauptanteile aufsplitten zu können. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, konzentriert sie sich nur auf die qualitative Bewertung der hier zu erwartenden Verlustmechanismen und die Berechnung des TCF-Druckverlustes zwischen den Ebenen B0 und C unter zusätzlicher Angabe der erwarteten Messunsicherheiten und des Vertrauensbereichs für die stationäre Prüfstandskonfiguration mit IGVs. Für die qualitative Bewertung werden in erster Linie die Konturplots von Totaldruck und -temperatur in der ITD-Eintrittsebene B0 sowie in der ITD-Austrittsebene C in Abbildung 5.11 bis Abbildung 5.14 näher betrachtet.

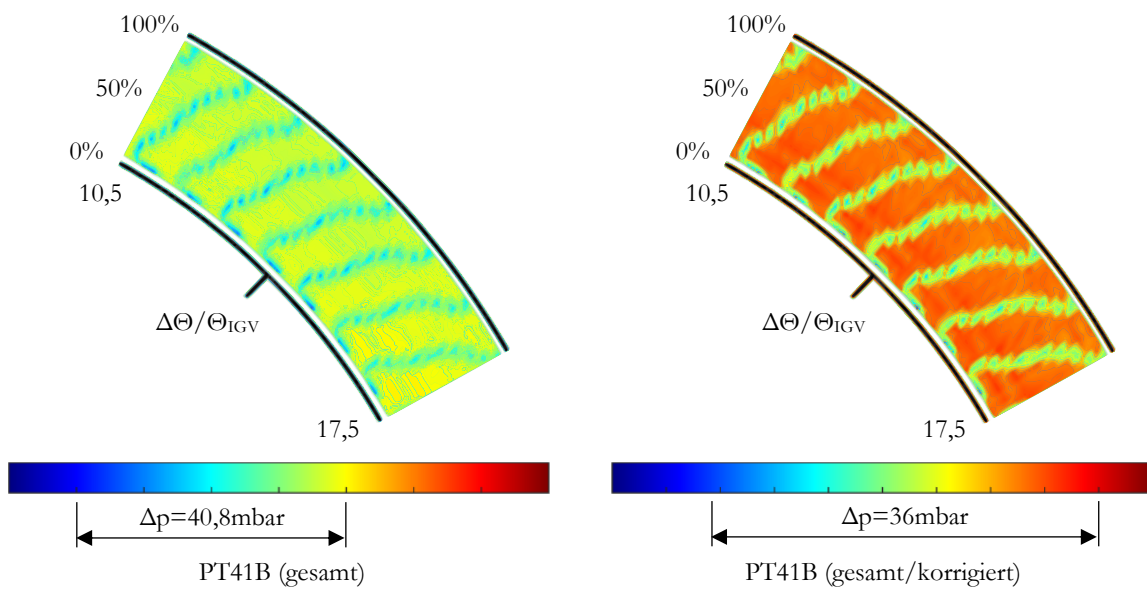


Abbildung 5.11: Konturplot vom Totaldruck in Ebene B0 unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts).

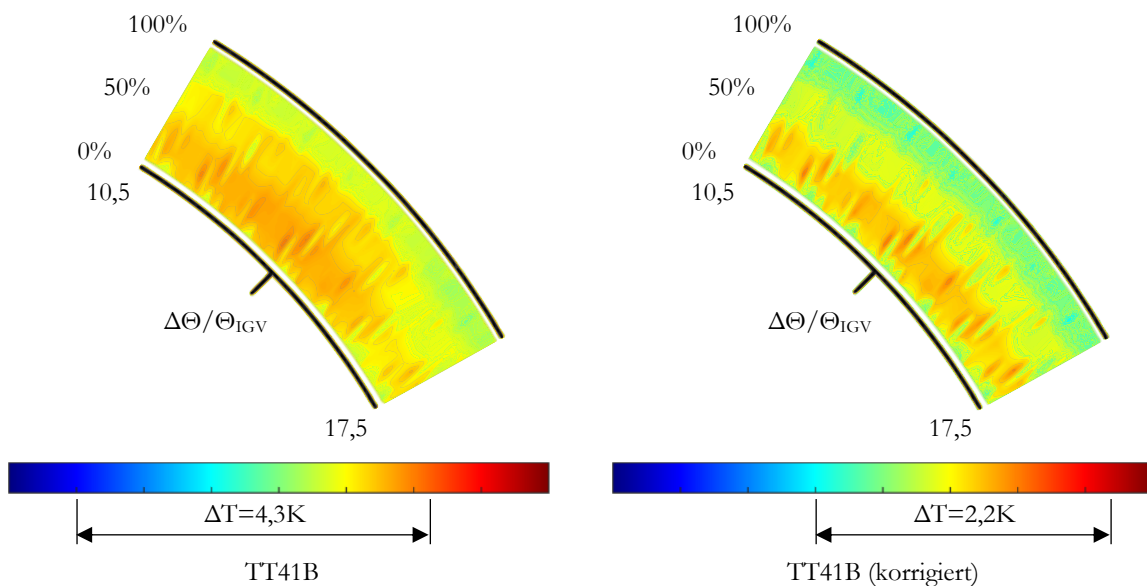


Abbildung 5.12: Konturplot von der Totaltemperatur in Ebene B0 unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts).

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es sich hier bei sämtlichen Druckverläufen bereits um das durch Kombination der Rakes PT41B und P241B bzw. PT48C und P248C verfeinerte radiale Messgitter handelt, welches zur Reduktion des „Measurement Grid Selection Errors“ dient. Auch hier ist analog zum vorherigen Abschnitt vor allem beim Totaldruck eine deutliche Verfeinerung der Auflösung infolge der Betriebspunktkorrektur erkennbar.

Im korrigierten Totaldruckplot von Ebene B0 bzw. 41 in Abbildung 5.11 (rechts) sind trotz größerer radialer Auflösung im Vergleich zur Fünflochsonde deutlich die zu erwartenden Nachläufe (Wakes) der Inlet Guide Vanes (IGVs) zu erkennen, welche sich in einem Druckabfall gegenüber der Kernströmung äußern. Im korrigierten Totaldruckplot von Ebene C bzw. 48 in Abbildung 5.13 (rechts) ist die ebenfalls zu erwartende Ausbildung des für Übergangskanäle mit Stützschaufeln typischen Verlustkerns zu erkennen, welcher bereits im Unterkapitel 2.2 thematisiert wurde.

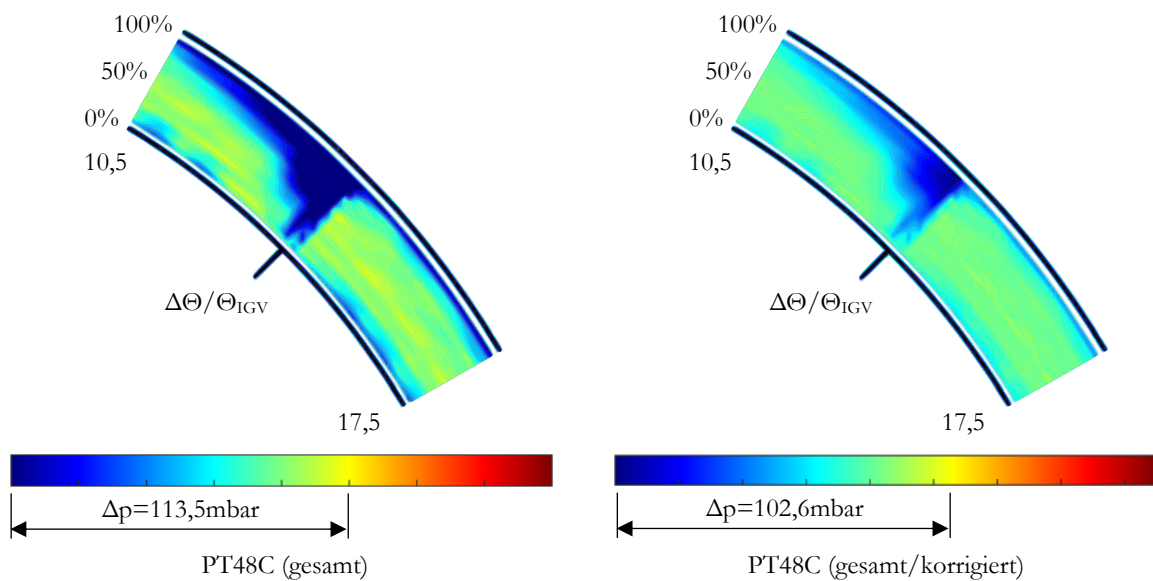


Abbildung 5.13: Konturplot vom Totaldruck in Ebene C unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts).

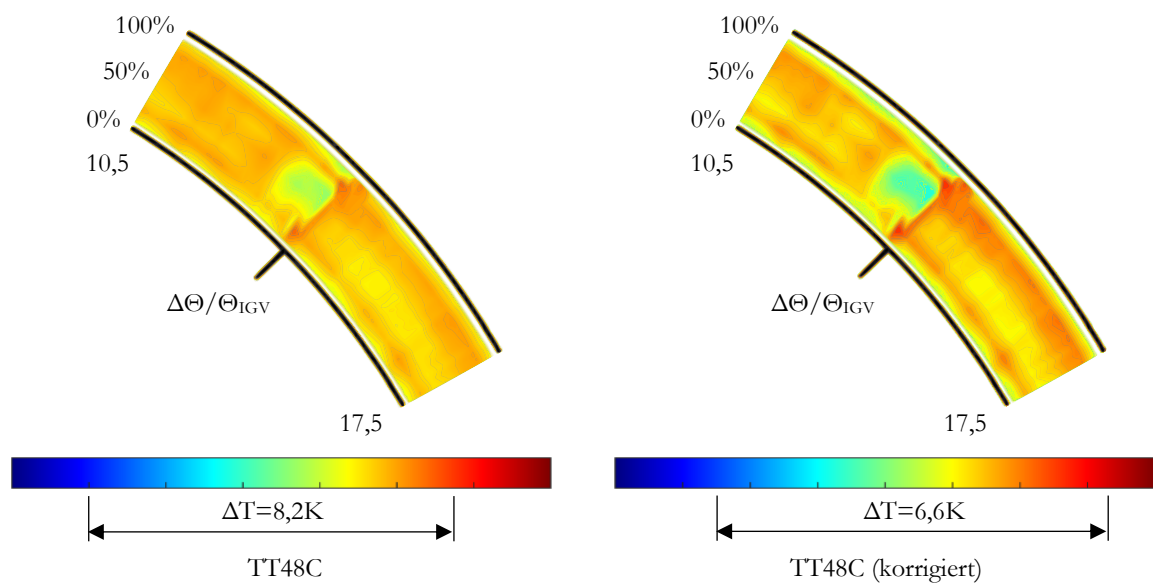


Abbildung 5.14: Konturplot von der Totaltemperatur in Ebene C unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts).

Das aerodynamische Kontrollvolumen zur Bestimmung des TCF-Druckverlustes ist in Abbildung 5.15 grafisch dargestellt. Es wird wie bereits erwähnt von den beiden umfangstraversierbaren Ebenen B0 und C aufgespannt. Um sich eine Vorstellung von der Größenordnung der IGV- und ITD-Druckverluste zueinander machen zu können, sind zusätzlich die Wakes der Schaufelprofile mitsamt Totaldruckverläufen als zeitlich mittiger Auszug aus der Versuchsfahrt dargestellt. Während die IGV-Wakes Druckänderungen im mbar-Bereich hervorrufen, liegen jene der ITD-Wakes bereits im 10 mbar-Bereich, was die Wichtigkeit dieser Untersuchungen quantitativ bestätigt.

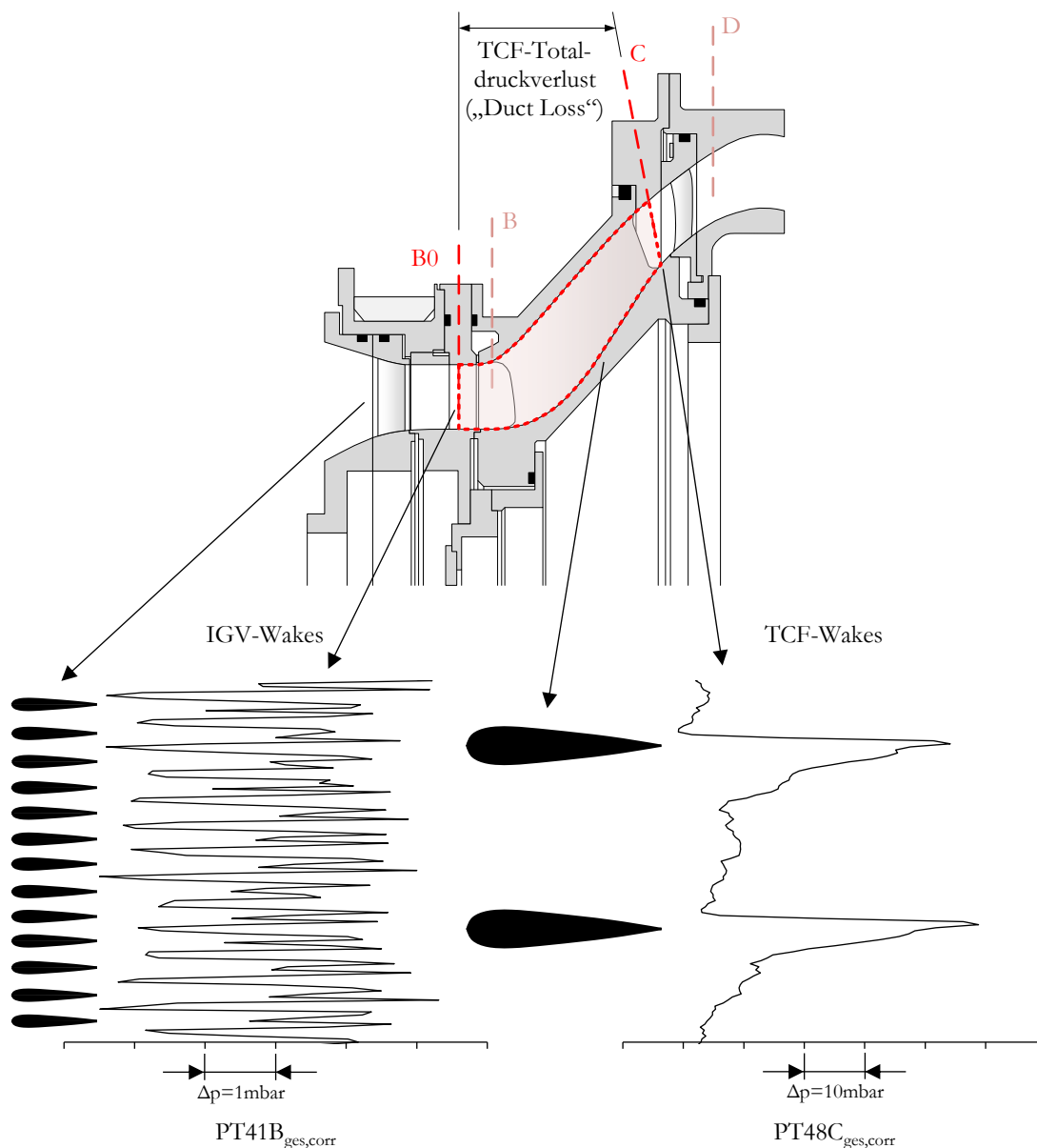


Abbildung 5.15: Aerodynamisches Kontrollvolumen zur Ermittlung des TCF-Druckverlustes (oben) und Darstellung der Nachläufe (Wakes) von IGVs in mittels der Totaldruckverteilungen in den Ebenen B0 und C (unten).

Für die Berechnung vom Druckverlust sind nun die Verläufe der Umfangsmittelwerte (schwarz) und die daraus radial gemittelten repräsentativen Werte (rot) von Totaldruck und -temperatur jeweils in roher und korrigierter Form für die Ebene B0 in Abbildung 5.16 bzw. für die Ebene C in Abbildung 5.17 dargestellt. Zusätzlich sind in den korrigierten Totaldruckverläufen noch die Druckverläufe der Grenzschichtkämme (dunkelgelb) für die Sonden BLOB und BLIB

bzw. BLOC und BLIC dargestellt, wobei die Messwerte des Grenzschichtkamms BLIC an der Innenkontur in Ebene C auf eine Falschanströmung bzw. eine unzureichende Ausrichtung der Pitot-Rohre während der Fertigung hindeuten.

Bei genauerer Betrachtung der korrigierten Verläufe der für die Bestimmung des Druckverlustes wichtigen Totaldrücke fällt zunächst auf, dass die Umfangsmittelwerte in Ebene B0 den infolge des Clean Inflows zu erwartenden homogenen Verlauf ohne Ausreißer annehmen und sich daraus ebenfalls ein vertrauenswürdiger repräsentativer Totaldruckwert für den ITD-Eintritt ergibt. Weiters ist zu erkennen, dass der „Verlustkern“ vom Übergangskanal im oberen Bereich des Ringraums (Tip) liegt und den radial gemittelten repräsentativen Druckwert für die Ebene C deutlich reduziert.

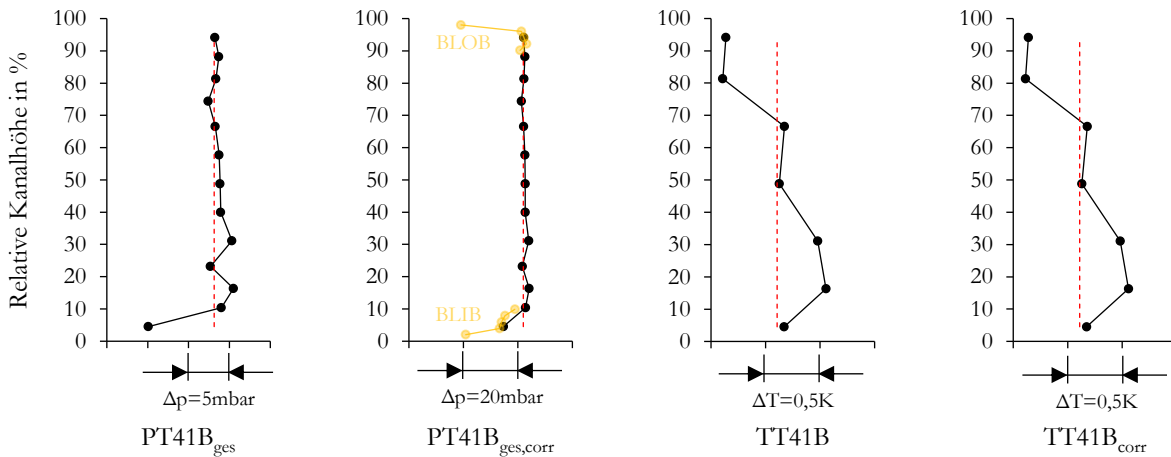


Abbildung 5.16: Radiale Verläufe (schwarz/Umfangsmittelung) und Ringraummittelwerte (rot/Radialmittelung) von Totaldruck (gesamt) und -temperatur (unkorrigiert/korrigiert) in Ebene B0 über der prozentualen Kanalhöhe.

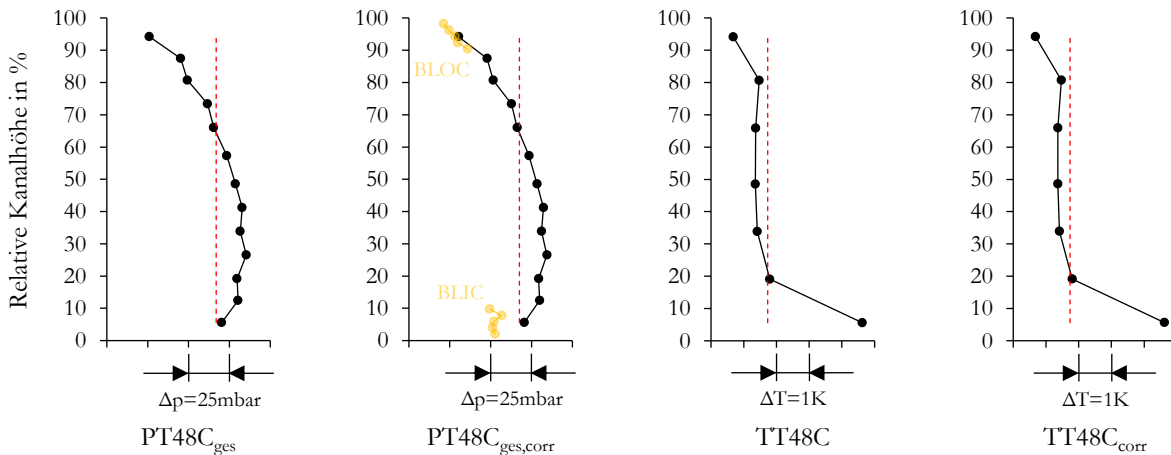


Abbildung 5.17: Radiale Verläufe (schwarz/Umfangsmittelung) und Ringraummittelwerte (rot/Radialmittelung) von Totaldruck (gesamt) und -temperatur (unkorrigiert/korrigiert) in Ebene C über der prozentualen Kanalhöhe.

Der TCF-Druckverlust lässt sich demnach absolut als Differenz zwischen dem korrigierten repräsentativen Totaldruck in der Messebene B0 bzw. 41 und jenem in der Messebene C bzw. 48 darstellen, wobei die mit Hilfe der Grenzschichtkämme gemessenen Drücke in die hier vorliegende vereinfachte Betrachtung nicht einfließen.

$$\Delta p_{V,ITD,abs} = \overline{PT41B}_{ges,corr} - \overline{PT48C}_{ges,corr} \quad (5.5)$$

Zur besseren Vergleichbarkeit wird der Druckverlust jedoch immer prozentual angegeben, indem der Absolutwert auf den Totaldruck am Eintritt in das aerodynamische Kontrollvolumen bezogen wird. Diese relative Schreibweise hat zusätzlich den Vorteil, dass sowohl die aus Rohdaten gemittelten Werte als auch die korrigierten Werte dasselbe Ergebnis liefern, da sich unter der Voraussetzung, dass die Messdaten beider Messebenen zum selben Zeitpunkt aufgenommen wurden, die Korrekturterme gegenseitig herauskürzen.

$$\Delta p_{V,ITD} = \frac{\overline{PT41B}_{ges} - \overline{PT48C}_{ges}}{\overline{PT41B}_{ges}} = \frac{\overline{PT41B}_{ges,corr} - \overline{PT48C}_{ges,corr}}{\overline{PT41B}_{ges,corr}} \quad (5.6)$$

Für die Berechnung des Vertrauensbereichs nach Unterkapitel 2.4 sollen zunächst die zu berücksichtigenden Messunsicherheiten aufgelistet werden, wobei für alle Werte das standardmäßige Konfidenzintervall von 95 % gilt.

- Die PSI-Module werden regelmäßig bei der Fa. DMT in Deutschland kalibriert, wodurch die bekannten systematischen Messabweichungen minimiert werden. Die unbekannt systematischen Messunsicherheiten werden seitens des Herstellers mit 0,05 % vom Skalenendwert angegeben. Bei den eingesetzten PSI-Modulen beträgt dieser 340 mbar, wodurch sich eine Abweichung von $u(e_{s,PSI,rel}) = \pm 0,17$ mbar ergibt. Da diese Messaufnehmer nur Differenzdrücke erfassen können, erfolgt die Absolutwertbildung über eine zusätzliche Messung des Umgebungsdrucks. Hierbei ergibt sich lt. Hersteller zusätzlich eine unbekannt systematische Messunsicherheit von 0,01 % vom Skalenendwert. Dieser beträgt bei den entsprechenden Aufnehmern 1200 mbar, woraus sich eine Abweichung von $u(e_{s,PSI,atm}) = \pm 0,12$ mbar ergibt.
- Nach Abschnitt 2.4.2 werden große Druckschwankungen im Betriebspunkt aktiv mittels (2.19) aus den Messwerten herausgefiltert, da sich die diese Strukturen über alle Messebenen der Ringgitterkaskade erstrecken und damit eine Korrektur ermöglichen. Für die verbliebenen kleinen Schwankungen ist hingegen eine empirisch bewährte unbekannt systematische Messunsicherheit von $u(e_{s,OPV}) = \pm 0,55$ mbar anzusetzen.
- Nach Abschnitt 2.4.2 führt die fertigungsbedingte begrenzte radiale Auflösung bei Rake-Messungen zu einer ebenfalls empirische bewährten unbekannt systematischen Messunsicherheit von $u(e_{s,MGS}) = \pm 1,20$ mbar.
- Die Messdatenerfassung nach Unterkapitel 4.4 erfolgt am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik i.d.R. immer auf dieselbe Weise, wodurch auch die empirische Standardabweichung des Mittelwerts bzw. die zufällige Messunsicherheit mit $u(e_r) = \pm 0,4$ mbar sehr gut bekannt ist.

Da nun die einzelnen Messunsicherheiten bekannt sind, kann die Gesamtmessunsicherheit für einen Druckmesswert \bar{p} über die Summe der Fehlerquadrate nach (2.12) berechnet werden.

$$u(\bar{p}) = \sqrt{u^2(e_r) + u^2(e_{s,PSI,rel}) + u^2(e_{s,PSI,atm}) + u^2(e_{s,OPV}) + u^2(e_{s,MGS})}$$

$$\underline{\underline{u(\bar{p})}} = \sqrt{0,4^2 + 0,17^2 + 0,12^2 + 0,55^2 + 1,20^2} = \underline{\underline{1,3949 \text{ mbar}}}$$

Durch Anwendung der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung (2.14) auf bspw. die unkorrigierte Variante von (5.6) kann in weiterer Folge auch die Messunsicherheit bzw. der Vertrauensbereich für den Druckverlust bei einem angenommenen Konfidenzintervall von 95 % angegeben werden.

$$u(\Delta p_{V,ITD}) = \sqrt{\left[\frac{\partial(\Delta p_{V,ITD})}{\partial(\overline{PT41B}_{ges})} \right]^2 u^2(\bar{p}) + \left[\frac{\partial(\Delta p_{V,ITD})}{\partial(\overline{PT48C}_{ges})} \right]^2 u^2(\bar{p})}$$

$$u(\Delta p_{V,ITD}) = \sqrt{\left[\frac{\partial \left(1 - \overline{PT48C}_{ges} \cdot \overline{PT41B}_{ges}^{-1} \right)}{\partial(\overline{PT41B}_{ges})} \right]^2 u^2(\bar{p}) + \left[\frac{\partial \left(1 - \overline{PT48C}_{ges} \cdot \overline{PT41B}_{ges}^{-1} \right)}{\partial(\overline{PT48C}_{ges})} \right]^2 u^2(\bar{p})}$$

$$u(\Delta p_{V,ITD}) = \sqrt{\left(\frac{\overline{PT48C}_{ges}}{\overline{PT41B}_{ges}^2} \right)^2 u^2(\bar{p}) + \left(-\frac{1}{\overline{PT41B}_{ges}} \right)^2 u^2(\bar{p})}$$

Dadurch ist es nun möglich, den „richtigen“ Wert für den Druckverlust um den Vertrauensbereich innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % zu erweitern.

5.2.4 Bewertung der Güte vom Austrittsdiffusor

Der Austrittsdiffusor hat die Aufgabe, die Ringraumströmung nach dem Austritt aus dem Deswirler von einem großen Kreisring auf einen Vollkreis mit deutlich kleinerem Außenradius (= Auslaufrohr) überzuleiten. Austrittsdiffusoren werden i.d.R. möglichst unkritisch gestaltet, d.h. eine Ablösung der Strömung durch zu kurze Baulängen in Kombination mit einer hierfür zu schlagartigen Querschnittserweiterung wird bereits im Vorfeld konstruktiv vermieden.

Im Zuge der messtechnischen Kontrolle der Güte vom Austrittsdiffusor wird zur Beurteilung der Verhaltenscharakteristik die relative Querschnittserweiterung bzw. das Verzögerungsverhältnis (Area Ratio: $A_R = A_2/A_1$) mit den gemessenen Druckbeiwerten C_p gegenübergestellt. In der nachfolgenden Abbildung 5.18 sind die geometrisch interessantesten relativen Positionen entlang der längenmäßigen Erstreckung des Diffusors gekennzeichnet.

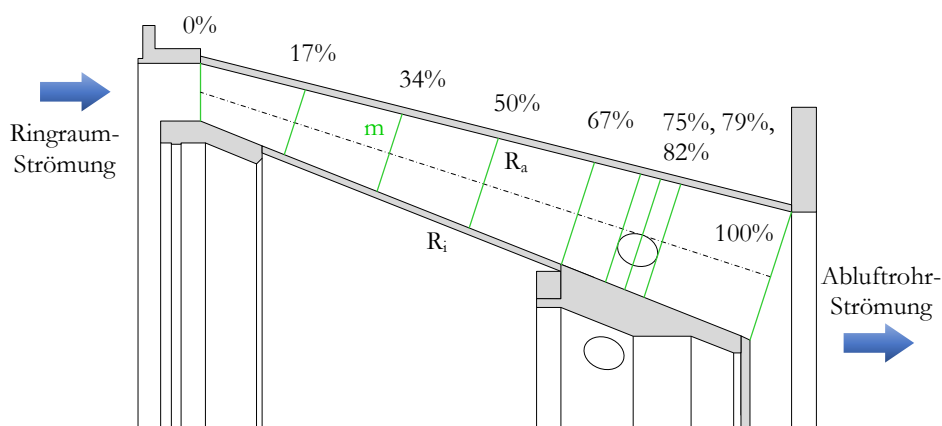


Abbildung 5.18: Kontrollpositionen für die Area Ratio am Austrittsdiffusor.

Aus dem Verlauf der Area Ratio (siehe Abbildung 5.19), bei welcher abgesehen von der Kreisringfläche am Eintritt alle anderen als Kegelstumpfmantelflächen mit Hilfe der Radien (i , a) und der Mantellinie (m) berechnet werden, kann man erkennen, dass sich die Querschnittserweiterung vom Diffusor bis zu einer Länge von knapp unter 70 % stärker auswirkt als die Reduktion der Radien, d.h. bis dahin nimmt der Kanalquerschnitt stetig zu und unmittelbar danach ab. Der Ausreißer zwischen 75 % und 82 % ist durch die lokale schlagartige Querschnittsreduktion infolge der vor allem für die Instrumentierung relevanten Kabelausleitung bedingt. Der arithmetische Mittelwert über die Gesamtlänge des Diffusors ist mit Kabelausleitung als schwarz strichlierte und ohne als blau strichlierte Linie eingetragen.

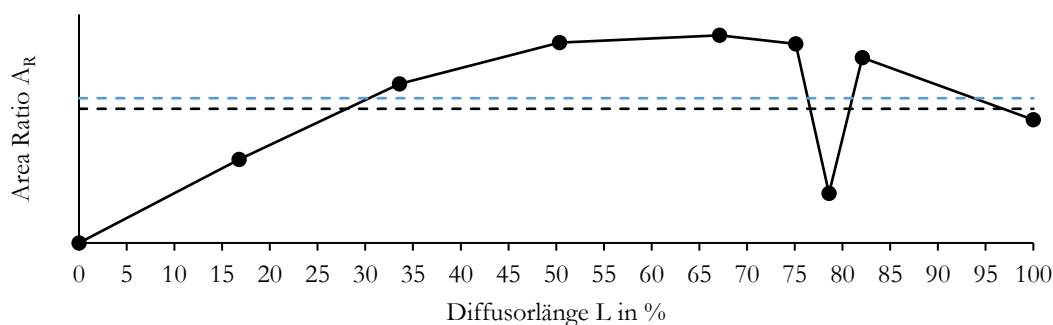


Abbildung 5.19: Verlauf der Area Ratio entlang der Länge des Austrittsdiffusors.

Als zweites Bewertungskriterium soll noch eine konstante Vergleichsgröße angegeben werden, nämlich der theoretisch maximal erreichbare Druckrückgewinn $C_{p,ideal}$ im Falle einer rein hydraulischen bzw. inkompressiblen Durchströmung ($\rho = konst.$) eines ebenen Diffusors, welcher im Vergleich zu Diffusoren mit geneigter Achse höher ausfällt.³⁰

Die Berechnung erfolgt über die erweiterte Bernoulligleichung unter Vernachlässigung des hydrostatischen Drucks und Bezug der statischen Druckdifferenz auf den Staudruck ($q_1 = p_{t,1} - p_1$) am Eintritt in den Diffusor:³¹

$$\underbrace{p_1 + \frac{\rho}{2} c_1^2 + \underbrace{\rho g h_1}_{\ll}}_{=p_{t,1}} = \underbrace{p_2 + \frac{\rho}{2} c_2^2 + \underbrace{\rho g h_2}_{\ll}}_{=p_{t,2}} + \Delta p_{v,1-2} \quad (5.7)$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\frac{\rho}{2} c_1^2} = 1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} - \frac{\Delta p_{v,1-2}}{\frac{\rho}{2} c_1^2} = \underbrace{1 - \frac{1}{A_k^2}}_{=C_{p,ideal}} - \xi_{1-2} \quad (5.8)$$

Weil der tatsächliche Verlauf vom Druckrückgewinn C_p auch auf den Diffusoreintritt bezogen werden soll, werden für die Berechnung nach (5.9) insgesamt folgende Messwerte benötigt:

- gemittelter tages- und betriebspunktkorrigierter Totaldruck \overline{PTDIFF}_{corr} am Diffusoreintritt (eine Position),
- gemittelter tages- und betriebspunktkorrigierter Druck $\overline{PSDIFF}_{7\%,corr}$ am Diffusoreintritt (insgesamt vier Messpositionen am Umfang, jedoch erst bei 7 % der Diffusorlänge und damit nicht direkt am Eintritt),
- lokal gemessene sowie tages- und betriebspunktkorrigierte statische Drücke lt. Abschnitt 4.3.7.

$$C_{p,i,j,corr} = \frac{p_{s,i,j,corr} - \overline{PSDIFF}_{7\%,corr}}{\overline{PTDIFF}_{corr} - \overline{PSDIFF}_{7\%,corr}} \quad (5.9)$$

Die analog berechneten Verläufe des Druckrückgewinns entlang der Länge des Diffusors für die Messreihen A bis D sind in der nachfolgenden Abbildung 5.20 mit der Area Ratio gegenübergestellt. Daraus geht eindeutig hervor, dass der Diffusor qualitativ gut bzw. ohne sprunghafte Druckänderungen arbeitet. Die Druckrückgewinnung erfolgt wie erwartet bis zum Querschnittsmaximum in einem azimuthal über den gesamten Ringraum gleichmäßig ansteigenden Verlauf ohne Ausreißer. Damit ist eine saubere Überströmung aus dem Ringraum in das Abluftrohr gewährleistet. Da es sich jedoch nicht um einen optimierten Diffusor handelt, weist er quantitativ betrachtet wenig überraschend einen eher moderaten Diffusorwirkungsgrad $\eta_D = C_p/C_{p,ideal}$ auf, welcher sich im Bereich zwischen 60 und 70 % bewegt. Da es keine Messposition im Bereich der Kabelausleitung (75 bis 82 %) gibt, kann ihr Einfluss auf den Mittelwert nicht genau bewertet werden.

³⁰ Vgl. Gülich (2010), S. 28.

³¹ Vgl. Ebd., S. 27f.

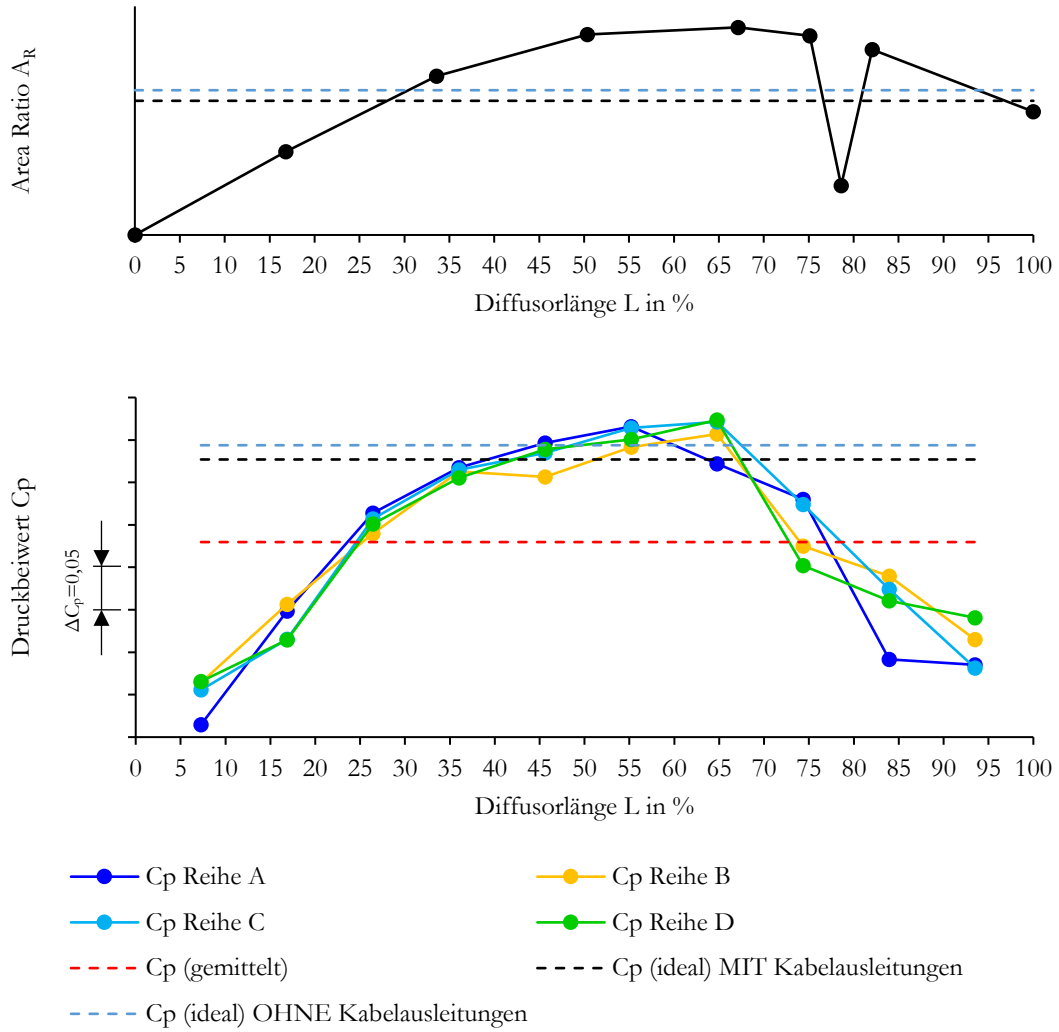


Abbildung 5.20: Gegenüberstellung des Druckrückgewinns vom Austrittsdiffusor mit dessen Area Ratio.

5.2.5 Darstellung des Anlagendruckverlaufs

Als abschließende Betrachtung im Zuge der Erstinbetriebnahme soll noch das strömungstechnische makroskopische Gesamtverhalten der Anlage anhand der Verläufe von Totaldruck und statischem Druck entlang des Ringraums der Ringgitterkaskade mit Hilfe von Abbildung 5.21 zusammenfassend diskutiert werden.

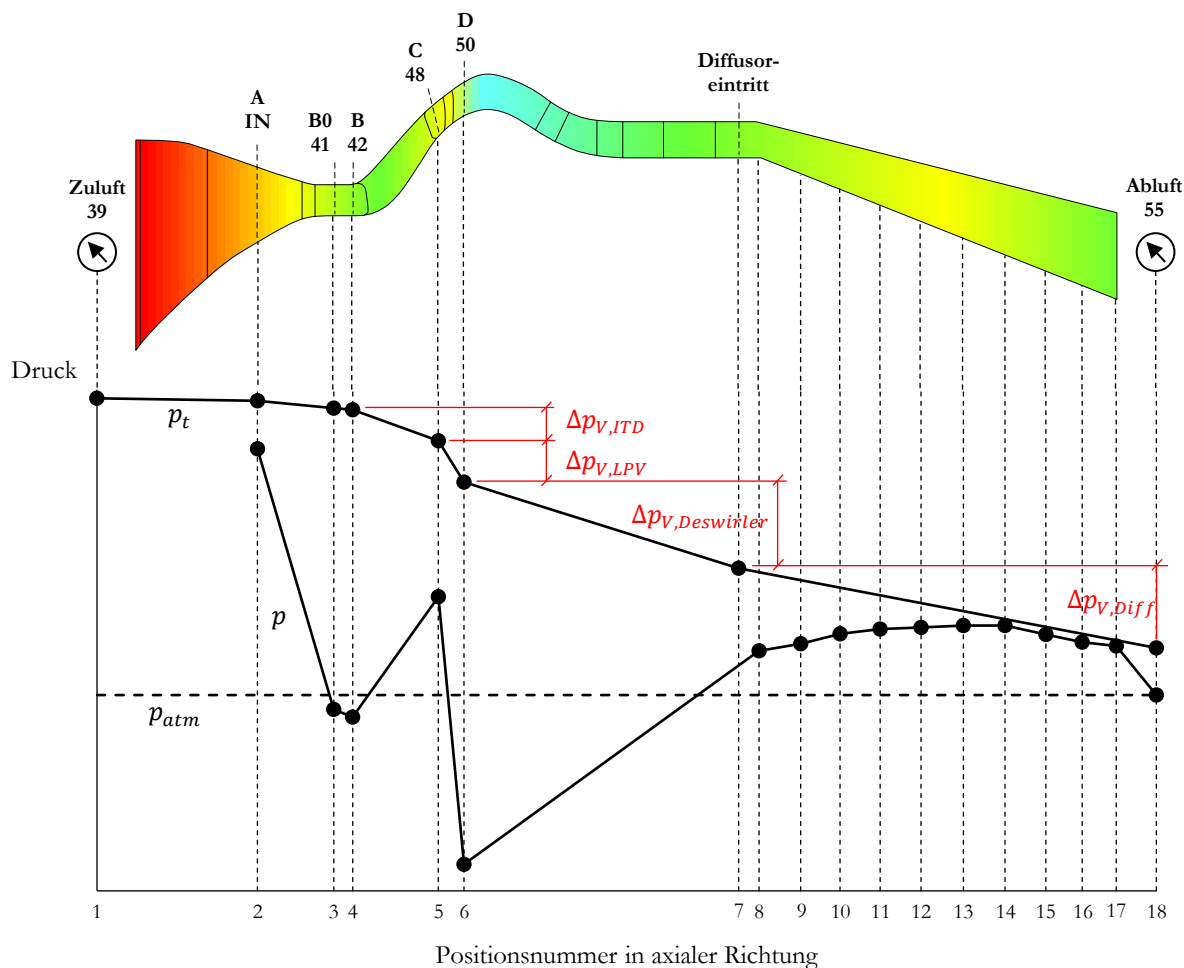


Abbildung 5.21: Anlagendruckverlauf der Ringgitterkaskade, Quelle: Eigene Darstellung.

Da diese Betrachtung nur einmalig durchgeführt wird, ist eine Skalierung auf einen Referenztag nicht notwendig, d.h. bei den dargestellten Druckverläufen handelt es sich ausschließlich um betriebspunktkorrigierte Werte. Der dargestellte Totaldruckverlauf stützt sich auf die entsprechenden Messwerte aus dem Einlaufkessel nach dem Strömungsgleichrichter (Ebene 39), aus den umfangstraversierbaren Ebenen A, B0, C und D sowie aus den stationären Ebenen B und am Diffusoreintritt. Der Totaldruck im Abluftrohr wird nicht direkt gemessen, kann jedoch aus den vom FlowCom gelieferten Werten für statischen Druck, statische Temperatur und Massenstrom wie folgt berechnet werden.

Beim Abluftrohr handelt es sich um ein DN500-Rohr mit einer Wandstärke von 5mm, woraus sich ein Strömungsquerschnitt von $0,18857\text{m}^2$ ergibt. Aus der Zustandsgleichung für das ideale Gas folgt unmittelbar die Dichte.

$$\rho_{55XX} = \frac{P_{055XX}}{R_{Luft} \cdot T_{055XX}}$$

Damit kann über die Kontinuitätsgleichung die Strömungsgeschwindigkeit im Abluftrohr bestimmt werden.

$$c_{55XX} = \frac{\dot{m}}{\rho_{55XX} \cdot A_{55XX}}$$

Über die Bernoulli-Gleichung kann damit unter Vernachlässigung des hydrostatischen Druckanteils der Totaldruck berechnet werden und mit einem gemittelten Faktor für die Betriebspunktkorrektur angepasst werden. Im Bereich der repräsentativen Werte wirkt sich diese Korrektur jedoch lediglich im Pascal-Bereich aus und wird daher vernachlässigt.

$$PT_{55XX} = P_{055XX} + \rho_{55XX} \cdot \frac{c_{55XX}^2}{2}$$

Bis zur Positionsnummer 3 bzw. Messebene B0 erkennt man im Totaldruckverlauf keinen nennenswerten Druckverlust infolge Rohrreibung, Inlet Struts oder IGVs. Der statische Druckverlauf hingegen weist auf eine starke Beschleunigung der Strömung hin. Diese wird durch die Überleitung des Fluids von einem großen Kreisquerschnitt in den Ringraum und einer daraus resultierenden Querschnittsverengung bzw. subsonischen Düsenwirkung verursacht.

Zwischen den Positionsnummern 3 und 5 bzw. den Messebenen B0 und C wird der Totaldruck infolge des im Abschnitt 5.2.3 genauer betrachteten TCF-Druckverlust $\Delta p_{V,ITD}$ reduziert. Aufgrund der Anhebung des Ringraumradius und der vom ITD verursachten Diffusorwirkung kommt es zu einem Anstieg des statischen Drucks bzw. zu einer Verzögerung der Strömung. Zwischen den Positionsnummern 5 und 6 bzw. den Messebenen C und D kommt es durch das Leitgitter des Niederdruckstators (LP Vanes) zu einer starken Umlenkung der Strömung innerhalb der Ringgitterkaskade. Dabei stellt sich der Druckverlust $\Delta p_{V,LPV}$ ein. Bei der Durchströmung des Deswirlers ergibt sich zwischen den Positionen 6 und 7 ein weiterer Druckverlust $\Delta p_{V,Deswirler}$, wobei es wieder zu einer Verzögerung der Strömung bzw. zu einer Anhebung des statischen Druckes kommt.

Innerhalb des Austrittsdiffusors kommt es zwischen den Positionen 7 und 17 zu der im Abschnitt 5.2.4 diskutierten Druckrückgewinnung. Nach erneuter Überleitung der Strömung vom Ringraum in den Kreisquerschnitt vom Abluftrohr kommt es wieder zu einer Beschleunigung der Strömung bzw. zum Abbau des noch verbliebenen statischen Drucks bis zur Messstelle im Abluftrohr, wobei es zum Gesamtdruckverlust $\Delta p_{V,Diff}$ kommt. Der restliche Gesamtdruck wird über das Abluftrohr, den Abluftturm und den integrierten Schalldämpfer bis zur endgültigen Abströmung in die Umgebung abgebaut.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das stetige Wachstum des Flugverkehrs verlangt nach einer ebenfalls stetigen Weiterentwicklung von Triebwerken mit hohen Bypassverhältnissen, mit denen eine deutliche Lärm- und Treibstoffreduktion einhergeht. Eine Schlüsselkomponente dabei bildet der Turbinenübergangskanal zwischen Hoch- und Niederdruckturbine. Bisherige Untersuchungen mit CFD ergaben bereits bei stationärer Anströmung eine Unterschätzung seines Druckverlusts. Zur Validierung der Turbulenzmodelle ist eine experimentelle Aufschlüsselung von dessen Einzelbestandteilen notwendig.

Ziel dieser Arbeit war der mechanische Aufbau eines Prüfstandes, der s.g. Ringgitterkaskade, welche eine hohe Flexibilität in Bezug auf das einsetzbare Messequipment und die Realisierung unterschiedlicher Anströmbedingungen (stationär/instationär) vor dem Turbinenübergangskanal aufweisen soll. Im Zuge der Inbetriebnahme und Initialmessung sollte abschließend noch die Tauglichkeit des Prüfstandes zur Erfüllung der an ihn gestellten Anforderungen verifiziert werden.

Die vorliegende Arbeit wurde nach diesen Kriterien chronologisch gegliedert aufgebaut. Zunächst wurde in der Einleitung auf die Problem- und Aufgabenstellung näher eingegangen. Im Anschluss daran wurden in den theoretischen Grundlagen die hierfür relevanten Themen Maschinenausrichtung, Duct-Aerodynamik, Sondengestaltungskriterien, Messunsicherheit und Machzahlähnlichkeit in einem angemessenen Ausmaß behandelt. Danach erfolgte eine ausführliche Beschreibung des mechanischen Aufbaus vom Prüfstand und von Peripheriekomponenten sowie von der Prüfstandsausrichtung, welche von Fotoaufnahmen während der Montage, 3D-Modellen und 2D-Skizzen zur besseren Übersicht begleitet wurde. Im weiteren Verlauf wurde im Zuge der Beschreibung der Messtechnik näher auf die Themen Sondenbau und -kalibrierung, Instrumentierung sowie Datenerfassung eingegangen.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigte sich zuerst mit der Inbetriebnahme und Betriebspunkteinstellung bei stationärer Konfiguration mit einem Leitgitter vor dem Turbinenübergangskanal und ohne drehendem Speichenrad. Die aus der Initialmessung ermittelten Daten dienten im Anschluss daran in erster Linie zur Bewertung der Zuströmqualität (Clean Inflow), der Bestimmung des TCF-Druckverlustes mitsamt Vertrauensbereich, der Bewertung der Güte des Austrittsdiffusors und der Darstellung sowie Diskussion des Anlagendruckverlaufs.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Prüfstand sowohl die mechanischen Anforderungen an Dichtheit und Funktionalität als auch die aerodynamischen Anforderungen an Zuströmqualität und Betriebsverhalten erfüllt und damit seine Eignung für die weiteren Untersuchungen mit/ohne Leitgitter vor dem Übergangskanal sowie mit/ohne drehendem Speichenrad unter Einsatz von verschiedenstem Messequipment wie z.B. Rakes, Fünflochsonden, Oberflächendruckchips, 3D-Hitzdrahtanemometrie, Laser-Doppler-Anemometrie (LDA), Ölanstrichen, etc. zur genaueren Auflösung der einzelnen Bestandteile vom TCF-Druckverlust verifiziert ist. Im Idealfall können aus den Endergebnissen der nachfolgenden Untersuchungen neue Auslegungskonzepte für Turbinenübergangskanäle ausgearbeitet werden, welche das aerodynamische Verhalten dieser essenziellen Triebwerkskomponenten um einiges realitätsnäher abbilden können als es bisher der Fall war, um damit den Weg für weitere Optimierungen zu ebnen.

7 QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

GEDRUCKTE WERKE

Arts, T.; Boerrigter, H.L.; Carbonaro, M.; Van den Braembussche, R.A. (1994): *Pressure Measurements*, in: *Measurement Techniques in Fluid Dynamics – An Introduction*, Reprint of VKI Lecture Series 1994-01, ISBN: D/1994/0238/417, von Karman Institute for Fluid Dynamics

Bräunling, Willy J.G. (2009): *Flugzeugtriebwerke – Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme (VDI)*, 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-540-76368-0, e-ISBN 978-3-540-76370-3, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Dillinger, Josef u.a. (2007): *Fachkunde Metall – Mechanische Technologie*, 55., neu bearbeitete Auflage als Ausgabe für Österreich, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten

Göttlich, Emil (2011): *Research on the aerodynamics of intermediate turbine diffusers*, in: *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 47, S. 249-279

Gülich, Johann F. (2010): *Kreiselpumpen – Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*, 3., korrigierte und ergänzte Auflage, ISBN: 978-3-642-05478-5, e-ISBN: 978-3-642-05479-2, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg Dordrecht London New York

Heitmeir, Franz (2015): *Vorlesungsskriptum – Thermische Turbomaschinen Grundlagen und Vertiefung*, 12. Auflage Jänner 2015, Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, Technische Universität Graz

Langston, L.S. (1980): *Crossflows in a Turbine Cascade Passage*, in: *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 102, S. 866-874

Marn, Andreas (2008): *On the Aerodynamics of Aggressive Intermediate Turbine Ducts for Competitive and Environmentally Friendly Jet Engines*, Dissertation, Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, Technische Universität Graz

Nitsche, Wolfgang; Brunn, André (2006): *Strömungsmesstechnik (VDI)*, 2., aktualisierte und bearbeitete Auflage, ISBN-10 3-540-20990-5, ISBN-13 978-3-540-20990-4, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Rieberer, René (2015): *Vorlesungsskriptum – Energie- und umwelttechnisches Mess- und Versuchswesen – Block „Wärmetechnik“*, Auflage November 2015, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Zerobin S., Steiner M., Bauinger S., Marn A., Göttlich E., Heitmeir F. (2017): *Influence of Measurement Grid Resolution on Duct Loss Evaluation*, in: *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*, Paper ID: ETC2017-150, ETC12, April 3-7, 2017, Stockholm, Schweden

ONLINE-QUELLEN

Deutsche Flugsicherung (DFS) (Hrsg.) (2016): *Luftverkehr in Deutschland – Mobilitätsbericht 2016*, https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Presse/Publicationen/Mobilitaetsbericht2016_web.pdf [Stand: 02.04.2018]

PRÜFTECHNIK Alignment Systems GmbH (Hrsg.) (2005): *Handbuch für Techniker und Ingenieure*, Ausgabe 1 (10/2005), http://www.ganschtech.at/files/handbuch_ausrichten.pdf [Stand: 19.09.2017]

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Hinweis: Falls unter einer Abbildung keine Quelle explizit angegeben ist, so handelt es sich um eine eigene Darstellung.

| | |
|---|----|
| Abbildung 1.1: Langjährige Verkehrsentwicklung im deutschen Luftraum, Quelle: DFS (2016), S. 6, Onlinequelle [02.04.2018] (modifiziert)..... | 1 |
| Abbildung 1.2: Zweiwellen-Fan-Triebwerk GP7000 von Engine Alliance, Quelle: https://www.extremnews.com/images/full-af3e198c90daf36220c7d4a3e8cfbee4.jpg , Onlinequelle [02.04.2018] (modifiziert)..... | 2 |
| Abbildung 1.3: Gegenüberstellung der Schnittbilder zweier Turbofan-Triebwerke mit unterschiedlichen Bypassverhältnissen von 6 und 10, Quelle: Göttlich (2011), S. 251 (leicht modifiziert)..... | 3 |
| Abbildung 1.4: Smith-Diagramm mit farblicher Hervorhebung der üblichen Einsatzbereiche von stationären Gasturbinen und Flugantrieben, Quelle: Heitmeir (2015), S. 11.2-19 (modifiziert)..... | 4 |
| Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Ausrichtgrößen, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 8, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert)..... | 8 |
| Abbildung 2.2: Winkelversatz, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 9, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert)..... | 8 |
| Abbildung 2.3: Axiale Positionsabhängigkeit des gemessenen Parallelversatzes bei zueinander parallelen Achsen (oben) bzw. bei zueinander windschiefen Achsen (unten), Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 10, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert)..... | 9 |
| Abbildung 2.4: Kippfuß, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 25, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert)..... | 10 |
| Abbildung 2.5: Mechanische Messuhr, Quelle: Dillinger, Josef u.a. (2007), S. 26 (leicht modifiziert)..... | 10 |
| Abbildung 2.6: Schematische Darstellung vom traditionellen Messuhrenaufbau beim Doppelradialverfahren, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 36, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert)..... | 11 |
| Abbildung 2.7: Messung von Parallel- und Winkelversatz mit dem Doppelradialverfahren..... | 12 |
| Abbildung 2.8: Typischer Messuhrenaufbau beim Einsatz des Radial-Axial-Verfahrens, Quelle: PRÜFTECHNIK (2005), S. 33, Onlinequelle [19.09.2017] (leicht modifiziert)..... | 13 |
| Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Ablösung von Strömungsgrenzschichten entlang einer begrenzenden Wand bei ansteigendem Druckgradienten, Quelle: Bräunling (2009), S. 96 (leicht modifiziert)..... | 15 |
| Abbildung 2.10: Ablösende subsonische Diffusorströmungen bei zu großen Öffnungswinkeln, Quelle: Bräunling (2009), S. 112..... | 16 |
| Abbildung 2.11: Qualitative Einordnung der verschiedenen Test Setups C1, C4 und C5 sowie des Übergangskanals vom GP7000-Triebwerk ($\mu \approx 9$) im entsprechenden Diagramm nach Sovran und Klomp, Quelle: in Anlehnung an Marn (2008), S. 15 und Göttlich (2011), S. 251..... | 16 |
| Abbildung 2.12: Verteilung der Mach-Zahl (links) und Druckverteilung (rechts) über die Baulänge eines S-förmigen Turbinenübergangskanals bei ungestörter Zuströmung und ohne Stützschaufeln, Quelle: Göttlich (2011), S. 252f (leicht modifiziert)..... | 18 |
| Abbildung 2.13: Hufeisen- und Kanalwirbel in einem Schaufelgitter (schematisch), Quelle: Langston (1980), S. 866ff..... | 20 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 2.14: Räumliche Gegenüberstellung der Aerodynamik in einem Turbinenübergangskanal mit Wakes (links) und mit Wakes in Kombination mit TCF-Stützschaufeln (rechts), Quelle: Göttlich (2011), S. 253 und S. 256 (leicht modifiziert). | 20 |
| Abbildung 2.15: Schematischer Aufbau einer statischen Wanddruckbohrung (a), ungünstige Geometrien (b und c) sowie Bohrung mit Grat (d), Quelle: Nitsche, Brunn (2006), S. 12 (leicht modifiziert) und Arts, Borrigter, Carbonaro, Van den Braembussche (1994), S. 42 (leicht modifiziert)..... | 21 |
| Abbildung 2.16: Relative Abweichung der statischen Druckmessung ($p_{\text{Messung}} - p$) / q bei verschiedenen Bohrungsgeometrien gegenüber einer (idealen) Referenzgeometrie, Quelle: in Anlehnung an Arts, Borrigter, Carbonaro, Van den Braembussche (1994), S. 45..... | 22 |
| Abbildung 2.17: Beispielhafte Pitot-Sonden, Quelle: in Anlehnung an Arts, Borrigter, Carbonaro, Van den Braembussche (1994), S. 59. | 22 |
| Abbildung 2.18: Schematische Darstellung der zur Beschreibung von Messabweichungen verwendeten Grundbegriffe, Quelle: Rieberer (2015), S. 7-4 (leicht modifiziert) (Originalquelle: DIN 1319-1 aus dem Jahr 1995).23 | 23 |
| Abbildung 3.1: Schaltplan der Verdichteranlage (allgemein), Quelle: Eigene Darstellung. | 31 |
| Abbildung 3.2: Schaltplan der Verdichteranlage (Fahrweise 6 rot dargestellt). | 31 |
| Abbildung 3.3: 3D-CAD-Modell der Ringgitterkaskade. | 32 |
| Abbildung 3.4: AnCa-Schnittbild mit Darstellung von Teilungsebene (rot), Bereichsdefinitionen und azimuthal traversierbaren Komponenten (dunkelgelb und blau). | 33 |
| Abbildung 3.5: Ausgangssituation für die Prüfstandsmontage. | 34 |
| Abbildung 3.6: Einlaufkessel mit Lochscheibe zur Vergleichmäßigung der Strömung. | 35 |
| Abbildung 3.7: Schweißkonstruktion einer Muffe zur Aufnahme der Messsonden im Einlaufkessel. | 35 |
| Abbildung 3.8: Zentraler Knotenpunkt für elektronische und pneumatische Prüfstandsanschlüsse. | 36 |
| Abbildung 3.9: Entwurfsschema für Bewegung des Rahmens mittels einer Zwei-Wege-Seilwinde (oben) sowie Fotoaufnahmen nach der Montage von Seilwinde (unten links) und Umlenkrolle (unten rechts). | 38 |
| Abbildung 3.10: Entwurfsschema für flexiblen Leitungskanal am beweglichen Rahmen. | 39 |
| Abbildung 3.11: Positionen der Zusatzkomponenten für den beweglichen Rahmen. | 39 |
| Abbildung 3.12: Stationärer Auskragsbalken zur Befestigung des zweiten Leitungskanals (links) und montierter Leitungskanal im aufgerollten Zustand (rechts). | 40 |
| Abbildung 3.13: Komponenten für die Exzenter-Klemmvorrichtung (links) und Einbauzustand (rechts). | 40 |
| Abbildung 3.14: Funktionsprinzip der Exzenter-Klemmvorrichtung..... | 41 |
| Abbildung 3.15: 3D-CAD-Modell vom Auslaufbereich. | 42 |
| Abbildung 3.16: Schnittdarstellung der Montagekomponenten im Auslaufbereich. | 42 |
| Abbildung 3.17: Fotoaufnahmen vom senkrecht aufgestellten Diffusor mit bereits montiertem Lager..... | 43 |
| Abbildung 3.18: Fotoaufnahmen der instrumentierten Röhren an den Montageseiten von Diffusor-Außenkegel (links) und -Innenkegel (rechts)..... | 44 |
| Abbildung 3.19: Fotoaufnahmen der einzelnen Montageschritte bei der Blechmontage. | 45 |
| Abbildung 3.20: Fotoaufnahmen vom Transport des Diffusors von der Werkstatt zum Prüfstand. | 46 |
| Abbildung 3.21: Reinigung der Gewinde in den Stützen des beweglichen Rahmens (links) und fertig montierte Auflagebackerl (rechts). | 47 |
| Abbildung 3.22: Aufsetzen des Diffusors am beweglichen Rahmen. | 47 |
| Abbildung 3.23: Fotoaufnahme der bereits auf dem Teleskop-Außenrohr montierten Druckluftdichtung. | 48 |
| Abbildung 3.24: Fotoaufnahmen von den Arbeitsschritten der Verbindung des Diffusors mit dem Abluftrohr. | 49 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 3.25: Fotoaufnahmen von der Verbindung des Diffusors mit dem Abluftrohr über die Baugruppe „Teleskoprohr“ nach bereits erfolgtem statischen Höhenausgleich. | 49 |
| Abbildung 3.26: Reinigung und Entfettung der Montageflächen (oben) und Einfettung sowie Montage der thermischen Zentrierung (unten)..... | 50 |
| Abbildung 3.27: Fotoaufnahmen der mittels Silikon abgedichteten Innenkontur der Kanalbegrenzungsbleche (konkave Seite). | 51 |
| Abbildung 3.28: Fotoaufnahmen vom Durchziehen der inneren Wanddruckschläuche (Hub) durch den Diffusor. | 51 |
| Abbildung 3.29: 3D-CAD-Modell von Mittelteil und Auslaufbereich..... | 52 |
| Abbildung 3.30: Fotoaufnahme der zu demontierenden Komponenten am TTTTF-Prüfstand. | 53 |
| Abbildung 3.31: Demontage der Bwd-Beams und Bwd-Traversiermotor (links), vom Aft Outer Casing (Mitte rechts) sowie vom Deswirler (rechts) beim TTTTF-Prüfstand. | 53 |
| Abbildung 3.32: 2D-Schnittbild mit Bwd-Beams, Aft Outer Casing, Deswirler und Kanalarmen I und II. | 54 |
| Abbildung 3.33: Fotostrecke von der Montage des Bwd-Beams ALF-180°..... | 54 |
| Abbildung 3.34: Fotoaufnahmen vom fertig montierten Deswirler am AnCa-Prüfstand..... | 55 |
| Abbildung 3.35: Fotoaufnahmen vom fertig montierten Aft Outer Casing am AnCa-Prüfstand. | 56 |
| Abbildung 3.36: Fotoaufnahmen von der Montage des Bwd-Traversiermotors. | 57 |
| Abbildung 3.37: Fotoaufnahmen der fertig montierten Bwd-Beams bei ALF-90° (links oben), ALF-0° (rechts oben) und ALF-270° (links unten) sowie von allen vier Bwd-Beams gleichzeitig (rechts unten). | 57 |
| Abbildung 3.38: Fotoaufnahmen von den bereits fertig montierten Kanalarmen I und II. | 58 |
| Abbildung 3.39: 2D-Schnittbild für die Montage des Niederdruckstators..... | 58 |
| Abbildung 3.40: Fotoaufnahmen vom Niederdruckstator im angelieferten Zustand (links) und im bereits montierten Zustand (rechts). | 60 |
| Abbildung 3.41: 2D-Schnittbild mit den notwendigen Komponenten für die Montage des Turbinenübergangskanals. | 61 |
| Abbildung 3.42: Turbinenübergangskanal im angelieferten Zustand..... | 61 |
| Abbildung 3.43: Fotoaufnahmen nach der TCF-Vormontage aus verschiedenen Perspektiven. | 62 |
| Abbildung 3.44: Fotoaufnahmen von der Montage der TCF-Baugruppe (hier ohne Bwd-Instrumentierungsring)..... | 63 |
| Abbildung 3.45: Fotoaufnahme der TCF-Baugruppe im fertig montierten Zustand (mit Bwd-Instrumentierungsring). | 64 |
| Abbildung 3.46: Wichtige Spaltkontrollpunkte am Backward-Rig. | 65 |
| Abbildung 3.47: Bwd-Spaltmanipulation Fall 1: Einsatz von Fühlerlehrenbändern beim LP Inner Casing (oben), Bwd-Spaltmanipulation Fall 2: Einsatz von Fühlerlehrenbändern beim Turbinenübergangskanal (unten). | 66 |
| Abbildung 3.48: 2D-Schnittbild mit gegebener Einlaufbaugruppe als Ausgangssituation. | 67 |
| Abbildung 3.49: Fotostrecke mit Aufnahmen ausgewählter Montagestadien der Einlaufbaugruppe (AIDA-Drehvorrichtung und Neuteile) mitsamt Kammerübergang beim Fertigungsbetrieb vor Ort. | 67 |
| Abbildung 3.50: 2D-Schnittbild mit Komponenten des mittleren Einlaufbereichs. | 68 |
| Abbildung 3.51: 2D-Schnittbild mit den verbleibenden Komponenten zur Fertigstellung Einlaufbereichs..... | 69 |
| Abbildung 3.52: Fotoaufnahmen von der teilweise montierten Einlaufbaugruppe ohne IGVs (links) und mit IGVs (mittig) sowie von der komplett montierten Einlaufbaugruppe (rechts). | 70 |
| Abbildung 3.53: Fotostrecke verschiedener Montagestadien der Fwd-Beams und des Fwd-Traversiermotors. | 71 |
| Abbildung 3.54: Wichtige Spaltkontrollpunkte am Forward-Rig und Schließen des Prüfstandes. | 72 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3.55: Fwd-Spaltmanipulation Fall 1 (Außenkontur): Anbringung von Fühlerlehrenbändern am äußeren Einlaufgehäuse. | 72 |
| Abbildung 3.56: Fwd-Spaltmanipulation Fall 2 (Innenkontur): Anbringung von Fühlerlehrenbändern am inneren Mittelstück..... | 73 |
| Abbildung 3.57: Geschlossener Prüfstand nach erfolgter Spaltkontrolle und Prüfstandsausrichtung..... | 73 |
| Abbildung 3.58: Fotoaufnahme des ausgerichteten und geschlossenen Prüfstandes mit farblicher Kennzeichnung der auszurichtenden Achsen und der hierfür zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade. | 74 |
| Abbildung 3.59: Kinematisches Abstraktionsmodell vom Prüfstand für die Grobausrichtung..... | 75 |
| Abbildung 3.60: Qualitative Achsenausrichtung mit Hilfe eines handelsüblichen Kreuzlinienlasers (Nivellierung: $\pm 4^\circ$, Abweichung: 0,8 mm/m)..... | 79 |
| Abbildung 3.61: Fotoaufnahmen vom deutlich zu erkennenden Winkel- und Parallelversatz zwischen Bwd- und Fwd-Beams auf ALF-90° im Zuge der Grobausrichtung. | 80 |
| Abbildung 3.62: Abstraktionsmodell für einen möglichen Ist-Zustand (links) und einen gewünschten Soll-Zustand (rechts) bei der Grobausrichtung von Bwd- und Fwd-Beams im Grund- und im Aufriss. | 81 |
| Abbildung 3.63: Kinematisches Abstraktionsmodell vom Prüfstand für die Feinausrichtung. | 82 |
| Abbildung 3.64: Fotoaufnahmen von der Feinausrichtung ohne TCF (links oben und rechts als Vergrößerung) und mit TCF (links unten) mit farblicher Hervorhebung von für Messuhren geeigneten Plan- und Rundflächen. | 83 |
| Abbildung 4.1: Fotoaufnahmen der Totaldruck- und Totaltemperaturrakes im mechanisch endbearbeiteten Zustand mit Kennzeichnung ihrer ID (in rot) und ihres jeweiligen Einsatzgebiets am Prüfstand. | 85 |
| Abbildung 4.2: Fotoaufnahmen von eingespannten Rakes während der mechanischen Bearbeitung..... | 86 |
| Abbildung 4.3: Fotostrecke der „Trockeninstrumentierung“ von Pitot-Röhrchen in die Rakes..... | 87 |
| Abbildung 4.4: Fotoaufnahme der Totaldruckrakes mit den vorerst noch mittels Klebeband in Position gehaltenen Pitot-Röhrchen (links) und Schrumpfschlauch-Farbcode für Pitot-Röhrchen anhand der radialen Position im Ringraum (rechts). | 87 |
| Abbildung 4.5: Fotoaufnahmen vom Einbetten der Pitot-Röhrchen in die Rakes mit Epoxydharz. | 89 |
| Abbildung 4.6: Herstellung einer physischen Verbindung zwischen Rake und Aufnehmer (Plug)..... | 89 |
| Abbildung 4.7: Ausgewählte Fotoaufnahmen von der Endfertigung der Temperaturrakes..... | 90 |
| Abbildung 4.8: Ausgewählte Fotoaufnahmen von der Grenzschichtkamm-Fertigung. | 91 |
| Abbildung 4.9: Fotoaufnahme von vier einbaufertigen Grenzschichtkämmen (links) und Schema für Positionscode bzw. optionalen Farbcode (rechts). | 91 |
| Abbildung 4.10: Beispielhafte Kalibrierkurven für das Totaldruckrake PT50D bei verschiedenen Anströmwinkeln. | 92 |
| Abbildung 4.11: Kalibrierkurven in Bezug auf den Recovery-Faktor ausgewählter Temperaturrakes. | 93 |
| Abbildung 4.12: Schematische Anordnung für die Kalibrierung von Thermoelementen. | 93 |
| Abbildung 4.13: 2D-Schnittbild der Ringgitterkaskade mit Kennzeichnung der Messebenen..... | 94 |
| Abbildung 4.14: Schematische Darstellung des Verlegungskonzepts für Messleitungen in traversierbaren Ebenen anhand eines stark vereinfachten Beispiels mit vier Messpunkten an den azimuthalen Positionen 0°, 90°, 180° und 360° (Blick in Strömungsrichtung). | 95 |
| Abbildung 4.15: Fotoaufnahmen der Verlegungs- und Endschalterkonzepte am Bwd- und Fwd-Rig (oben) und vom fertig instrumentierten Prüfstand (unten)..... | 96 |
| Abbildung 4.16: Anschlussdestinationen für Thermoelementkabel und Druckmessschläuche. | 97 |
| Abbildung 4.17: Freie Konnektoren (links) und Instrumentierung eines Konnektors mit ihm laut Instrumentierungsplan zugewiesenen Druckmessleitungen (rechts)..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4.18: Fotoaufnahmen vom Inneren eines PSI-Messschrankes bei angeschlossenen Konnektoren. | 99 |
| Abbildung 4.19: Schematische Darstellung vom Druckanschlusskonzept mit Konnektoren. | 99 |
| Abbildung 4.20: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene A mit Blick stromaufwärts. | 100 |
| Abbildung 4.21: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene B1 mit Blick stromaufwärts. | 100 |
| Abbildung 4.22: Durchgangsprüfung mit anschließender Instrumentierung der Wanddruckbohrungen durch Einkleben von Kanülen in den Messebenen A und B1. | 101 |
| Abbildung 4.23: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene B0 mit Blick stromaufwärts. | 102 |
| Abbildung 4.24: Instrumentierung des Grenzschiebkammes BLI41B in der Messebene B0 (Instrumentierungsring). | 102 |
| Abbildung 4.25: Fotoaufnahmen eines noch nicht gefrästen Blind Plugs für ein Temperaturregler und von der Instrumentierung der Wanddruckröhrchen mit Hilfe von Schneidringverschraubungen in der Messebene B0 (Instrumentierungsring). | 103 |
| Abbildung 4.26: Fotoaufnahmen der fast komplett instrumentierten Messebene B0 (Instrumentierungsring)..... | 103 |
| Abbildung 4.27: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene B mit Blick stromaufwärts..... | 104 |
| Abbildung 4.28: Fotoaufnahmen der instrumentierten Sonden BLI42B, BLO42B (links) und TT42B (rechts)..... | 104 |
| Abbildung 4.29: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene C mit Blick stromaufwärts. | 105 |
| Abbildung 4.30: Instrumentierung des Grenzschiebkammes BLI48C in Messebene C. | 105 |
| Abbildung 4.31: Qualitative Darstellung der Messpositionen in Messebene D mit Blick stromaufwärts. | 106 |
| Abbildung 4.32: Fotoaufnahme kurz vor der Instrumentierung der Totaldrucksonde PT50D in Messebene D. | 106 |
| Abbildung 4.33: Qualitative Darstellung der Messpositionen am Diffusor mit Blick stromaufwärts. | 107 |
| Abbildung 4.34: Äußere Fotoaufnahme der Instrumentierung am Diffusor..... | 107 |
| Abbildung 4.35: Anlagenschema der Ringgitterkaskade. | 109 |
| Abbildung 4.36: Schematische Darstellung vom Prinzip der Datenerfassung. | 111 |
| Abbildung 4.37: NI CompactRIO (links) und Versuchswarte (rechts)..... | 111 |
| Abbildung 5.1: Betriebskurve der Versuchsfahrt. | 113 |
| Abbildung 5.2: Hochlaufkurve der Versuchsfahrt. | 113 |
| Abbildung 5.3: Detaillierte Darstellung der Einschleif- und Messdauern innerhalb der Betriebskurve. | 114 |
| Abbildung 5.4: Flächenmittelung anhand einer Kreisring-Messebene im Ringraum für Rake-Messungen. | 115 |
| Abbildung 5.5: Definition des Integrals eines Kreisringsektors um einen beliebigen Messpunkt j. | 116 |
| Abbildung 5.6: Konturplot vom Totaldruck in Ebene A unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts)..... | 117 |
| Abbildung 5.7: Konturplot von der Totaltemperatur in Ebene A unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts). | 117 |
| Abbildung 5.8: Grafische Darstellung der Tages- und Betriebspunkt Korrektur beim Totaldruck in Ebene A. | 118 |
| Abbildung 5.9: Grafische Darstellung der Tages- und Betriebspunkt Korrektur bei der Totaltemperatur in Ebene A. | 119 |
| Abbildung 5.10: Radiale Verläufe (schwarz/Umfangsmittelung) und Ringraummittelwerte (rot/Radialmittelung) von Totaldruck und -temperatur (unkorrigiert/korrigiert) in Ebene A über der prozentualen Kanalhöhe. | 120 |
| Abbildung 5.11: Konturplot vom Totaldruck in Ebene B0 unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts)..... | 121 |
| Abbildung 5.12: Konturplot von der Totaltemperatur in Ebene B0 unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts). | 121 |
| Abbildung 5.13: Konturplot vom Totaldruck in Ebene C unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts)..... | 122 |
| Abbildung 5.14: Konturplot von der Totaltemperatur in Ebene C unkorrigiert (links) und korrigiert (rechts). | 122 |
| Abbildung 5.15: Aerodynamisches Kontrollvolumen zur Ermittlung des TCF-Druckverlustes (oben) und Darstellung der Nachläufe (Wakes) von IGVs in mittels der Totaldruckverteilungen in den Ebenen B0 und C (unten). | 123 |

Abbildung 5.16: Radiale Verläufe (schwarz/Umfangsmittelung) und Ringraummittelwerte (rot/Radialmittelung) von Totaldruck (gesamt) und -temperatur (unkorrigiert/korrigiert) in Ebene B0 über der prozentualen Kanalhöhe.124

Abbildung 5.17: Radiale Verläufe (schwarz/Umfangsmittelung) und Ringraummittelwerte (rot/Radialmittelung) von Totaldruck (gesamt) und -temperatur (unkorrigiert/korrigiert) in Ebene C über der prozentualen Kanalhöhe.124

Abbildung 5.18: Kontrollpositionen für die Area Ratio am Austrittsdiffusor.127

Abbildung 5.19: Verlauf der Area Ratio entlang der Länge des Austrittsdiffusors.127

Abbildung 5.20: Gegenüberstellung des Druckrückgewinns vom Austrittsdiffusor mit dessen Area Ratio.129

Abbildung 5.21: Anlagendruckverlauf der Ringgitterkaskade, Quelle: Eigene Darstellung.130

9 TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Tabelle 3.1: Eckdaten der Verdichteranlage bei 1,01325bar und 25°C..... | 30 |
| Tabelle 4.1: Gesamtübersicht über die in den einzelnen Messebenen eingesetzten Sonden | 96 |

10 ANHANG

CD-ROM mit elektronischer Version der Arbeit und ausgewählten Montagefotos