

# **Evaluierung der Zu- und Abströmbedingungen eines Turbinenprüfstandes und deren Verbesserungsmöglichkeiten**

Diplomarbeit  
von  
Walser Alexander

durchgeführt am  
Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik  
an der  
Technischen Universität Graz

Institutsvorstand:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir

---

Betreuer:  
Dipl.-Ing. Dr.techn. Emil Göttlich  
Dipl.-Ing. Christian Faustmann

---



**INSTITUT FÜR THERMISCHE  
TURBOMASCHINEN UND MASCHINENDYNAMIK**



**Vorwort:**

Die vorliegende Diplomarbeit wurde am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der Technischen Universität Graz im Rahmen des Projektes AMICA (Aeroelastic Mid Turbine Frame Investigations Combined with Acoustics) durchgeführt.

Danken möchte ich hiermit dem Institutsvorstand o.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir, dass ich die Möglichkeit bekam, meinen Abschluss an seinem Institut durchführen zu können.

Zudem möchte ich meinen Betreuern Dr. Emil Göttlich und DI Christian Faustmann danken, die stets ein offenes Ohr und Zeit bei jeglichen Fragen gefunden haben. Außerdem möchte ich Prof. Jakob Woisetschläger danken, von dem ich sehr viel Hilfe zur berührungslosen, thermischen Messtechnik bekam.

Ein außerordentlicher Dank gebührt auch meinen Eltern, die mir das Studium erst ermöglicht haben.

Walser Alexander

**Kurzfassung:**

Diese Arbeit befasst sich mit der Strömungsuntersuchung der transsonischen Testturbine, welche sich am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik befindet. Vor der Hochdruckturbine befindet sich eine Mischkammer. In dieser werden zwei Luftmassenströme, ein kalter von einer Verdichteranlage kommend, ein warmer von der Umgebung angesaugt und durch einen Bremsverdichter komprimiert, vermischt. Aufgrund eines kurzen Durchmischungsweges wird eine unvollständige Durchmischung angenommen. Diese wird durch Totaldruck- und Totaltemperaturmessungen bei der Zuströmung zur Turbine gemessen. Zudem wird die Mischkammer mittels Infrarot-Thermographie (Wärmebildkamera) auf Unregelmäßigkeiten untersucht. Die Messungen erfolgen bei drei unterschiedlichen Betriebspunkten.

Die Annahme, dass es Unregelmäßigkeiten in der Temperaturverteilung gibt, wird bestätigt, wobei die Homogenität der Druckverteilung ausreichend ist. Am Ende werden Konzeptideen zur Erreichung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung am Eintritt in die Hochdruckstufe vorgestellt.

**Abstract:**

This thesis deals with the flow analysis of a transonic test turbine, which is located at the Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics. In front of the high pressure turbine there is a mixing chamber. In this chamber two air mass flow rates are mixed, a cold one, coming from a compressor station and a warm one, drawn from the environment and compressed by a brake compressor. Due to the short mixing length, an incomplete mix is assumed. This is shown by total pressure and total temperature measurements in flow of the turbine downstream the mixing chamber. In addition the mixing chamber is analyzed for hot spots by using infrared thermography (thermal imaging camera). The measurements are made at three different operating points.

The assumption, that there are irregularities in the temperature distribution is confirmed, wherein the homogeneity of the pressure distribution is sufficient. At the end conceptual ideas are presented to equalize the temperature distribution at the inlet of the high pressure level.

## Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung und Aufgabenstellung:.....	1
2	Theoretische Grundlagen der Messtechnik:.....	6
2.1	Totaldruck- und Totaltemperaturmessung: .....	6
2.1.1	Totaldruckmessung: .....	6
2.1.2	Totaltemperaturmessung: .....	11
2.1.3	Messwerterfassung:.....	15
2.1.4	Temperaturkalibrierung:.....	15
2.2	Thermographie-Kamera: .....	20
2.2.1	Grundlagen zur Strahlung: .....	20
2.2.2	Aufbau und Funktionsweise einer Thermographiekamera: .....	25
2.3	Korrektur der Betriebspunktschwankung .....	32
3	Versuchsaufbau:.....	34
4	Messungen und Ergebnisdiskussion: .....	37
4.1	Aero Design Point: .....	38
4.1.1	360-Grad-Messung in der Eintrittsebene: .....	38
4.1.2	360-Grad-Messung in der Austrittsebene: .....	48
4.1.3	Oberflächenmessung an der Mischkammer: .....	57
4.1.4	Betriebspunkt über die Zeit der Messung: .....	60
4.2	Offdesign 1 .....	63
4.2.1	360-Grad-Messung in der Eintrittsebene: .....	63

4.2.2	360-Grad-Messung in der Austrittsebene: .....	68
4.2.3	Oberflächenmessung an der Mischkammer: .....	73
4.2.4	Betriebspunkt über die Zeit der Messung: .....	75
5	Konzeptideen zur Erreichung der erwünschten Temperaturverteilung:.....	77
6	Fazit:.....	81
	Abbildungsverzeichnis: .....	82
	Tabellenverzeichnis:.....	84
	Literaturverzeichnis:.....	85
	ANHANG: .....	86
I	Offdesign 2:.....	86
II	Grenzwerte: .....	99
III	Beschreibung der beigelegten CD:.....	102

## Nomenklatur:

### Abkürzungen:

ITTM	Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik
AMICA	Aeroelastic Mid Turbine Frame Investigations Combined with Acoustics
DREAM	ValiDation of Radical Engine Architecture SystemS
HDT	Hochdruckturbine
HD	Hochdruck
NDT	Niederdruckturbine
ND	Niederdruck
TMTF	Turning Mid Turbine Frame
FS	Full Scale
IR	Infrarot
KWB	Kurzwellenband
LWB	Langwellenband
ADP	Aero Design Point
OFF 1	Offdesign 1
OFF 2	Offdesign 2

### physikalische Größen:

$p$	[bar]	Druck
$p_{tot}$	[bar]	Totaldruck
$p_{stat}$	[bar]	statischer Druck
$p_{atm}$	[bar]	Atmosphärendruck
$T$	[K]	Temperatur
$t$	[°C]	Temperatur
$T_{tot}$	[K]	Totaltemperatur
$T_{stat}$	[K]	statische Temperatur
$T_E$	[K]	Eigentemperatur
$T_{mess}$	[K]	gemessene Temperatur
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$c_p$	[kJ/kgK]	spezifische Wärmekapazität
$\kappa$	[-]	Isentropenexponent
$Ma$	[-]	Machzahl
$u$	[m/s]	Geschwindigkeit
$u_\infty$	[m/s]	Geschwindigkeit der ungestörten Strömung
$Pr$	[-]	Prandtl-Zahl
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\alpha$	[m <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit

**Abmessungen:**

$D_i$	[mm]	Innendurchmesser
$D_a$	[mm]	Aussendurchmesser

**Temperaturmessung:**

$r$	[-]	Recovery Faktor
$\alpha_T$	[mV/K]	Thermospannungskoeffizient
$U_T$	[mV]	Thermospannung
$U$	[mV]	Spannung

**Wärmestrahlung:**

$E$	[-]	einfallende Strahlung
$E_A$	[-]	absorbierte Strahlung
$E_R$	[-]	reflektierte Strahlung
$E_T$	[-]	transmittierte Strahlung
$\alpha$	[-]	Absorptionsgrad
$\tau$	[-]	Transmissionsgrad
$\rho$	[-]	Reflexionsgrad
$\varepsilon$	[-]	Emissionsgrad
$e_{s\lambda}$	[W /m <sup>3</sup> ]	Strahlenspektrum schwarzer Körper
$C_1$	[-]	Konstante
$C_2$	[-]	Konstante
$\lambda$	[nm]	Wellenlänge
$\delta$	[°]	Beobachtungswinkel
$C_s$	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]	Boltzmann-Konstante
$e(T)$	[W/m <sup>2</sup> ]	Gesamtemission

**Korrektur:**

$T_{tA_{corr}}$	[K]	korrigierte Totaltemperatur der Eintrittsebene
$T_{tF_{corr}}$	[K]	korrigierte Totaltemperatur der Austrittsebene
$T_{tA}$	[K]	Totaltemperatur der Eintrittsebene
$T_{tF}$	[K]	Totaltemperatur der Austrittsebene
$T_{0MK}$	[K]	Mischkammertemperatur
$T_{0MK_{derzeit}}$	[K]	Mischkammertemperatur zum Zeitpunkt der Messwerterfassung
$p_{tA_{corr}}$	[bar]	korrigierter Totaldruck der Eintrittsebene
$p_{tF_{corr}}$	[bar]	korrigierter Totaldruck der Austrittsebene
$p_{tA}$	[bar]	Totaldruck der Eintrittsebene
$p_{tF}$	[bar]	Totaldruck der Austrittsebene
$p_{0MK}$	[bar]	Mischkammerdruck
$p_{0MK_{derzeit}}$	[bar]	Mischkammerdruck zum Zeitpunkt der Messwerterfassung

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung:

Heutzutage ist ein rascher Transport von Gütern und Personen wichtig. Um den damit verbundenen Energiebedarf der Bevölkerung decken zu können, muss auf fossile Primärenergie (Erdöl, Erdgas, Kohle) zurückgegriffen werden. Die fossile Energie liegt in gespeicherter Form vor, jedoch enthält sie Kohlenstoff. Dieser wandelt sich bei der Verbrennung mit ausreichend Sauerstoff in Kohlenstoffdioxid um.

CO<sub>2</sub> ist ein Abfallprodukt, welches also während der Energieerzeugung entsteht. Die Ausscheidungen von CO<sub>2</sub> werden auch CO<sub>2</sub>-Emissionen genannt. In der Atmosphäre fördern diese den anthropogenen Treibhauseffekt (vom Menschen beeinflusster Treibhauseffekt), welcher zur globalen Erwärmung führt. Die Folgen der globalen Erwärmung sind auch immer mehr zu spüren, so zum Beispiel in der Gletscherschmelze sowie dem Schmelzen der Polkappen, was ein vermehrtes Auftreten von extremen Wettersituationen zur Folge hat. Das hat einerseits wirtschaftliche Folgen (Ausbleiben der Ernte, Tourismus,...) andererseits aber auch ökologische und ökonomische. [4]

Der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoß betrug 2010 laut [1] 33.158 Millionen Tonnen. Dies ist ein Anstieg um rund 5,2 Prozent gegenüber dem vorherigen Emissions-Rekordjahr 2008. Der Rückgang von 2008 auf 2009 kann auf die Weltwirtschaftskrise zurückgeführt werden. Eine Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2010 war also anzunehmen, aber Wissenschaftler erwarteten keinen solch drastischen Anstieg. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion ist also mittlerweile noch wichtiger als je zuvor, um dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken.

Etwa ein Drittel der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind verkehrsbedingt (Personen- und Güterverkehr). Davon entfallen lt. [2] 12 Prozent auf den Luftverkehr. Dies ist ein Anteil von 4 % an den gesamten weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ferner wird prognostiziert, dass die Luftfahrt die nächsten 20 Jahre um 5 % jährlich anwachsen wird. [3]

Beim Versuch den Treibhauseffekt in Grenzen zu halten werden verschiedene Wege eingeschlagen:

- Strengere Vorschriften in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß
- Steigerung der Effizienz von Verkehrsmitteln und Kraftwerken
- Regenerative Energien als mögliche Alternativen

Dementsprechend werden auch im Triebwerksbau entsprechende Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Reduktion getroffen. EU-Projekte zur Minderung der Schadstoff- und Lärmemissionen werden durchgeführt. Eines dieser Projekte zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Flugzeugtriebwerken ist das Projekt DREAM (ValiDation of Radical Engine Architecture SystemeS), welches am Zwei-Wellen-Rig des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik (ITTM) der TU Graz durchgeführt wurde.

### Das Zwei-Wellen-Rig am ITTM:

Allgemein muss in Flugzeugturbinen der Massenstrom nach der Hochdruckturbinen (HDT) zur Niederdruckturbinen (NDT) geleitet werden. Die Niederdruckturbinen wird mit einer um ca. 1/3 geringeren Drehzahl als die Hochdruckturbinen betrieben. Um dies aber effizient realisieren zu können sind große ND-Rotordurchmesser erwünscht. Somit muss die Strömung von einem kleineren Radius am Austritt aus der HDT zu einem größeren Radius am Eintritt der NDT umgelenkt werden, ohne dabei große Strömungsverluste zu verursachen.

Um die Strömung bei einem möglichst kurzen Weg auf diesen größeren Radius zu leiten dienen S-förmige Kanäle. Am Institut werden zu diesem Zweck spezielle Turning Mid Turbine Frames (TMTF's) experimentell untersucht. In Abb. 1 ist ein Beispiel eines solchen TMTF zu sehen. Im Inneren des TMTF befinden sich somit 16 Stützschaufeln, die auch die Umlenkung der Strömung für die nachfolgende Turbinen übernehmen (HDT und NDT drehen gegenläufig). [5]

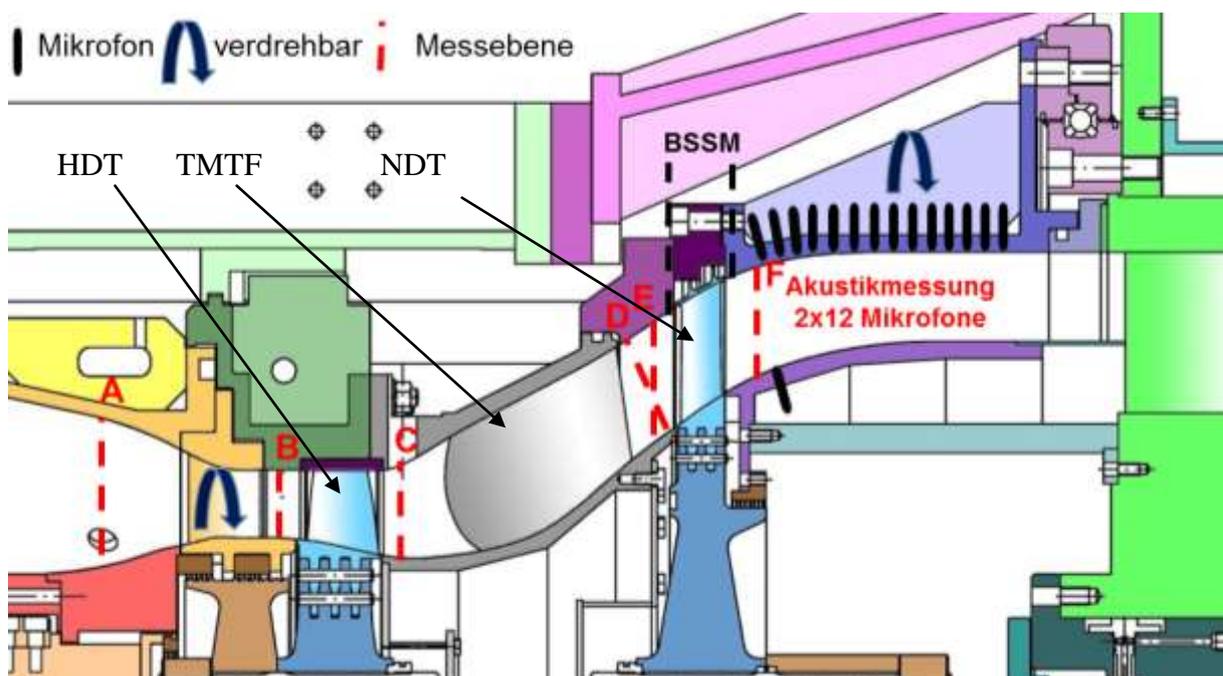


Abb. 1: S-förmiger TMTF zur besseren Strömungsführung

Der Luftmassenstrom, welcher das Zwei-Wellen-Rig (Abb. 2) durchströmt, setzt sich aus zwei Teilmassenströmen zusammen. Der erste Massenstrom wird von einer Verdichteranlage bereitgestellt. Der zweite Massenstrom wird von der Umgebung angesaugt und anschließend durch einen Bremsverdichter komprimiert. Dabei ist der Anteil beider Teilmassenströme am Gesamtmassenstrom etwa gleich groß. Zum Antrieb dieses dreistufigen, radialen Bremsverdichters wird die abgegebene Leistung der HDT eingesetzt.

Der Massenstrom von der Verdichteranlage durchströmt einen Kühler, um die gewünschte Temperatur einzustellen. Dieser Massenstrom ist bei der Vermischung beider Massenströme in der Mischkammer bis zu 90 K kühler als der vom Bremsverdichter kommende Massenstrom.

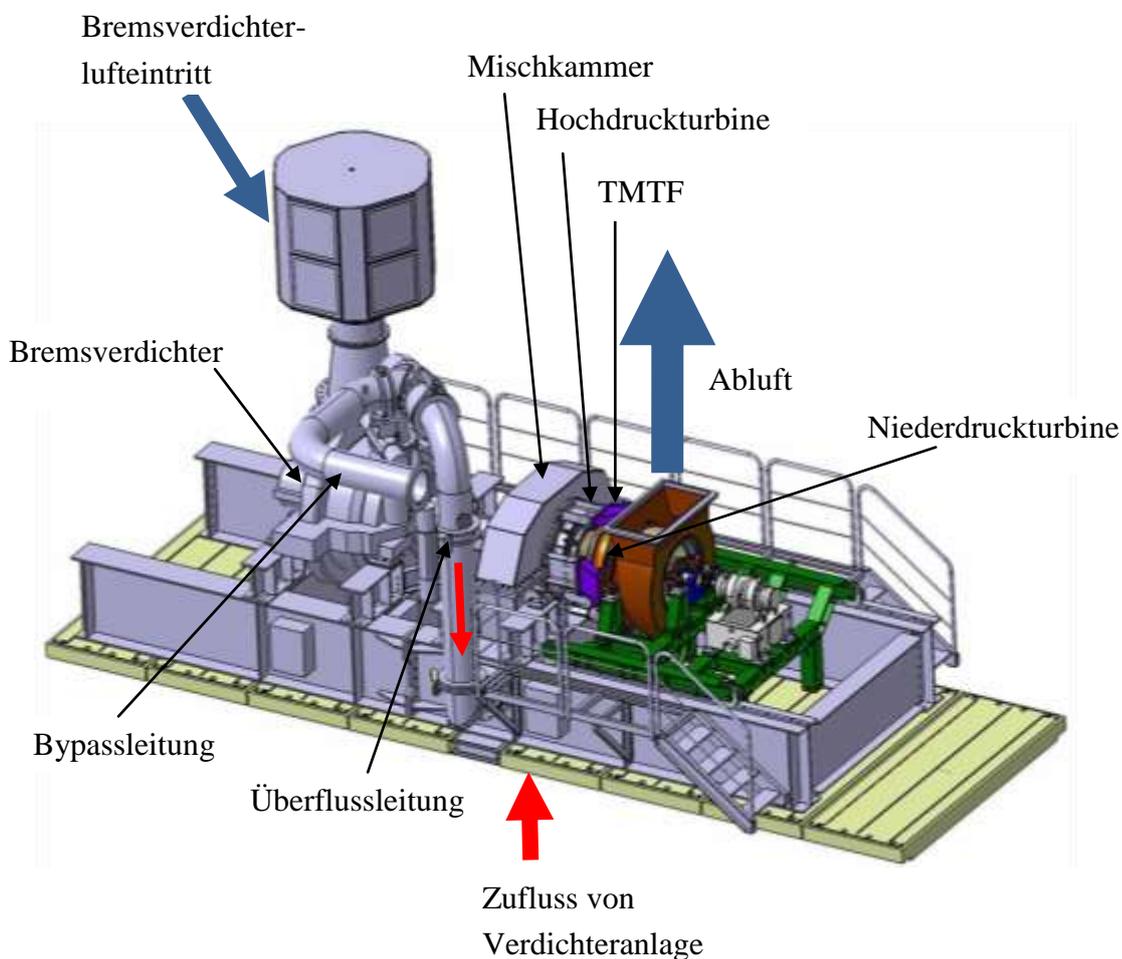
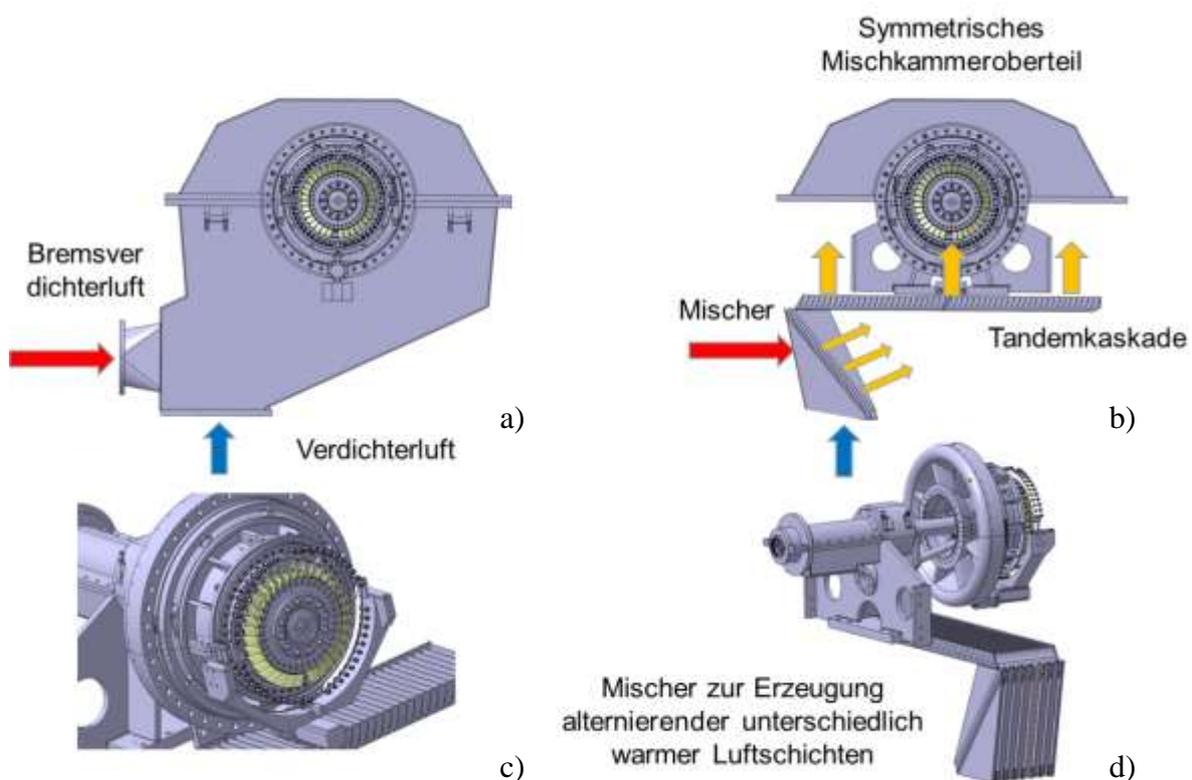


Abb. 2: Zwei-Wellen-Rig (Hubinka)[6]

In Abb. 3 a) sind die beiden, der Mischkammer zugeführten, Massenströme zu sehen. Die Verdichterluft ist mit dem blauen, von unten kommenden, Pfeil dargestellt, wobei die Bremsverdichterluft (roter Pfeil) von links kommend zugeführt wird. Dabei werden beide Massenströme um 90 Grad versetzt zugeführt. Anschließend durchströmen beide Massenströme einen Mischer (Abb. 3 b) und d)). Dieser soll eine gleichmäßige Durchmischung beider Massenströme und Abströmung des Gesamtmassenstroms aus der Mischkammer realisieren. Die in der Darstellung b) zu sehende Tandemkaskade dient zur gleichmäßigen Verteilung des vermischten Massenstroms über den Umfang der Mischkammer.



**Abb. 3: Mischung beider Massenströme in der Mischkammer**

Die Mischkammer hat die Aufgabe einen über den Umfang homogen durchmischten Luftmassenstrom der Hochdruckstufe bereit zu stellen. Zunächst passiert die Strömung den Hochdruckstator ehe sie die HDT durchströmt. Mit Hilfe des anschließenden TMTF's wird das Fluid dem Niederdruckrotor zugeführt. Die abgegebene Leistung der NDT wird von einer Wasserbremse aufgenommen. Der entspannte Luftmassenstrom verlässt den Prüfstand durch die anschließende Abluftleitung in die Umgebung. In Abb. 2 ist das Zwei-Wellen-Rig mit den entsprechenden Komponenten dargestellt. [6]

Die künftig folgende Messkampagne AMICA (Aeroelastic Mid Turbine Frame Investigations Combined with Acoustics) untersucht die akustische Ausbreitung hinter dem HD-Rotor. In Abb. 1 ist die Position der Akustikmessung im Zwei-Wellen-Rig dargestellt. Für die Akustikmessung ist es nötig eine möglichst konstante Schallgeschwindigkeit über den Umfang in Ebene F (Abb. 1, Austritt HD-Rotor) zu erhalten. Die Schallgeschwindigkeit hängt laut  $c = (\kappa * R * T_{stat})^{\frac{1}{2}}$  von der statischen Temperatur ( $T_{stat}$ ) ab.

Um also eine möglichst konstante Temperaturverteilung im Zwei-Wellen-Rig zu garantieren, sollen durch Voruntersuchungen am Eintritt in die HDT (Ebene A, Abb. 1) und am Austritt aus der NDT (Ebene F) folgende Punkte überprüft werden:

- Überprüfung der Mischkammeroberfläche auf Unregelmäßigkeiten in der Temperaturverteilung
- Überprüfung der Totaldruckverteilung am Eintritt in die HDT (Ebene A) und am Austritt aus der NDT (Ebene F)
- Überprüfung der Totaltemperaturverteilung am Eintritt in die HDT (Ebene A) und am Austritt aus der NDT (Ebene F)

Die Unregelmäßigkeiten der Mischkammeroberfläche können mit Hilfe einer Thermographie-Kamera aufgezeigt werden.

Die Totaldruck- und Totaltemperaturverteilungen können mittels 360°-Umfangsmessungen ermittelt werden. Dabei kommen Totaldruck- und Totaltemperaturbäume zum Einsatz, welche über die Kanalhöhe äquidistant verteilte Messstellen aufweisen.

Abschließend sollen, falls nötig, Konzeptideen zur Verbesserung der Zu- und Abströmung des Prüfstandes erläutert werden.

## 2 Theoretische Grundlagen der Messtechnik:

### 2.1 Totaldruck- und Totaltemperaturmessung:

Es wird zwischen diversen Arten der Totaldruck- und Totaltemperaturmessung unterschieden. Im folgenden Kapitel wird nur auf die Grundlagen der zur Messung verwendeten Messinstrumente näher eingegangen.

#### 2.1.1 Totaldruckmessung:

Die Druckmessung ist in vielen Gebieten des Maschinenbaus, wie auch hier, wichtig, da der Druck eine thermodynamische Zustandsgröße ist. Die Einheit des Drucks ist Pascal [Pa]. Üblich sind auch Bar [bar] oder Newton / Quadratmeter [N/m<sup>2</sup>].

Einheit:  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ bar}$  (1)

Bei einer Strömung wird zwischen dem statischen Druck und dem Totaldruck unterschieden. Der statische Druck ( $p_{stat}$ ) ist die Normalkraft pro Flächeneinheit, welche die Strömung auf eine zur Strömungsrichtung parallele Wand ausübt. Der Totaldruck ( $p_{tot}$ ) setzt sich in Fluiden aus statischem Druck und dynamischem Druck zusammen.

Totaldruck:  $p_{tot} = p_{stat} + \rho \cdot \frac{u^2}{2}$  (2)

Während der statische Druck direkt an der Wand gemessen werden kann, muss der Totaldruck mittels Totaldrucksonden in der Strömung gemessen werden.

Die einfachste und deswegen auch am häufigsten verwendete Totaldrucksonde ist das Pitot-Rohr. Abb. 4 zeigt das Prinzip eines solchen Rohres. Ein gegen die Strömungsrichtung offenes, dünnwandiges Metallrohr befindet sich bei dieser Art der Druckmessung in der Strömung. Somit wird der Totaldruck an der Sondenspitze gemessen. Gewöhnlich werden für die Metallrohre gezogene Stahlkanülen mit Außendurchmesser von etwa  $D_a = 2 \text{ mm}$  verwendet. Ein Durchmesser Verhältnis von  $D_i/D_a \sim 0,6$  ist üblich.

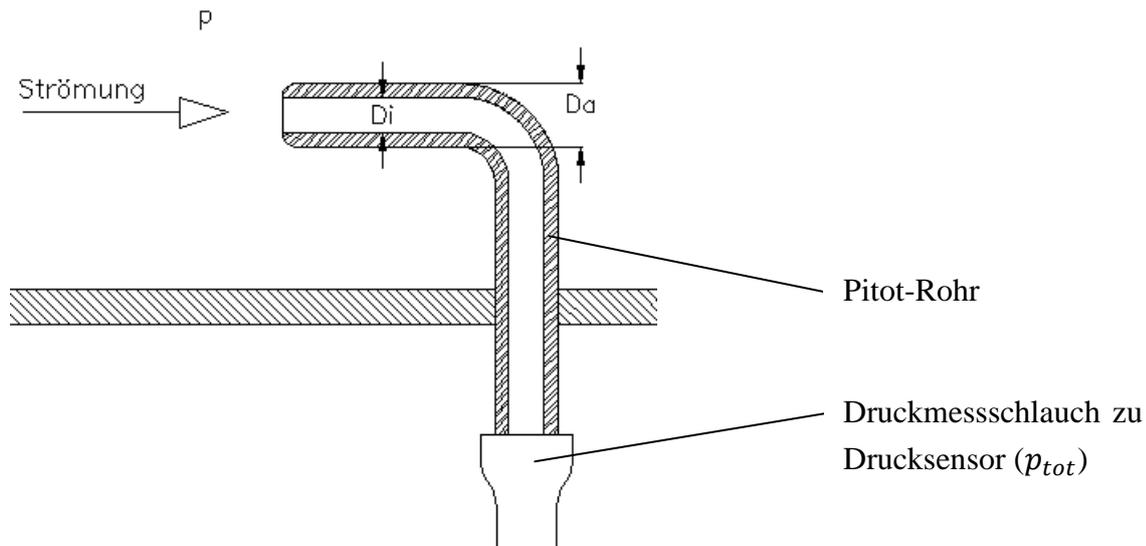


Abb. 4: schematische Darstellung eines Pitot-Rohres

Das Durchmesser Verhältnis der Pitot-Rohre ist für die Totaldruckmessung beinahe vernachlässigbar, wenn die Sonde gegen die Strömungsrichtung steht. Allerdings wird  $D_i/D_a$  bei einer schrägen Anströmung der Sondenspitze in Abhängigkeit des Winkels entscheidend. Abb. 5 links, zeigt den Anströmwinkel über den gemessenen Fehler in Prozent in Abhängigkeit vom Durchmesser Verhältnis. Daraus ist ersichtlich, dass für ein typisches Durchmesser Verhältnis von  $D_i/D_a = 0,74$  eine Fehlanströmung von  $\alpha \sim \pm 12^\circ$  erlaubt ist, um ein hinreichend genaues Ergebnis zu erhalten.

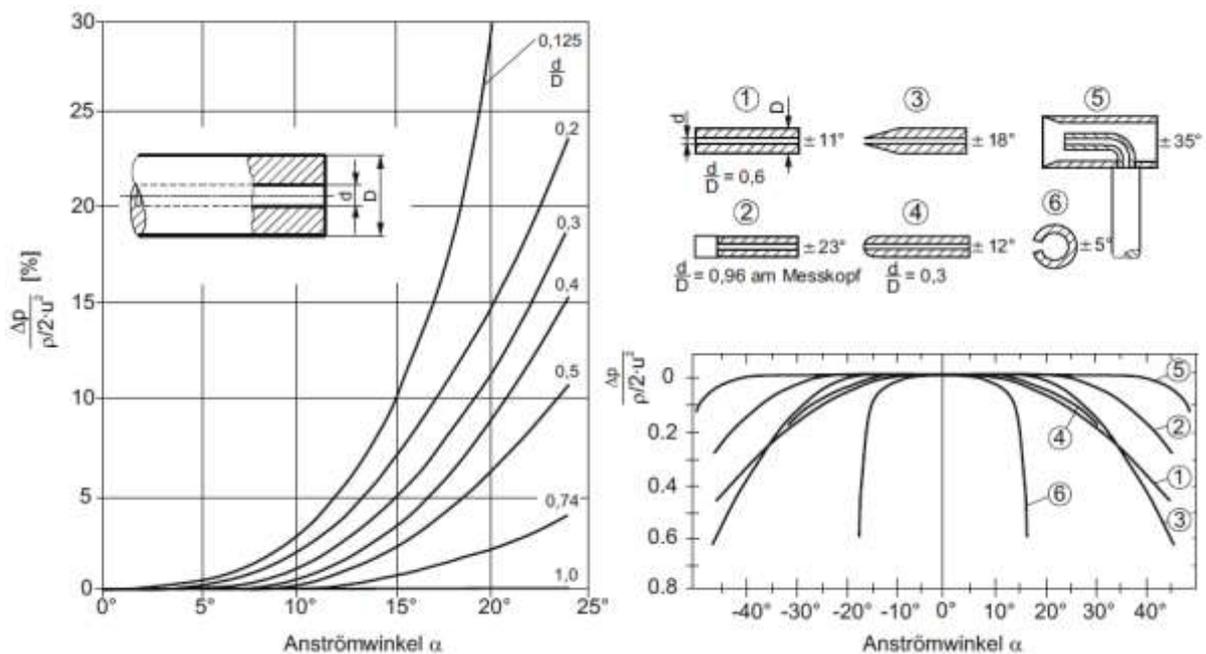


Abb. 5: Winkelcharakteristik von Pitot-Sonden (links, nach Huston) [7] und von Gesamt-/Totaldrucksonden (rechts, nach Chue) [7]

Eine größere Unempfindlichkeit kann durch Anpassung der Form der Sondenspitze erreicht werden. Abb. 5 rechts, zeigt die Abhängigkeit der Form des Sondenkopfes von der Empfindlichkeit der Fehlanströmung. Während die Form 1 beispielsweise für Unterschallströmungsmessung verwendet wird, wird bei Messungen in Überschallströmungen normalerweise Form 3 verwendet. Die am Turbinenprüfstand verwendete Sonden-Kopfform ist die Form 5, welche lt. Abb. 5 einen Anströmwinkel von  $\alpha \cong \pm 35^\circ$  zulässt.

Am Zwei-Wellen-Rig werden Totaldruckbäume mit mehreren, über die Kanalhöhe verteilte, Pitot-Rohre verwendet. So befindet sich am Eintritt ein Totaldruckbaum mit vier Messstellen, wobei jener am Austritt sieben davon besitzt. Aufgrund der größeren Ringfläche am Austritt ist dort eine größere Anzahl von Messstellen erforderlich.

Staudrucksonden erlauben keine betragsmäßige Erfassung des Druckes, sondern stellen den gewünschten zu messenden Druck nur bereit. Durch Druckmessschläuche werden die Totaldrucksonden mit den Druckaufnehmern verbunden. Es muss zwischen mechanischen und elektromechanischen Drucktransmittern unterschieden werden. Für die Messung werden elektromechanische Druckmessgeräte verwendet, da diese diverse Vorteile bieten. Einige davon sind:

- Messergebnis liegt in digitaler Form vor
- keine Messfehler durch Ablesen
- leichtere Verarbeitung des Messergebnisses
- schnelle Datenerfassung

Es wird zwischen drei Typen von elektromechanischen Transmittern unterschieden:

- Absolutdrucktransmitter
- Differenzdrucktransmitter
- Überdrucktransmitter

Abb. 6 zeigt die 3 verschiedenen Arten von Aufnehmern.

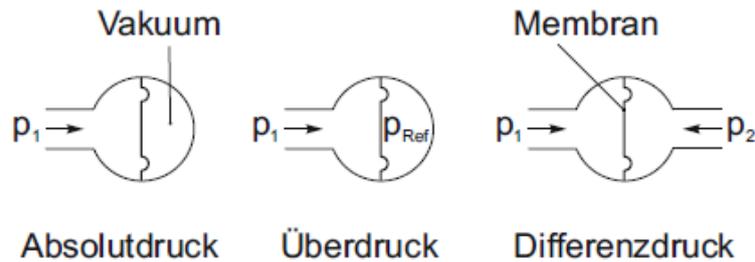


Abb. 6: schematischer Aufbau von Drucktransmittern (Absolut-, Überdruck-, Differenzdrucktransmitter) [7]

Bei der während der Diplomarbeit durchgeführten Messung wird auf das Differenzdruckverfahren zurückgegriffen.

Als Drucksensoren werden piezoelektrische Messelemente verwendet. Hierbei handelt es sich um piezoresistive Drucksensoren, welche Piezokristalle als Messfühler verwenden. Aufgrund der Druckbeaufschlagung eines solchen Kristalles erfolgt eine Ladungstrennung. Somit wird eine zur Druckkraft proportionale elektrische Spannung erzeugt, welche über eine Brückenschaltung ausgelesen werden kann. Piezokristalle, oder auch Piezoquarze genannt, weisen eine starke Temperaturabhängigkeit auf. Diese kann aber vernachlässigt werden, da alle in der Brückenschaltung involvierten Widerstände dasselbe Temperaturverhalten aufweisen.

Abb. 7 zeigt solche piezoresistive Druckaufnehmer, welche zur Messung von Differenz- und Absolutdrücken verwendet werden.

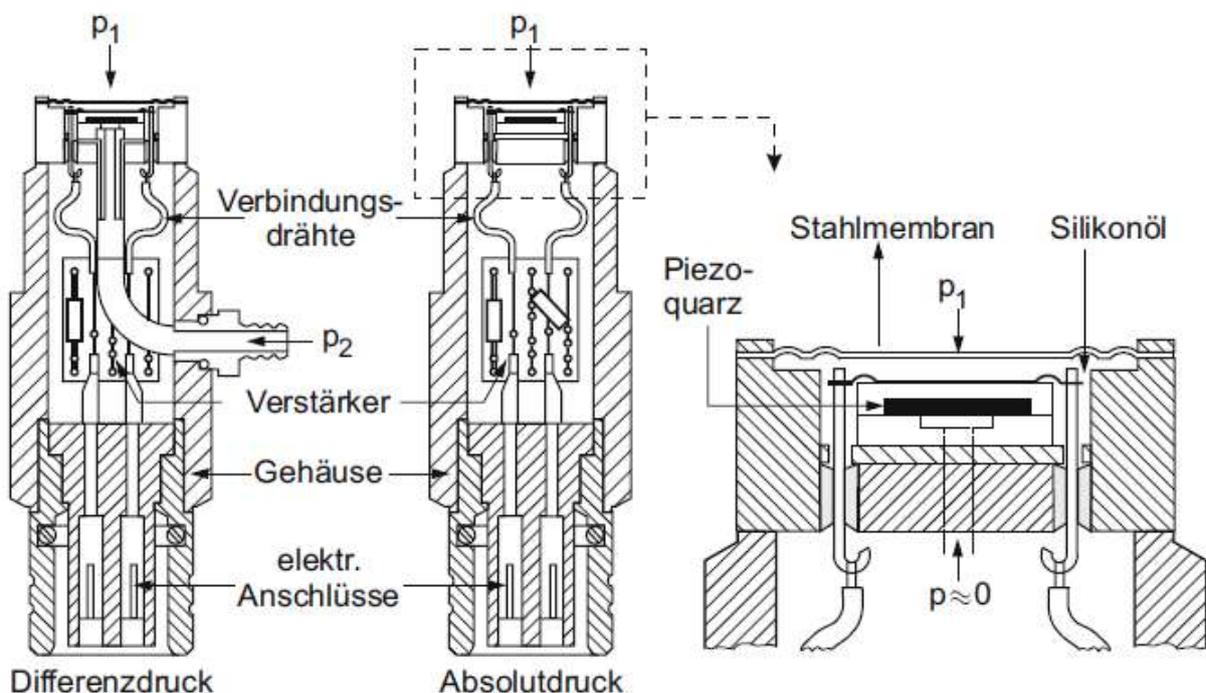


Abb. 7: Piezoresistive Aufnehmer für die Messung von Differenz- bzw. Absolutdrücken (nach Kistler) [7]

Alle elektromechanischen Drucksensoren müssen vorab kalibriert werden, um ein elektrisches Ausgangssignal einem bekannten Druck (meist Umgebungsdruck) zuzuordnen. Das Ergebnis der Kalibrierung muss als analytische Funktion, in tabellarischer oder graphischer Form für die praktischen Messungen bereitgestellt werden, um die Auswertung der Messergebnisse überhaupt zu ermöglichen.

Da es gewünscht ist alle Messpunkte zum gleichen Zeitpunkt zu messen, werden Mehrfach-Drucktransmittersysteme verwendet. Es handelt sich hierbei um mehrere Sensoren, welche parallel geschaltet sind. Ein weiterer Vorteil einer solchen Messeinrichtung liegt darin, dass die Messergebnisse schnell gewonnen und der Datenerfassung weitergeleitet werden können. [7]

Die verwendeten Sensoren sind PSI-Module (Netscanner 9016) der Fa. Pressure Systems. An einem PSI-Modul können insgesamt 16 Drucksonden angeschlossen werden. Die Kalibrierung wird vom Hersteller durchgeführt. Dieser gewährt eine Abweichung des Messergebnisses von maximal  $\pm 0,05\%$  Full Scale (FS). Abb. 8 zeigt ein Foto der verwendeten PSI Module.



**Abb. 8:** Foto der verwendeten PSI-Module

### 2.1.2 Totaltemperaturmessung:

Gleich wie beim Druck handelt es sich bei der Temperatur auch um eine thermodynamische Zustandsgröße. Zudem hängen die Stoffwerte etlicher Flüssigkeiten und Gase von ihrer Temperatur ab. Die Einheit der Temperatur ist das Kelvin [K] oder Grad Celsius [°C].

Umrechnungsfaktor: 
$$T [K] = 273,15 + t [°C] \quad (3)$$

Die Grad Celsius Skala wird definiert durch den Gefrierpunkt und Siedepunkt von Wasser. Bei einem Atmosphärendruck von  $p_{atm} = 1,01325 \text{ bar}$  ergeben sich  $0 \text{ °C}$  für den Gefrierpunkt und  $100 \text{ °C}$  für den Siedepunkt. Die Kelvinskala wird über den absoluten Nullpunkt definiert und ist der Celsiusskala angelehnt. Der Umrechnungsfaktor beträgt dabei 273,15 (also:  $0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$ ).

Die Temperatur kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss über die Änderung von Stoffen bei bekanntem Temperaturverhalten gemessen werden. So misst zum Beispiel das Quecksilberthermometer die Temperatur über die Volumenänderung des Quecksilbers bei einer bestimmten Temperaturänderung. Die Temperatur kann anschließend über eine Skala abgelesen werden.

Bei der Temperaturmessung in einer Strömung muss, gleich wie bei der Druckmessung, zwischen statischer und Totaltemperatur unterschieden werden. Die aus thermodynamischer Sicht wichtigere Temperatur ist die statische Temperatur. Diese kann jedoch nur schwer gemessen werden (z.B.: berührungsloses Verfahren, mit Strömung schwimmender Messfühler). Die Totaltemperatur kann im Staupunkt gemessen werden. Aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik folgt unter der Annahme einer verlustfreien Strömung der Zusammenhang zwischen statischer und Totaltemperatur.

Totaltemperatur: 
$$T_{tot} = T_{stat} + \frac{u_{\infty}^2}{2c_p} \quad (4)$$

Dies gilt aber nur für Unterschallströmung. Für Überschallströmung muss die Totaltemperatur über die Machzahl (Ma) und den Isentropenexponent berechnet werden:

Totaltemperatur (ÜS): 
$$T_{tot} = T_{stat} * \left(1 + \left(\frac{\kappa - 1}{2}\right) * Ma^2\right) \quad (5)$$

Die Eigentemperatur des Sensors ( $T_E$ ) nimmt im Staupunkt die Totaltemperatur an. Die somit gemessene Totaltemperatur gilt aber nur lokal. Wenn das Fluid aus diesem Bereich ausströmt wird es wieder beschleunigt und die gemessene Totaltemperatur ist ungültig. Die Staupunkttemperatur (also auch die Eigentemperatur) und die Temperatur an der neuen Stelle ist nicht dieselbe. Es gilt die Beziehung:

Eigentemperatur: 
$$T_{stat} < T_{mess} < T_{tot} \quad (6)$$

Um diesen Fehler zu vermeiden, muss der sogenannte Recovery-Faktor (r) eingeführt werden. Dieser ist abhängig von der Prandtl-Zahl ( $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{kinematische Viskosität}}{\text{Temperaturleitzahl}}$ ). Für die Luft beträgt er lt. [7]  $r \sim 0,9$  (turbulent) und  $r \sim 0,85$  (laminar). Die gemessene Temperatur beläuft sich so auf:

gemessene Temperatur: 
$$T_E = T_{stat} * \left(1 + r * \left(\frac{\kappa - 1}{2}\right) * Ma^2\right) \quad (7)$$

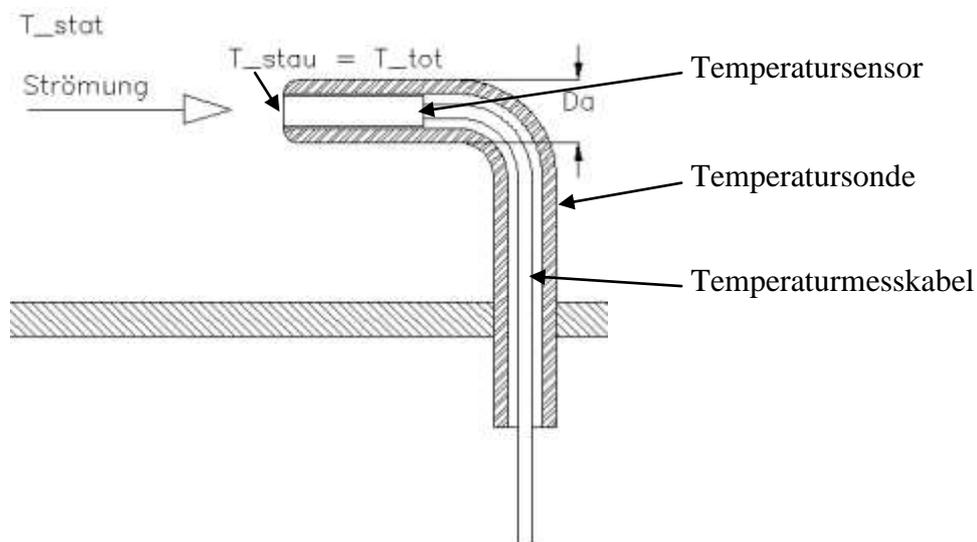
Durch Umformen von (5) und (7) kann die Totaltemperatur korrigiert werden:

Totaltemperatur: 
$$T_{tot} = T_E * \frac{1 + \left(\frac{\kappa - 1}{2}\right) * Ma^2}{1 + r * \left(\frac{\kappa - 1}{2}\right) * Ma^2} \quad (8)$$

Für die Totaltemperaturmessung am Zwei-Wellen-Rig werden thermoelektrische Temperaturmessverfahren verwendet. Die Vorteile sind im Allgemeinen dieselben, wie auch bei der elektromechanischen Druckmessung:

- Messergebnis liegt in digitaler Form vor
- keine Messfehler durch Ablesen
- leichtere Verarbeitung des Messergebnisses
- schnelle Datenerfassung

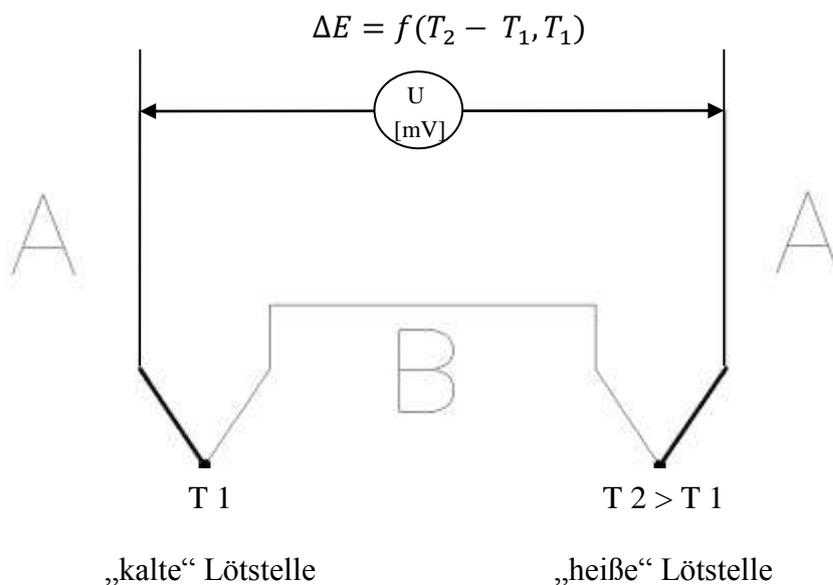
Zur Messung der Totaltemperatur werden Totaltemperatursonden verwendet. Abb. 9 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Sonde.



**Abb. 9: schematische Darstellung einer Totaltemperatursonde**

Als Sensoren kommen Thermoelemente vom Typ K zum Einsatz. Das Initial K gibt Aufschluss auf die Werkstoffpaarung, welche in o.g. Fall Nickel/Chrom-Nickel bezeichnet. Der Temperaturbereich eines solchen Sensors ist lt. Hersteller (JUMO)  $T = -200 \dots +1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Ein Thermoelement beruht auf der Eigenschaft, dass in einem Stromkreis mit zwei verlöteten, unterschiedlichen Metallen bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Lötstellen eine Spannung (U) gemessen werden kann. Die Größe dieser Spannung ist dabei abhängig von der Temperaturdifferenz der beiden Verbindungsstellen. Den somit ausgenutzten Effekt nennt man thermodynamischen Seebeck-Effekt. Abb. 10 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Thermoelements.



**Abb. 10: Aufbau Thermoelement**

Die „kalte“ Lötstelle dient als Referenztemperatur, wobei die „warme“ Lötstelle als Messstelle dient. Die Referenztemperatur wird auf einem bekannten Temperaturniveau gehalten (Beispielsweise der Umgebungstemperatur oder Wasser, welches auf 0°C abgekühlt wird). Durch diese Temperaturen, den Thermospannungskoeffizienten ( $\alpha_T$ ; je nach Metallpaarung unterschiedlich) und die mittels eines Voltmeters gemessene Thermospannung ( $U_T$ ) kann die Temperatur an der „heißen“ Lötstelle berechnet werden.

gemessene Temperatur: 
$$T_E = T_2 = T_1 + \frac{U_T}{\alpha_T} \quad (9)$$

Anschließend muss mittels Recovery-Faktor von der gemessenen auf die reale Totaltemperatur umgerechnet werden, was Formel (8) zeigt.

### 2.1.3 Messwerterfassung:

Die Messwerterfassung für den Druck erfolgt über PSI-Module (Netscanner 9016) der Firma Pressure Scanner. Die Temperatur wird über Fieldpoint-Module (FP) der Fa. National Instruments erfasst. Die Module sind in einem Schaltschrank in der Nähe der Anlage untergebracht. Die Daten werden dem Messcomputer über einen Netzwerk-Switch bereitgestellt.

Die Messdaten werden im Programm LabVIEW Version 7.1 umgerechnet und abgespeichert. Bei dieser Software handelt es sich auch um ein Produkt der Firma National Instruments.

Die Auswertung der Ergebnisse wird mit MATLAB-Routinen durchgeführt.

### 2.1.4 Temperaturkalibrierung:

Während der Diplomarbeit wurde eine Neukalibrierung der am Zwei-Wellen-Rig verwendeten Thermoelemente durchgeführt. Diese Kalibrierung findet vor neuen Messkampagnen oder aber spätestens nach zwei Jahren statt.

Um die gewünschte Temperatur zur Kalibrierung zur Verfügung zu stellen wird ein Kalibrierofen verwendet. Als Vergleichswert wird ein hochwertiges Pt100 benutzt, da diese in der Regel sehr präzise Temperaturfühler darstellen. Zur Befestigung der Totaltemperaturrekes und des Pt100 werden sie an einem Aluminiumblock, welcher für die Messung gefertigt wird, montiert.

Kalibriert werden die Temperaturbäume in Ebene C und F. Der Totaltemperaturbaum in Ebene C weist fünf Messstellen über die Kanalhöhe auf. Beim Totaltemperaturreke in Ebene F handelt es sich dabei um sieben Messstellen. Die verschiedene Anzahl von Messstellen lässt sich auf die verschiedenen Kanalhöhen zurückführen.

Die zur Kalibrierung verwendeten Komponenten sind:

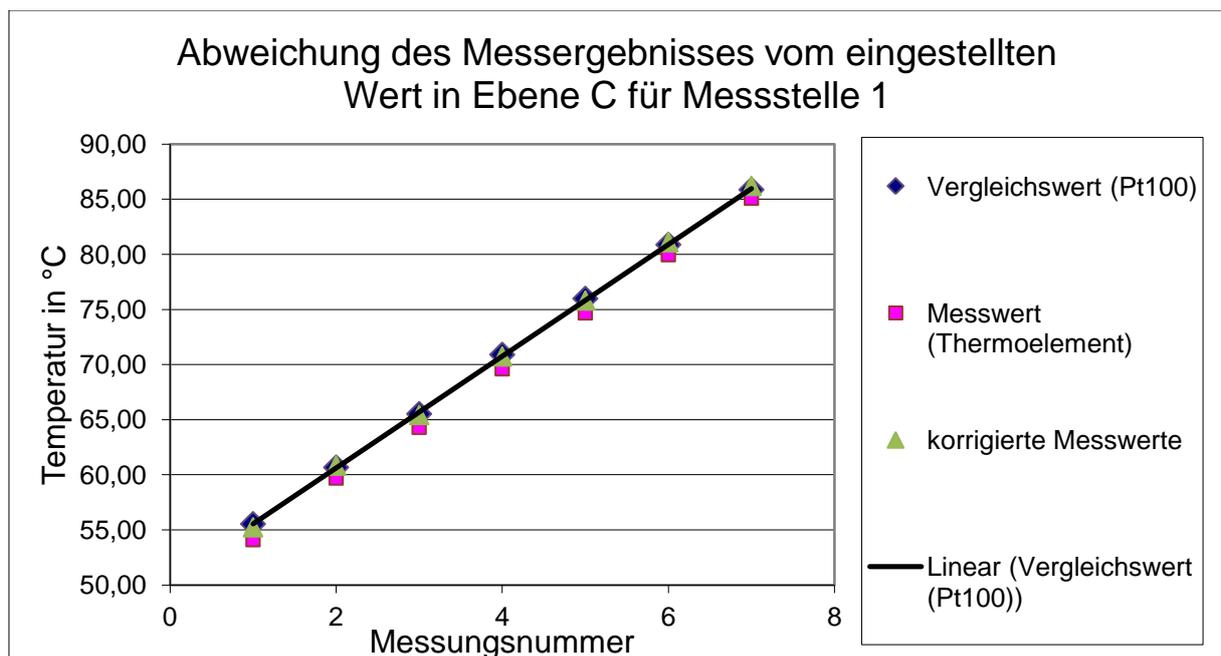
**Tab. 1: zur Kalibrierung verwendete Komponenten**

Kalibrierofen	Fa.: Omega	Typ: CL-710A
Pt-100 1/3 Klasse B	Fa.: JUMO	Genauigkeit: $\Delta t = \pm(0,3 + 0,005 *  T )^*$
Digitalthermometer	Fa.: Greisinger	Typ GMH 2750
Thermoelement Typ K	Fa.: Jumo	Genauigkeit: $\Delta t = \pm 0,004 * T$ or $\pm 1,5 K^*$
Aluminiumblock		

\* ... Laut Tabellenblatt des Herstellers JUMO

### Kalibrierung des Totaltemperaturbaums in Ebene C:

Die fünf Messstellen des Rakes in Ebene C (Abb. 1) werden von 55 – 85 °C in je 5 Gradschritten kalibriert. Die Differenz zwischen den Messwerten der Thermoelemente und der Vergleichswerte des Pt100 wird gebildet. Durch anschließende Mittelwertbildung der Temperaturdifferenzen ergibt sich ein Offset, der zum Messwert addiert wird. Eine Ausgleichsgerade wird aus den Vergleichswerten ermittelt. Abschließend wird die maximale Abweichung des korrigierten Messwerts der jeweiligen Messstelle von der Ausgleichsgeraden berechnet.



**Abb. 11: Beispiel der Abweichung der gemessenen von der eingestellten Temperatur und anschließender Korrektur**

Abb. 11 zeigt als Beispiel die Abweichung der gemessenen von der eingestellten Temperatur und die Auswirkung der Korrektur auf das Messergebnis. Es wird erkannt, dass die korrigierten Werte nur eine minimale Abweichung vom Vergleichswert aufweisen. Die hierfür verwendete Messstelle ist Messstelle 1. Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Kalibrierung in Ebene C.

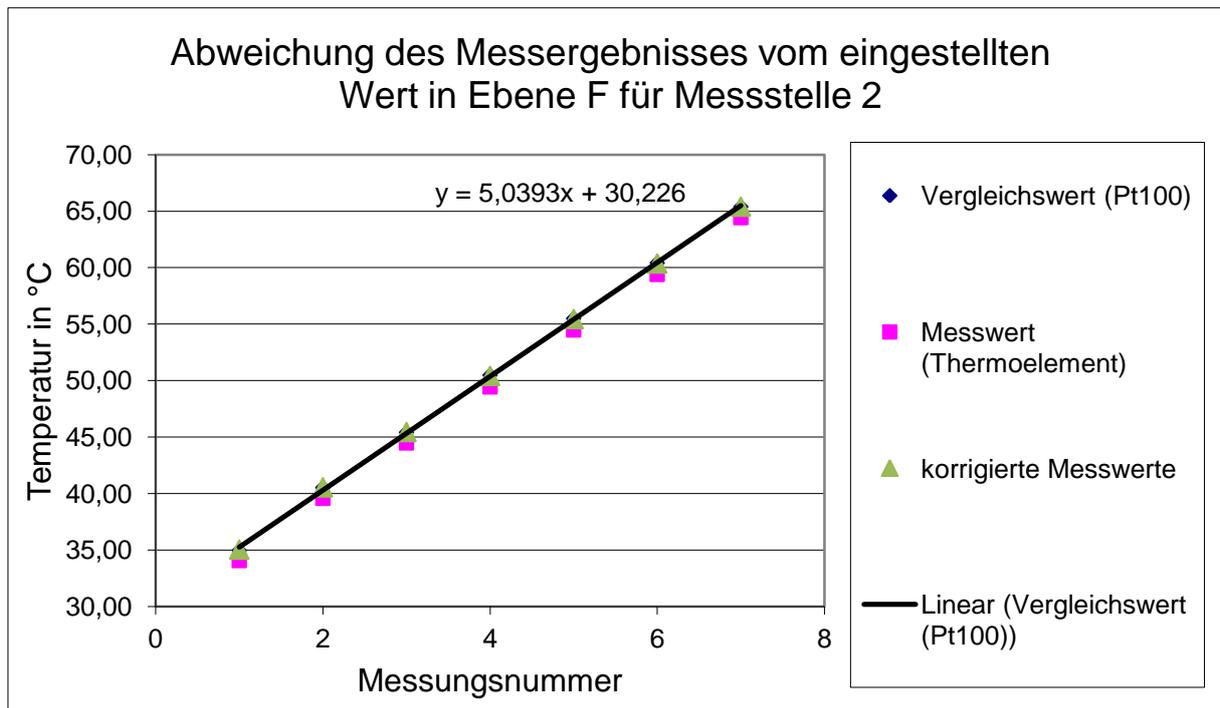
**Tab. 2: Ergebnis der Kalibrierung des Temperaturbaumes in Ebene C**

	Position im Temperaturbaum	Temperatur	Offset	Maximale Abweichung von Ausgleichsgerade
Messstelle 1	hub	55-85 °C	1,13 °C	0,21 °C
Messstelle 2		55-85 °C	0,92 °C	0,33 °C
Messstelle 3		55-85 °C	1,14 °C	0,39 °C
Messstelle 4		55-85 °C	1,23 °C	0,41 °C
Messstelle 5	tip (Außenwand)	55-85 °C	0,86 °C	0,38 °C

## Kalibrierung des Totaltemperaturbaums in Ebene F:

Die sieben Messstellen des Rakes in Ebene F werden von 35 – 65 °C in 5 Gradschritten kalibriert. Anschließend wird gleich vorgegangen, wie bereits für den Temperaturbaum in Ebene C erläutert.

Im nachfolgenden Diagramm (Abb. 12) wird die Abweichung der gemessenen und eingestellten Temperatur und die Auswirkung der Korrektur in Ebene F gezeigt. Für dies wird Messstelle 2 herangezogen, da Messstelle 1 defekt ist. Auch hier kann erkannt werden, dass die korrigierten Messergebnisse den Ergebnissen des Pt100 ähnlich sind.



**Abb. 12: Beispiel der Abweichung der gemessenen von der eingestellten Temperatur und anschließender Korrektur**

**Tab. 3: Ergebnis der Kalibrierung des Temperaturbaumes in Ebene F**

	Position im Temperaturbaum	Temperatur	Offset	Fehler mit Ausgleichsgerade
Messstelle 1	hub	35-65 °C	--	DEFEKT
Messstelle 2		35-65 °C	0,97 °C	0,35 °C
Messstelle 3		35-65 °C	0,89 °C	0,31 °C
Messstelle 4		35-65 °C	0,84 °C	0,32 °C
Messstelle 5		35-65 °C	0,74 °C	0,28 °C
Messstelle 6		35-65 °C	0,88 °C	0,29 °C
Messstelle 7	tip (Außenwand)	35-65 °C	0,76 °C	0,44 °C

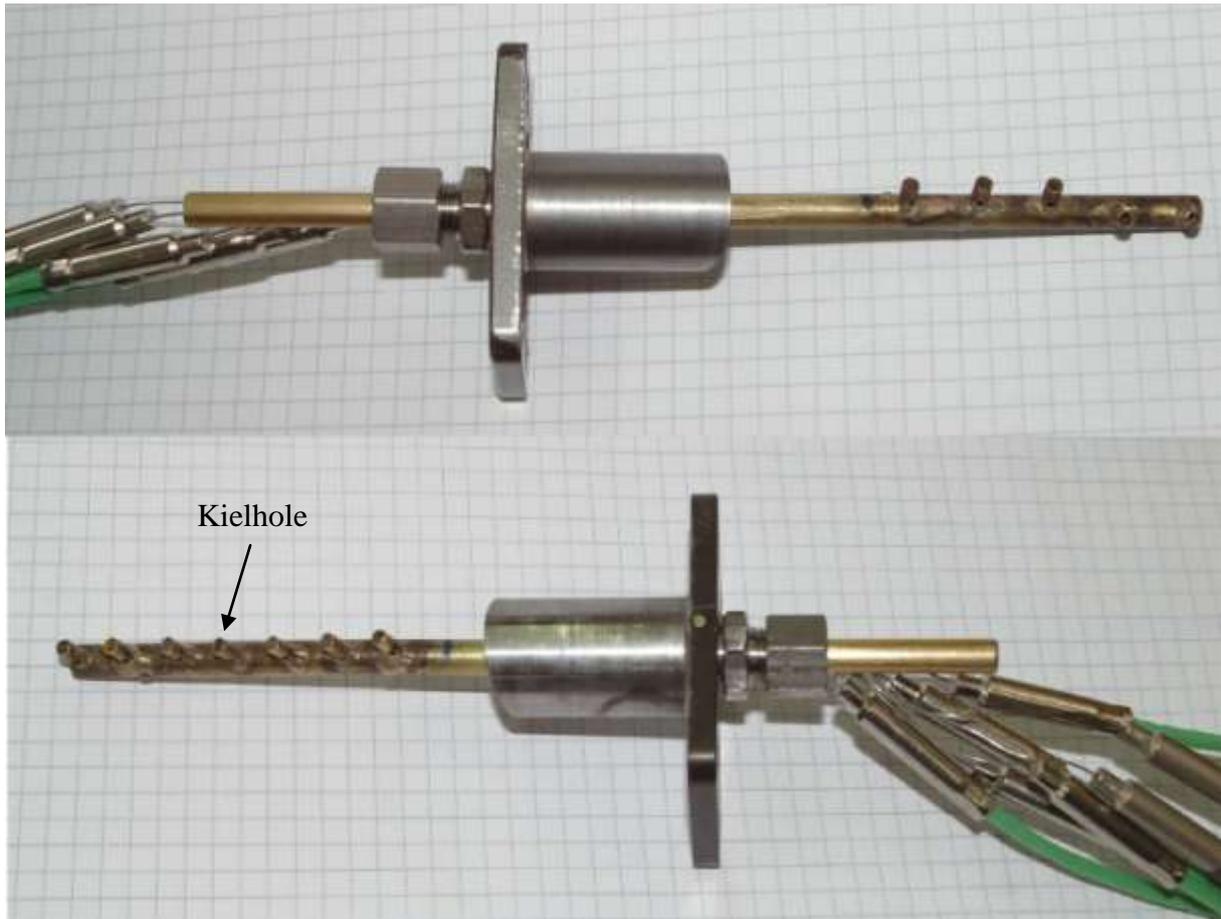
Abb. 13 zeigt den Rake F während der Kalibrierung. Der dafür verwendete Temperaturbereich wird für die jeweiligen Ebenen entsprechend der im Prüfstand vorherrschenden Temperaturen angepasst. Dies ist der Grund warum der Temperaturbereich in Ebene C höher ist als in F. Als Flüssigkeit im Kalibrierofen wird destilliertes Wasser verwendet.



Abb. 13: Rake F und Pt100 bei Kalibrierung in Befestigung(links); Kalibrierung desselben Rakes (rechts)

Möglichkeiten der Abweichung der Messergebnisse:

- Fehler des Thermoelements
- eingebaute Thermoelemente sind alt
- Pt100 sind zwar genauer als Thermoelemente, haben aber trotzdem einen Fehler
- Pt100 reagiert träger als Thermoelement
- Aluminiumblock beeinflusst Messung durch Verwendung verschiedener Metalle bei Temperaturbaum und Pt100 Umhüllung (Unterschiedliche Wärmeleitung)
- Ofen reagiert träge
- keine konstante Temperaturverteilung über Wasserbett (Kein Rührwerk vorhanden)
- Durch Halterung haben die beiden Messfühler einen Abstand voneinander (Abb. 13 links)
- Möglichkeit der Blasenbildung an der Öffnung des Fühlers



**Abb. 14: Temperaturbäume in Ebene C (oben) und Ebene F (unten)**

Abb. 14 zeigt die beiden Temperaturrakes der Ebenen C und F. Auffallend bei Ebene C ist, dass die Sensoren der Thermoelemente nicht in die gleiche Richtung zeigen. Der Grund liegt darin, dass die Strömung hinter dem Hochdruckrotor nicht über die gesamte Kanalhöhe in dieselbe Richtung abströmt.

Zudem kann erkannt werden, dass um den Sensor ein dünnwandiges Rohr verbaut ist. Dieses sogenannte Kielhole dient dazu, dass eine größere Fehlanströmung zugelassen werden kann. Somit kann lt. Abb. 5 (Form 5) trotz einer Fehlanströmung von  $\alpha \sim \pm 35^\circ$  ein verwertbares Messergebnis gemessen werden.

## 2.2 Thermographie-Kamera:

In Kapitel: „2.1.2 Totaltemperaturmessung“ wird bereits auf das Teilgebiet der berührenden Temperaturmessung eingegangen. Im nachfolgenden Abschnitt handelt es sich um das zweite Teilgebiet, nämlich der berührungslosen Temperaturmessung. Bei dieser wird im Allgemeinen die Wärmestrahlung eines Körpers ausgenutzt und über einen Sensor aufgenommen. Um dies zu verstehen, müssen zuerst die Grundlagen der Strahlung erläutert werden.

### 2.2.1 Grundlagen zur Strahlung:

Strahlung wird von jedem Körper emittiert (abgegeben), solange seine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ist. Also steht ein Körper mit seiner Umgebung in ständiger Wechselwirkung. Der somit stattfindende Transport von Energie und Impuls erfolgt über elektromagnetische Wellen.

Abb. 15 zeigt die verschiedenen Wellenlängenbereiche und ihre Einteilung. Sichtbares Licht ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm – 780 nm (CIE Definition, Commission Internationale de l'Éclairage /Internationale Kommission für Beleuchtung bzw. 400 nm – 700 nm (IEC Definition Internationale Elektrotechnische Kommission).

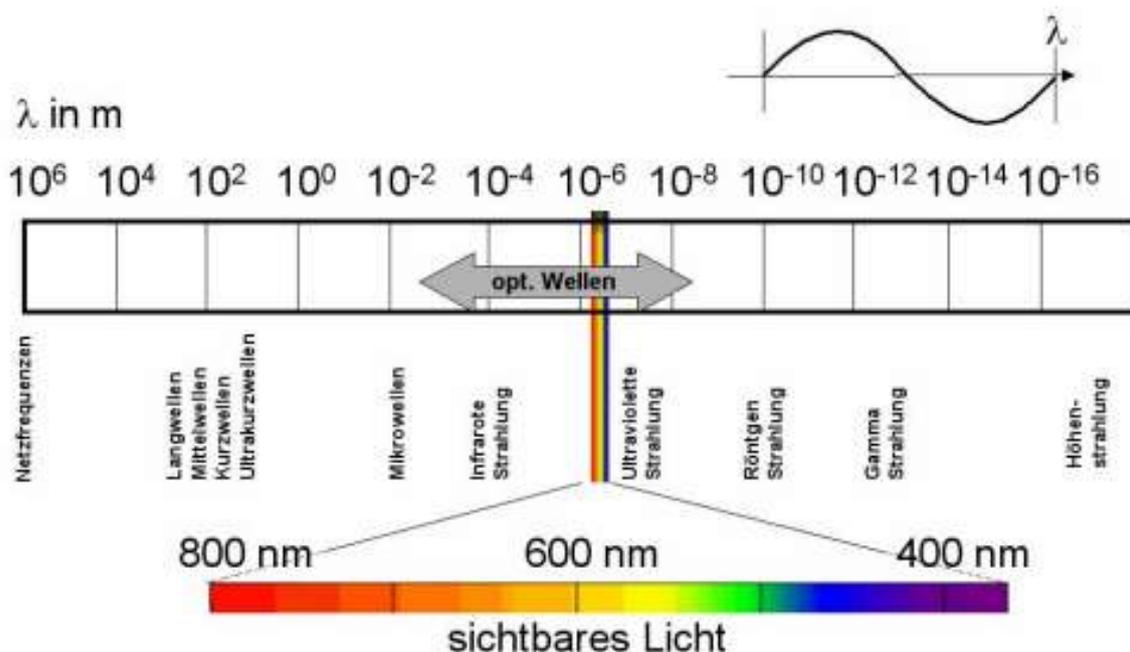


Abb. 15: Strahlenspektrum nach [12]

Das menschliche Auge kann lt. [9] das Spektrum zwischen 380 (violett/blau) und 780 nm (rot) erfassen. Die darüber liegende Infrarotstrahlung wird zur Messung der Temperatur eines Objektes anhand einer Wärmebildkamera verwendet, da der Großteil der Wärmestrahlung in diesem Bereich emittiert. Der Bereich der IR-Strahlung liegt bei  $\sim 0,8$  bis  $30 \mu\text{m}$ . Nahes Infrarot NIR von  $0,78$  bis  $1,4 \mu\text{m}$  (IR-A), bzw.  $1,4$  bis  $3 \mu\text{m}$  (IR-B), Mittleres Infrarot MIR von  $3$  bis  $50 \mu\text{m}$  (IR-C) und Fernes Infrarot (FIR) von  $50$  bis  $1000 \mu\text{m}$ . Das FIR ist messtechnisch nicht mehr relevant.

Die auf einen Körper auftreffende Strahlung kann entweder reflektieren, absorbieren (aufgenommen werden) oder transmittieren (durchgehen). Die einfallende Strahlung ( $E$ ) kann somit auf die o.g. Teile zerlegt werden:

Strahlungsbilanz [9]: 
$$E = E_A + E_R + E_T \quad (10)$$

Um die Strahlung auf diese drei Bereiche aufzuteilen, wird von Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsgrad gesprochen. Diese drei Begriffe werden durch die Formeln (11), (12) und (13) definiert und beschrieben.

Absorptionsgrad [9]: 
$$\alpha = \frac{E_A}{E} = \varepsilon * A * E \quad (11)$$

Transmissionsgrad [9]: 
$$\tau = \frac{E_T}{E} \quad (12)$$

Reflexionsgrad [9]: 
$$\rho = \frac{E_R}{E} \quad (13)$$

Durch Umwandeln der Formel (10) und anschließendem Einfügen von (11), (12) und (13) kann die Bilanz ausgedrückt werden als:

Strahlungsbilanz [9]: 
$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (14)$$

Abhängig von den Strahlungseigenschaften der Körper wird unterschieden zwischen:

- schwarzen Körpern
- grauen Körpern
- realen Körpern

Als idealer Strahler wird der „schwarze Körper“ angesehen, welcher die gesamte auf ihn auftreffende Strahlung absorbiert. Gemäß dem Kirchhoff'schen Strahlungsgesetz emittiert er

auch die gesamte absorbierte Strahlung wieder, wobei Emission und Absorption aber nicht wellenlängenabhängig sind ( $\varepsilon(T) \neq f(\lambda)$ ):

Kirchhoff'sches Gesetz  
schwarzer Körper:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) = 1 \quad (15)$$

Das Plancksche Strahlungsgesetz (welches nur für den „schwarzen Körper“ gilt) beschreibt zusätzlich das Strahlenspektrum, welches emittiert wird:

Plancksches  
Strahlungsgesetz:

$$e_{s\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 * \left( e^{\frac{C_2}{\lambda * T}} - 1 \right)} \quad (16)$$

Da in der Realität keine „schwarzen Körper“ vorhanden sind, wird der „graue Körper“ definiert. Lt. [9] ist ein „grauer Körper“ „ein nicht-schwarzer Körper, dessen spektrales Emissionsverhältnis unabhängig von der Wellenlänge  $\lambda$  ist, d.h.  $\varepsilon_\lambda(T) \neq f(\lambda)$  und  $\varepsilon_\lambda(T) = \varepsilon(T)$  (Spektrales Emissionsverhältnis = Gesamt-Emissionsverhältnis)“.

grauer Körper:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) < 1 \quad (17)$$

Das Emissionsverhalten des realen Körpers ist jedoch sehr wohl wellenlängenabhängig ( $\varepsilon = f(\lambda)$ ), wobei aber gilt dass die Emission bei einer beliebigen Temperatur gleich der Absorption entspricht.

realer Körper:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) < 1 \quad (18)$$

Abb. 16, links, zeigt die spezifische Emission eines realen ( $\varepsilon < 1$ ), grauen ( $\varepsilon < 1$ ) und schwarzen Körpers ( $\varepsilon = 1$ ) über den Wellenlängenbereich. Rechts ist der Emissionsgrad der drei verschiedenen Strahler über die Wellenlänge abgebildet.

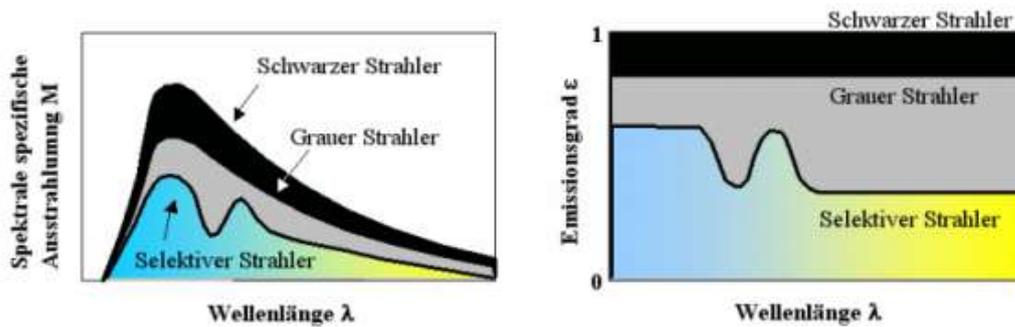


Abb. 16: Spezifische Ausstrahlung (links) und Emissionsgrad (rechts) in Abhängigkeit der Wellenlänge eines schwarzen, grauen und realen Körpers nach [12]

Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich die Lage des Strahlungsmaximums  $\lambda_{max}$  zu kleineren Wellenlängen (WIEN'sches Verschiebungsgesetz; Abb. 17). Dazu kommt, dass die Temperatur mit der vierten Potenz in die emittierte Gesamtstrahlung eingeht (Stefan Boltzmann Gesetz), also die Strahlung mit der Temperatur stark zunimmt. [11]

Stefan Boltzmann Gesetz: 
$$e(T) = C_S * \varepsilon(T) * \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (19)$$

$C_S$  ist dabei die Stefan-Boltzmann Konstante ( $C_S = 5,67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ ). Zu beachten ist, dass die Temperatur in Kelvin einzusetzen ist.

Abb. 17 zeigt die spektrale Leistung über die Wellenlänge in Abhängigkeit der Temperatur. Es ist zu sehen, dass das Strahlungsmaximum zu geringeren Wellenlängen wandert, je höher die Temperatur ist.

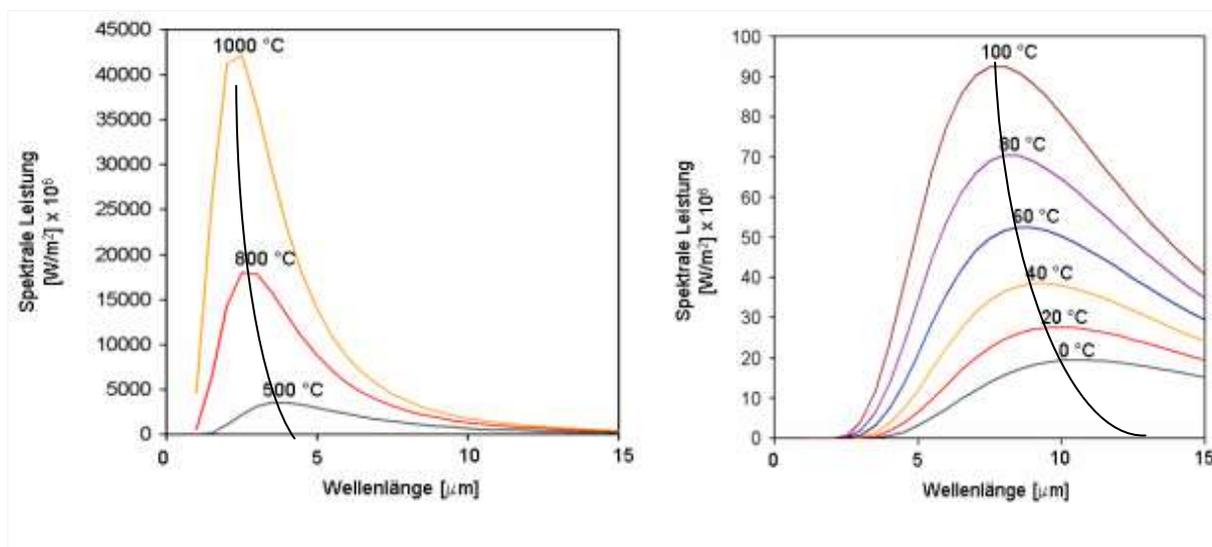


Abb. 17: Spektrale Leistung über die Wellenlänge in Abhängigkeit der Temperatur nach [12]

Allgemein kann gesagt werden, dass die Emission, also auch die Absorption, eines realen Körpers von verschiedenen Punkten abhängt [10]:

- Wellenlänge  $\lambda$
- Temperatur (von der Umgebung und des Körpers)
- Oberflächenbeschaffenheit
- Beobachtungswinkel  $\delta$

Entscheidend für die Emission eines Körpers ist aber dessen Werkstoff. Zum Beispiel haben blanke Metalle einen hohen Reflexionsgrad und einen geringen Emissionsgrad. Dies kann getestet werden, indem die Hand auf eine metallische Oberfläche aufgelegt wird. Wenn die Hand entfernt wird, ist trotzdem noch eine Reflexion an der metallischen Oberfläche mit Hilfe einer Wärmebildkamera zu erkennen. Abhilfe schafft zum Beispiel das Lackieren solcher Oberflächen mit schwarz mattem Lack. Somit kann der Emissionsgrad je nach Literatur auf 95 bis 98 % gesteigert werden. Durch dies sinkt nach Formel (14) der Reflexionsgrad. Die Reflexion der Hand ist auch mit der Wärmebildkamera nicht mehr erkennbar.

Hohe Emissionsgrade erreichen auch nicht-metallische Stoffe wie Holz oder Beton. Ein bereits oxidiertes, nicht lackiertes Metall hat auch schon einen wesentlich höheren Emissionsgrad als ein metallisch glänzender Werkstoff. In der nachfolgenden Tabelle sind ein paar Werkstoffe mit den dazugehörigen Emissionsgraden aufgelistet. Die Werte stammen von der Fa. „Messfeld“, von welcher auch die Thermographiekamera des Instituts bezogen wurde. [10]

**Tab. 4: Auszug: Emissionsgrad verschiedener Werkstoffe [10]**

Material	Temperatur [°C]	Spektrum [ $\mu\text{m}$ ]	Emissionsgrad
Al, Blech, untersch. zerkratzt	70	2 – 14	0,03 – 0,08
Al, Guss, sandgestrahlt	70	2 – 14	0,46 – 0,47
Al, poliert	50 – 100	Gesamtspektrum	0,04 – 0,06
Al, stark oxidiert	50 – 500	Gesamtspektrum	0,2 – 0,3
Beton	20	Gesamtspektrum	0,92
Eisen/Stahl, hochglanzpoliert	40 – 250	Gesamtspektrum	0,28
Eisen/Stahl, oxidiert	100	Gesamtspektrum	0,74
Kunststoff, PVC Boden, stumpf, strukturiert	70	2 – 14	0,93 – 0,94
Haut, Mensch	32	Gesamtspektrum	0,98
Holz	17	2 – 5	0,98
Lack, schwarz, matt	100	Gesamtspektrum	0,97

### 2.2.2 Aufbau und Funktionsweise einer Thermographiekamera:

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Infrarot (IR) – Messung um ein berührungsfreies Verfahren. Zudem handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren. Die Wärmestrahlung eines Körpers wird dabei über einen infrarotempfindlichen Sensor ausgelesen. Das verwenden solcher Systeme bringt einige Vor- und Nachteile mit sich.

#### Vorteile [10] :

- Temperaturmessung ist schnell (Messung im Millisekundenbereich)
- Gesamte Oberfläche kann betrachtet werden
- Gefährliche oder nur schwer zugängliche Orte können beobachtet werden
- Temperaturen bewegter Körper können erfasst werden
- Temperaturen von -40 bis +2000 °C können gemessen werden [12]
- Dem Messobjekt wird keine Energie entzogen (Recovery-Faktor wie bei Totaltemperaturmessung überflüssig)
- Die Oberfläche muss nicht beeinträchtigt werden (Befestigung eines Temperaturrekes)

#### Nachteile [10] :

- Oft aus Platzgründen nicht möglich (geschlossene Maschinen)
- Objektiv ist staub- und feuchtigkeitsempfindlich
- In der Regel nur Oberflächen messbar
- Zu vermessender Körper muss optisch sichtbar sein
- Emissionsgrad des Werkstoffes muss bekannt sein, um eine qualitative Aussage über die Temperaturverteilung an einer Oberfläche darzustellen
- Kosten: IR-Kamera ist teuer im Vergleich zu Temperaturmessung mittels Thermoelement oder Pt100

#### Aufbau Thermographiekamera:

Die IR-Messtechnik nutzt die temperaturabhängige Verschiebung der maximalen Strahlungsleistung zu geringeren Wellenlängen. Der Bereich, in dem die Wärmestrahlung gemessen werden kann, ist von der Grenze des sichtbaren Lichts ( $\sim 1000 \text{ nm}$ ) bis ca.  $14 \mu\text{m}$ . Dies ist in Abb. 17 ablesbar. Die Strahlungsmessung kann in zwei Unterbänder unterteilt werden. Unterschieden wird zwischen dem Kurzwellenband (KWB,  $\lambda \approx 2 - 5 \mu\text{m}$ ), welches bei hohen Temperaturen verwendet wird, und dem Langwellenband (LWB,  $\lambda \approx 8 - 14 \mu\text{m}$ ), mit dem niedrige Temperaturen detektiert werden. Im KWB kann eine mögliche

Sonnenreflexion an der Oberfläche des zu vermessenden Objekts, welche sich im Bereich von  $\lambda = 2 \mu\text{m}$  bemerkbar macht, durch entsprechende Filter ausgeschieden werden. [11]

Zusammengefasst besteht eine IR-Kamera aus einer Optik, Filtern, einem Detektor und dem elektronischen Teil (Verstärker, Filter, Wandler, Übertragung, Auswertung). Abb. 18 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Thermographie-Kamera, wobei die Elektronik nicht dargestellt wird.

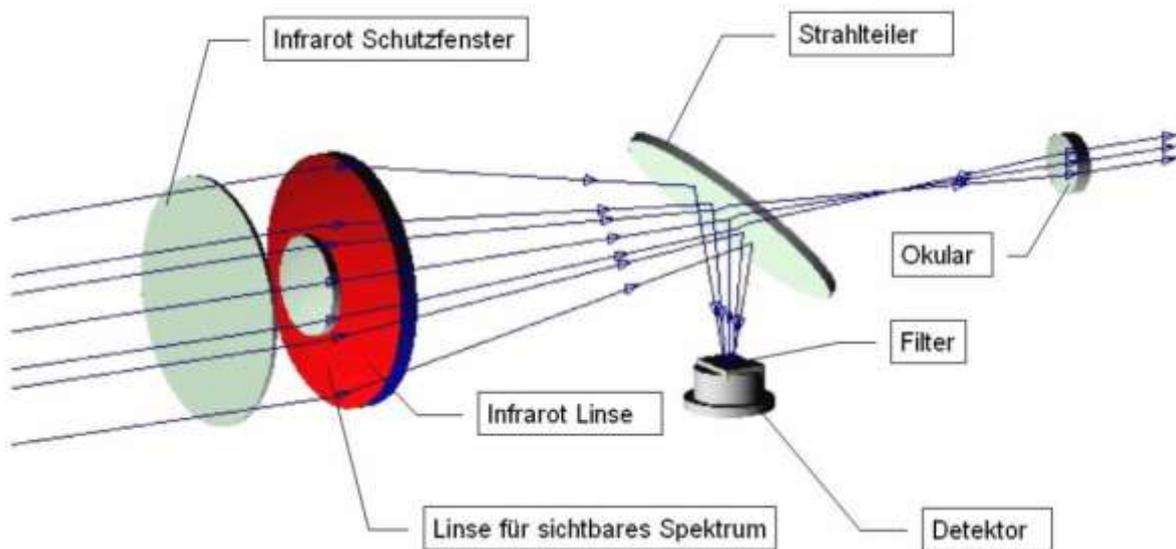


Abb. 18: schematische Darstellung von Optik und Detektor [10]

### Optik:

Gleich wie bei optischen Systemen im sichtbaren Bereich, wird auch bei der IR-Messung von einem Körper eine kleinere Reflexion auf einen Detektor übertragen. Dies kann aber nur durch Zuhilfenahme von Linsen, Filtern und Blenden erfolgen. Objektive nehmen die vom Körper emittierte Strahlung auf. Mittels Linsen wird diese Strahlung entsprechend umgelenkt, wobei der unbrauchbare Teil der Strahlung (Bsp.: Reflexion der Sonne) durch Blenden und Filter abgeschieden wird. Durch Verschieben der Linsen kann die Auflösung des Bildes verändert werden.

Der Unterschied zur Aufnahme im sichtbaren Bereich liegt darin, dass ein anderer Wellenlängenbereich aufgenommen wird. Da Glas im Infrarot eine niedrigere Transmission (Durchlässigkeit) aufweist als im sichtbaren Bereich müssen für Linsen und Filter andere Werkstoffe verwendet werden (Bsp.: Germanium lt. [12]). Germanium besitzt im IR eine höhere Transmission als Glas. Außerdem ist die Strahlungsdurchlässigkeit der Werkstoffe temperaturabhängig. Die Transmission der Optik muss somit intern ausgeglichen werden.

Zudem sind Objektive staub-, feuchte- und temperaturempfindlich. Die vorgeschriebenen Umgebungsbedingungen des Herstellers sind unbedingt einzuhalten.

### **Detektoren:**

Durch Detektoren wird das eingehende Strahlungssignal aufgenommen und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dabei muss grundsätzlich zwischen zwei Arten von Detektoren bei Thermographie-Kameras unterschieden werden:

- gekühlte Detektoren
- ungekühlte Detektoren

Um niedrige Temperaturen genau messen zu können wird die IR-Eigenstrahlung des Detektors gering gehalten. Dazu wird der Detektor abgekühlt. Besagtes kann unter anderem durch Stirling-Kühler (Arbeitsmedium beispielsweise Helium) erreicht werden. Der Detektor wird hier durch einen Kälteprozess auf  $-200^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. [12] Natürlich ist dieser Aufwand mit Kosten verbunden und im Falle der Mischkammertemperaturmessung nicht nötig.

Bei der Messung am Prüfstand mittels FLIR SC620 wird ein Mikrobolometer verwendet. Es gehört zur Gruppe der thermischen Detektoren. Die Zellen (welche in Abb. 19 zu sehen sind) bestehen aus sehr dünnen Scheiben ( $\mu\text{m}$ -Bereich), welche über dem Detektor gehalten werden (Microbridges). Die Microbridges absorbieren die auftreffende Strahlung. Aus diesem Grund wird die Eigentemperatur der Scheiben verändert, was eine Widerstandsänderung zur Folge hat. Die demzufolge stattfindende Spannungsänderung kann als Messsignal ausgegeben werden. Der Vorteil von Mikrobolometern liegt darin, dass sie bei Atmosphärentemperatur nicht gekühlt werden müssen und trotzdem mit ausreichender Genauigkeit arbeiten. [10]

Detektoren sind Alterungsprozessen unterworfen. Deshalb müssen sie regelmäßig kalibriert werden. Eine Kalibrierung wird i.d.R. vom Hersteller durchgeführt. Das Prinzip wird trotzdem am Ende dieses Kapitels erläutert.

Abb. 19 zeigt den Aufbau eines Mikrobolometers.

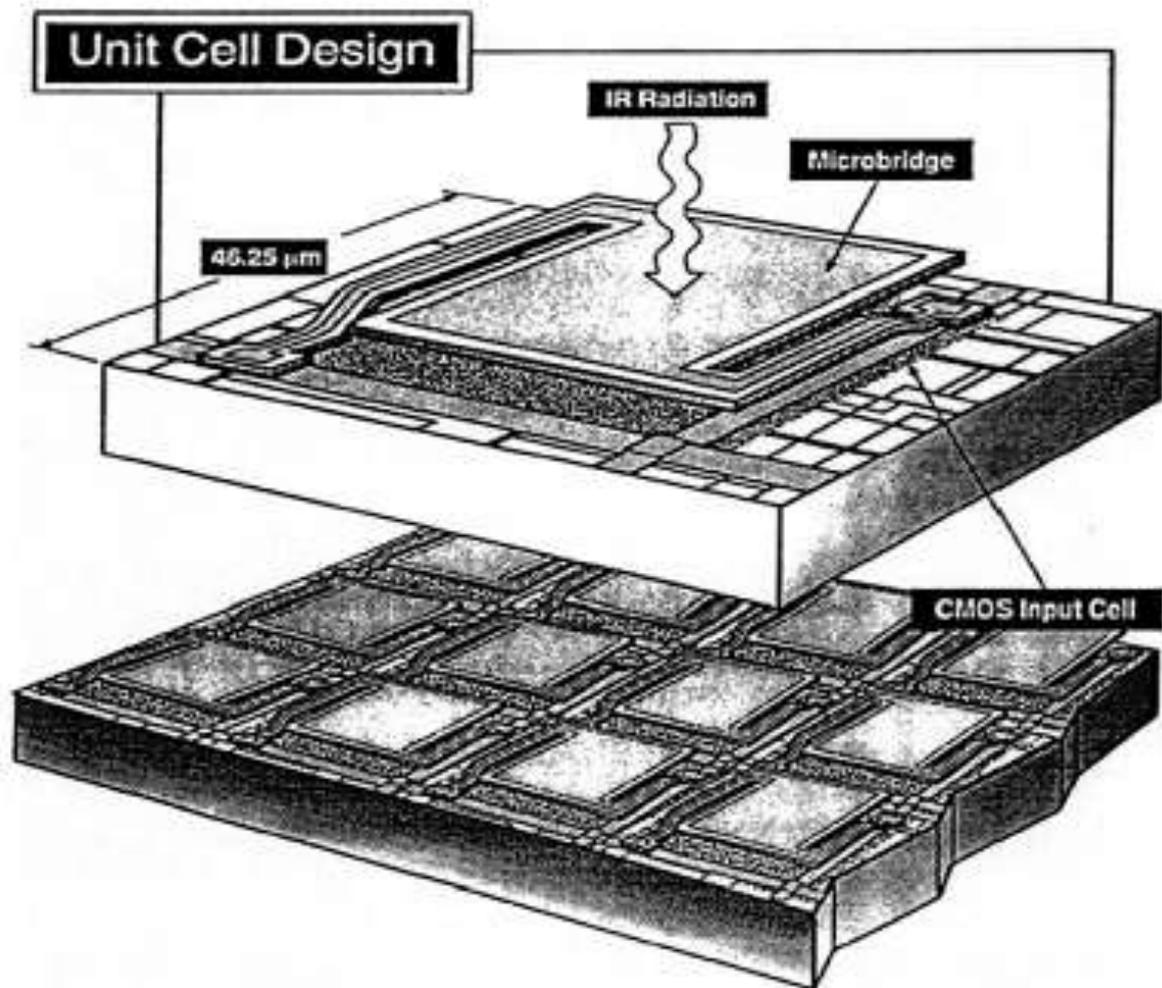


Abb. 19: Schema - Mikrobolometer [11]

### Elektronik:

Das vom Detektor ausgegebene Spannungssignal wird durch einen Leistungsverstärker verstärkt und anschließend gefiltert. Danach wird es über ein Übertragungskabel an einen Computer übertragen, wo die Messwerte ausgewertet werden. Anschließend können die Messdaten gegebenenfalls nachkorrigiert und verwertet werden.

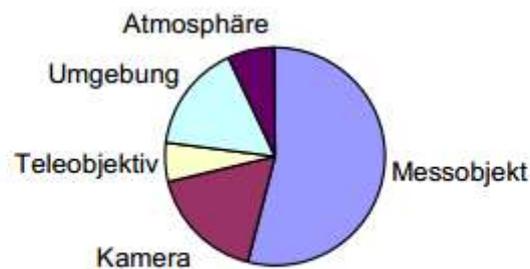
### Fehler beim Messen mit IR-Kameras:

Es können verschiedenste Fehler bei der Messung mit Wärmebildkameras auftreten. Die wichtigsten davon sind:

- Kamera nicht so senkrecht wie möglich auf die zu vermessende Oberfläche ausgerichtet
- großer Abstand zwischen Objekt und Kamera: In der Atmosphäre sind Staubpartikel und andere Verunreinigungen, welche Strahlung absorbieren und somit das Messergebnis verfälschen.

- falscher oder nicht bekannter Emissionsgrad zur Messung verwendet
- Umgebungstemperatur schwankt stark: Temperatur geht mit der 4. Potenz in die Strahlungsleistung ein (Boltzmann-Gesetz)
- Oberfläche reflektiert Umgebung (v.a. bei metallisch glänzenden Oberflächen) oder Transmission des Objekts
- Transmission des Linsenmaterials des Objektivs
- Ruß oder Rauch zwischen Kamera und Messobjekt

In Abb. 20 sind die „Anteile, der vom Detektor empfangenen IR-Strahlung bei einer Objekttemperatur von 30°C, einem Emissionsgrad des Objektes von 0,7, einer Umgebungstemperatur (auch Kamera, Teleobjektiv und Atmosphäre) von 20°C“ [12] zu sehen.



**Abb. 20: Anteile, der vom Detektor empfangenen IR-Strahlung bei einer Objekttemperatur von 30 °C, einem Emissionsgrad des Objekts von 0,7, einer Umgebungstemperatur(auch Kamera, Teleobjektiv und Atmosphäre) von 20 °C. [12]**

Die meisten der o.g. Fehler werden von modernen IR-Kameras intern behoben. Hierzu zählen vor allem Transmission des Objektivs, Atmosphärenreflexion und –transmission, Umgebungstemperatur.

### **Ermittlung eines unbekanntem Emissionsgrades von Objekten:**

Es gibt verschiedenste Arten einen unbekanntem Emissionsgrad zu ermitteln. Für viele Werkstoffe gibt es Tabellen, in denen deren  $\epsilon$  aufgelistet ist. Wenn dies nicht hilfreich ist, muss der Emissionsgrad selbst bestimmt werden. Nachfolgend werden ein paar verschiedene Wege zur Ermittlung beschrieben. [10]

- Messung der Temperatur mittels Kontaktthermometer und IR-Kamera zur selben Zeit. Bei einem Unterschied kann der  $\epsilon$  der IR-Kamera solange verändert werden, bis die Temperaturen übereinstimmen.

- Bei niedrigen Temperaturen können Kunststoffaufkleber mit bekanntem  $\epsilon$  auf das Messobjekt aufgebracht werden. Anschließend kann die Temperatur des Kunststoffaufklebers gemessen werden. Danach kann der Emissionsgrad soweit umgestellt werden, bis die Temperatur des Objekts dieselbe ist, wie die zuvor gemessene.
- Erzeugen eines Hohlraumstrahlers, welcher dieselbe Temperatur und denselben Werkstoff wie das Objekt besitzt. Für den Hohlraumstrahler, welcher lt. [10] eine Tiefe der Bohrung von mind.  $5d$  besitzen muss kann der Emissionsgrad 1 gesetzt werden. Anschließendes Messen der Temperatur des Objektes und erneutes Ändern des Emissionsgrades auf die zuvor gemessene Temperatur bringt die Lösung.
- Oberfläche mit schwarz matter Farbe (zum Beispiel Auspufflack: bis zu etwa  $500\text{ °C}$  temperaturbeständig) lackieren. Emissionsgrad für diesen Lack ist  $\epsilon \approx 0,95 \dots 0,98$ .

### Kalibrierung einer IR-Kamera:

Um Thermographie-Kameras zu kalibrieren, wird ein „schwarzer Körper“ angenähert. Dies geschieht in der Regel durch Hohlraumstrahler die einen schwarzen Strahler ( $\epsilon = 1$ ) bzw. einen grauen Strahler ( $\epsilon < 1$ ) darstellen. Solche Strahler müssen temperaturstabilisiert werden, wobei dies mit einem sehr großen Aufwand verbunden ist. Die Kontrolle der sich dabei einstellenden Temperatur kann beispielsweise über Thermoelemente oder Pt100-Fühler erfolgen. Wärmerohröfen umfassen lt. [12] einen Temperaturbereich von  $-10$  bis  $1000\text{ °C}$ . Um einen „schwarzen Strahler“ zu realisieren, muss aber der Innenraum um ein Vielfaches größer sein, als die zur Kalibrierung notwendige Öffnung. Es werden entweder Hohlkugeln oder Hohlzylinder verwendet. Zudem werden die Innenräume angeraut und schwarz ausgemalt.

Abb. 21 zeigt schematisch einen zur Kalibrierung verwendeten Hohlraumstrahler. Abb. 22 zeigt zwei Schwarzstrahler der Firma „mawi-therm GmbH“, welche zur Kalibrierung von Thermographie-Kameras dient.

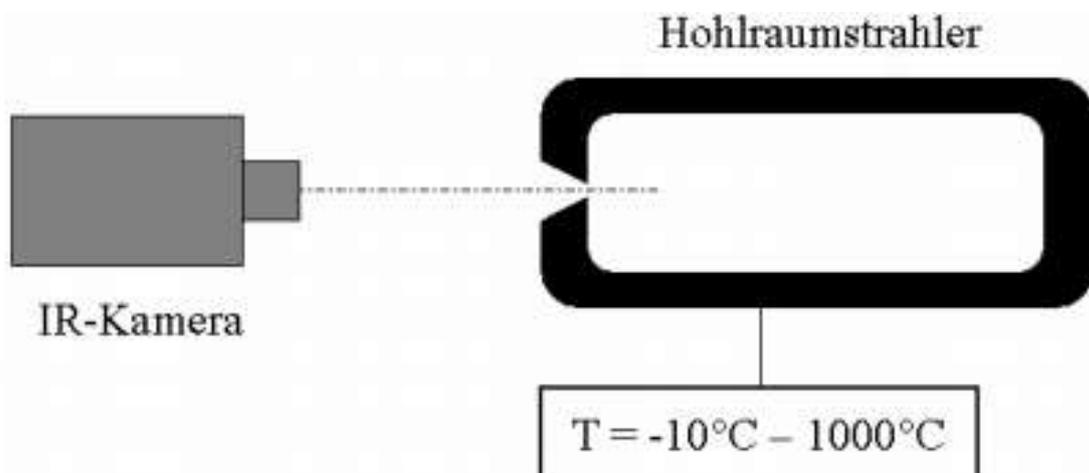


Abb. 21: Hohlraumstrahler zur Kalibrierung einer Thermographie-Kamera nach [12]



Abb. 22: Hohlraumstrahler der Firma mawi-therm zur Kalibrierung von Infrarotkameras nach [13]

### Daten der verwendeten Thermographie-Kamera:

Die IR-Kamera vom Hersteller FLIR der Type SC620 weist folgende Merkmale auf:

- Temperaturbereich: -40 bis +1500 °C (limitierte Temperaturbereiche einstellbar: -40 bis 120 °C; 0 bis 500 °C; 300 bis 1500 °C; zur Messung wird **0 bis 500 °C** eingestellt)
- aufgenommener Wellenlängenbereich: LWB (7,5 bis 13 μm)
- Sensor: Ungekühlter Mikrobolometer
- automatische Atmosphärenkorrektur und Emissionsgrad einstellbar ( $\epsilon = 0,98$  eingestellt, da Mischkammer mit Auspufflack lackiert wird)
- Genauigkeit:  $\pm 2 \%$  vom Messwert oder 2 °C für gesamten Temperaturbereich  
 $\pm 1 \%$  vom Messwert oder 1 °C für limitierten Temperaturbereich  
 (limitierter Temperaturbereich verwendet)
- Auflösung: 640x480 Pixel

## 2.3 Korrektur der Betriebspunktschwankung

Aufgrund des Einflusses der Betriebspunktschwankungen auf die Messung werden die erhaltenen Messergebnisse der 360°-Umfangsmessungen von Totaltemperatur und Totaldruck im Anschluss korrigiert. Somit können die Messungen untereinander vergleichbar gemacht werden. Diese Korrektur wird mithilfe des Mischkammerdruckes durchgeführt und muss sowohl für den Eintritt in die HDT als auch für den Austritt aus der NDT durchgeführt werden.

### Korrektur des Totaldrucks:

korrigierter  
Totaldruck:

$$p_{tA_{corr}} = \frac{p_{tA}}{p_{OMK_{derzeit}}} * \text{Mittelwert}(p_{OMK_i}) \quad (20)$$

Formel (20) zeigt den korrigierten Totaldruck in der Eintrittsebene. Dies geschieht indem der gemessene Totaldruck an einer Stelle durch den dementsprechenden Mischkammerdruck dividiert wird, um dieses Ergebnis anschließend mit dem über die Messung gemittelten Mischkammerdruck zu multiplizieren.

In der Austrittsebene ändert sich das Prinzip der Korrektur nicht. Entsprechende Formel zeigt (21).

korrigierter  
Totaldruck:

$$p_{tF_{corr}} = \frac{p_{tF}}{p_{OMK_{derzeit}}} * \text{Mittelwert}(p_{OMK_i}) \quad (21)$$

### Korrektur der Totaltemperatur:

korrigierte  
Totaltemperatur:

$$T_{tA_{corr}} = \frac{T_{tA}}{T_{OMK_{derzeit}}} * \text{Mittelwert}(T_{OMK_i}) \quad (22)$$

Die Korrektur der Totaltemperatur am Eintritt der HDT wird über die mittlere Mischkammertemperatur durchgeführt. Dies ist in Formel (22) zu erkennen. Auch der Ausgleich der Betriebspunktschwankungen der Austrittsebene wird gleich realisiert:

korrigierte  
Totaltemperatur:

$$T_{tF_{corr}} = \frac{T_{tF}}{T_{OMK_{derzeit}}} * \text{Mittelwert}(T_{OMK_i}) \quad (23)$$

### Beispiel der Auswirkung der Korrektur auf das Ergebnis:

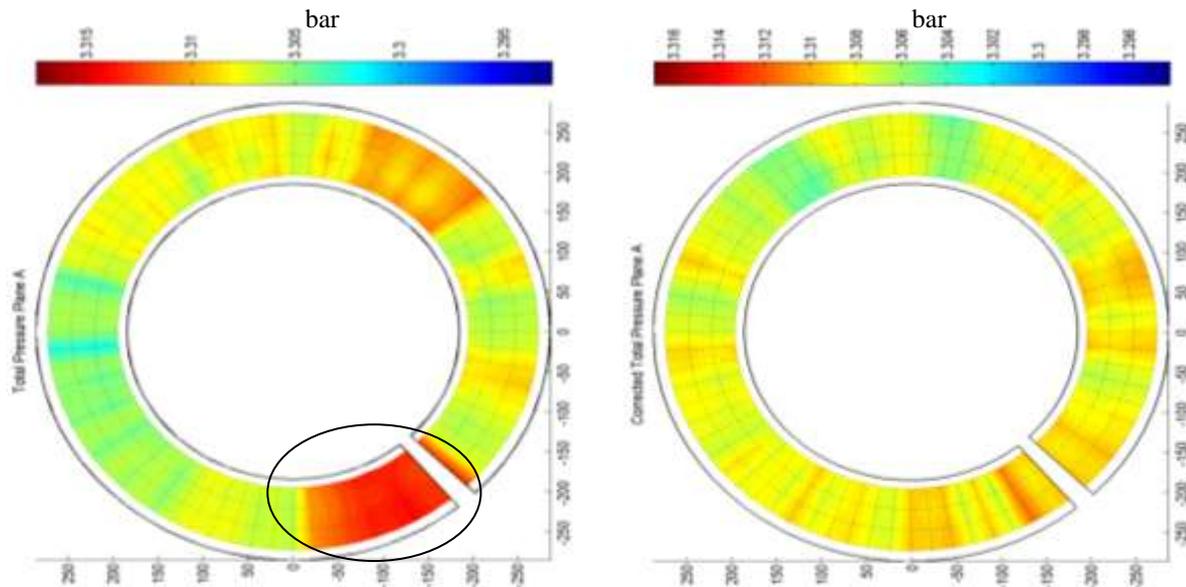


Abb. 23: Beispiel der Auswirkung der Korrektur

Bei der in Abb. 23 gezeigten Umfangsmessung des Totaldruckes in der Eintrittsebene ist die Auswirkung der Korrektur zu erkennen.

Die letzten 40 Grad dieser Messung werden aufgrund eines Fehlers eine halbe Stunde später gemessen (Abbildung oben links, mit Ellipse markiert). Im Bereich der zeitlich gesehenen späteren Teilmessung, können höhere Totaldrücke evaluiert werden.

Dieser Bereich höheren Drucks am Ende der Messung kann aber durch die Korrektur vergleichmäßigt werden. Der Einfluss der Korrektur wird in obiger Abbildung rechts deutlich.



traversiert. Wenn beide Sondenbäume in der gewünschten Position stehen werden die Messwerte erfasst. Der Totaltemperaturbaum in Ebene A ist um  $45^\circ$  in Umfangsrichtung von der vertikalen Achse versetzt, wobei der Totaldruckbaum  $135^\circ$  verschoben ist. Bei Ebene F sind dies  $255^\circ$  für den Totaltemperaturrake und  $165^\circ$  beim Totaldruckrake.



Abb. 25: Positionen der Rakes; korrigierte Temperaturen und Drücke

Die Messung der Mischkammeroberflächentemperatur anhand einer IR-Kamera wird über die gesamte Messzeit durchgeführt. Die Position der Thermographie-Kamera wird dabei variiert, um einen möglichst großen Bereich der oberen Hälfte der Mischkammeroberfläche einsehen zu können. Abb. 26 zeigt die verschiedenen Positionen der IR-Kamera in der Halle.

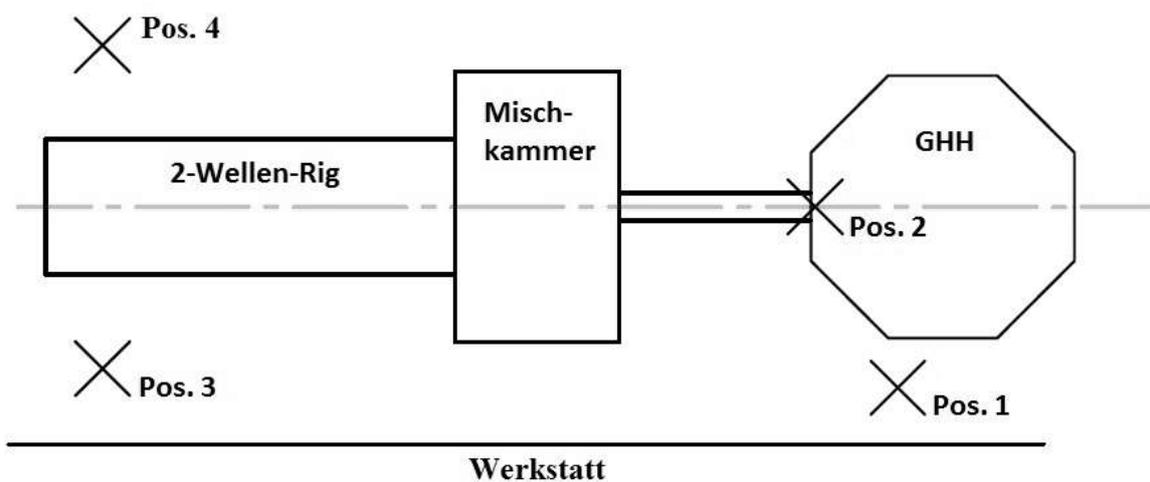
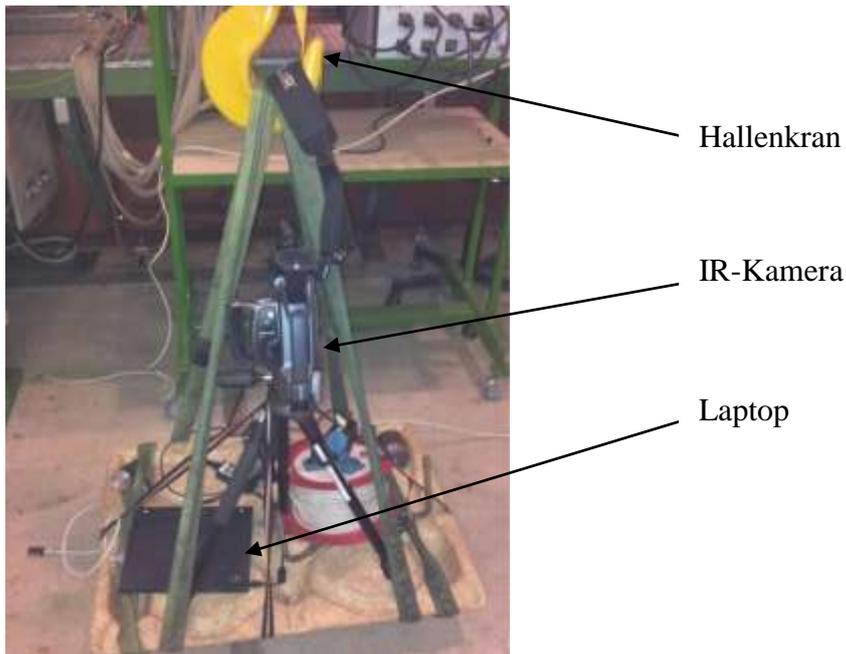


Abb. 26: Skizze der Kamerapositionen

Abb. 27 zeigt die Halterung der Thermographie-Kamera, welche mit einem Hallenkran an die jeweilige Position gefahren wird.



**Abb. 27: Halterung der Thermographiekamera am Hallenkran montiert**

In Tab. 5 sind die Betriebsbedingungen aufgelistet, bei welchen die Messungen durchgeführt werden, aufgelistet.

**Tab. 5: Betriebspunkte, welche zur Messung eingestellt werden**

		ADP Aerodesignpoint	OFF1 Offdesign1	OFF2 Offdesign2
		D1	D1	D1
Massenstrom	kg/s	15,85	10,7	13,65
HDT				
Drehzahl	rpm	11070	8680	10090
Druckdifferenz	-	2,95	2,23	2,63
Leistung	kW	1520	727	1105
NDT				
Drehzahl	rpm	-3550	-3550	-3550
Druckdifferenz	-	1,27	1,15	1,21
Leistung	kW	300	97	189
Mischkammerdruck				
Mischkammerdruck	bar	3,98	2,6	3,32
Mischkammertemperatur				
Mischkammertemperatur	K	433	424,5	420,5
$\Pi_{mc-ex}$				
$\Pi_{mc-ex}$	-	4,02	2,63	3,33
Drehmoment HD				
Drehmoment HD	Nm	1325	795	1050
Drehmoment ND				
Drehmoment ND	Nm	800	261	508

## 4 Messungen und Ergebnisdiskussion:

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Messungen erläutert. Hierfür werden Totaltemperatur und -druck im Aerodesign-Punkt (ADP), sowie in zwei Offdesign-Punkten (OFF 1 und 2) gemessen. Zuerst werden die nicht korrigierten Messdaten erläutert. Um diese jedoch untereinander vergleichbar zu machen, werden diese im Anschluss korrigiert.

Gemessen wird in der Ebene A und F in  $5^\circ$ -Schritten um den gesamten Umfang des Strömungskanals (von  $0$  bis  $355^\circ$ ). Dabei werden Die Rakes in der Ebene A bei jedem Schritt um  $+5^\circ$  und Ebene F um  $-5^\circ$  bewegt. Über die Höhe verteilt befinden sich in Ebene A vier Totaltemperaturmessstellen und vier Totaldruckmessstellen. In Ebene F besitzt der Totaltemperaturrake sieben Messpositionen und der Totaldruckbaum sieben Druckmesssonden. Das Thermoelement auf der Außenseite des Strömungskanals in Ebene A ist defekt (tip, Außenwand). Zwischen der Versuchsfahrt von Offdesign 1 und Offdesign 2 wurde auch das Thermoelement auf der Innenseite der Ebene A beschädigt (hub, Innenwand). Um eine Aussage über die Symmetrie zu ermöglichen, sind aber die beiden anderen Thermoelemente, welche sich dazwischen befinden, ausreichend. Zudem ist die Temperaturmessstelle auf der Innenseite des Strömungskanals in Ebene F defekt, wobei die anderen Messstellen für die Messung auch hier ausreichend sind. Defekte Thermoelemente werden für zukünftige Projekte ausgetauscht.

Die Messergebnisse von OFF 2 und ADP sind einander ähnlich. Deswegen wird nur auf das Ergebnis der Messung im Aerodesign-Punkt detailliert eingegangen. Die Ergebnisse der OFF 2 können im Anhang eingesehen werden. Die Ergebnisse der Messung im OFF1 weichen von denen im ADP ab. Vor allem die Totaltemperaturmessung in Ebene A zeigt signifikante Abweichungen. Im Abschnitt der OFF 1-Messung wird also auf speziell diese Unterschiede eingegangen.

Im Anschluss wird die Oberflächentemperatur der Mischkammer, welche mit einer IR-Kamera gemessen wird, diskutiert.

Am Ende dieses Kapitels wird zusätzlich auf den Einfluss der Umgebungstemperatur- und Umgebungsdruckschwankungen auf die Messergebnisse eingegangen.

## 4.1 Aero Design Point:

Der Aerodesign Punkt bezeichnet den Auslegungspunkt des Zwei-Wellen-Rigs. Die dafür einzustellenden Werte sind in Kapitel 3 Tab. 5 angeführt.

### 4.1.1 360-Grad-Messung in der Eintrittsebene:

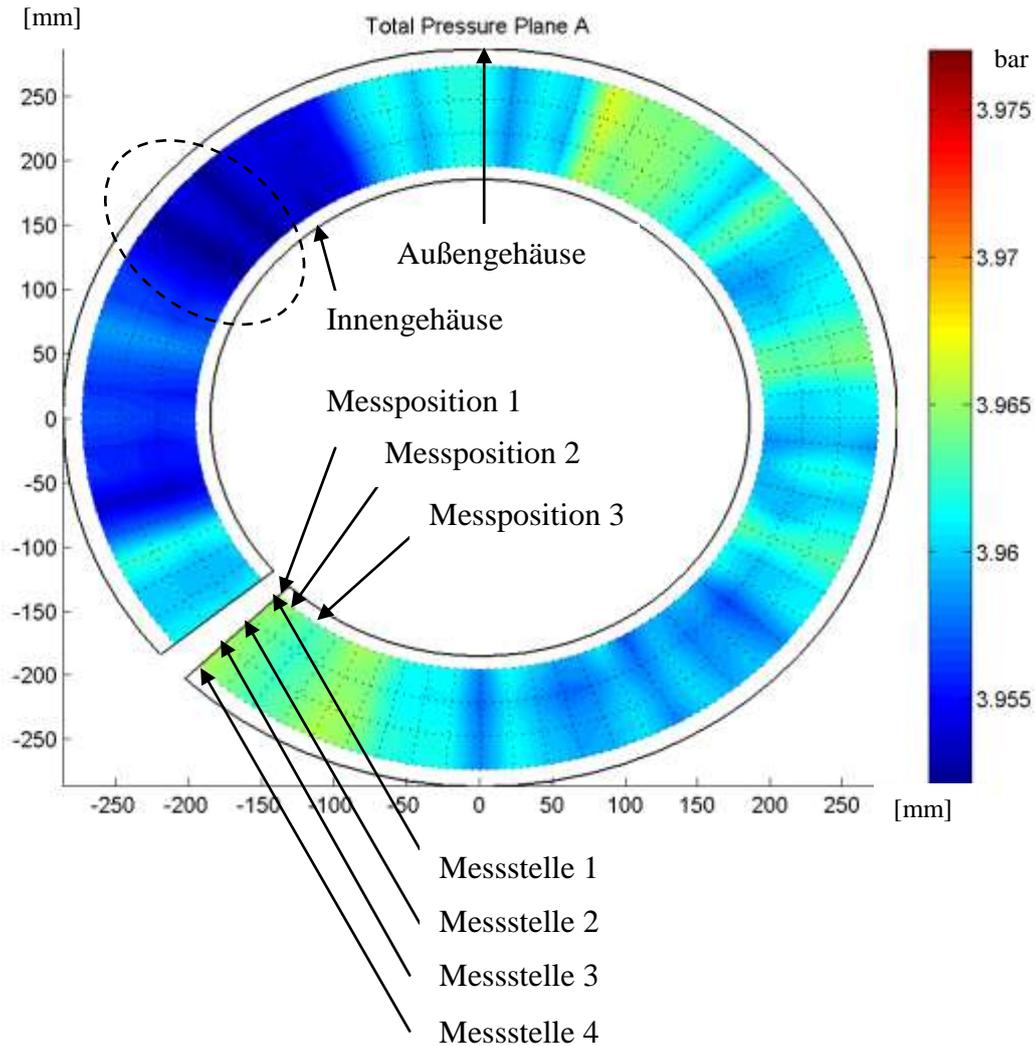
#### **Totaldruckmessung:**

Die Totaldruckmessung in Ebene A beginnt  $135^\circ$  zur vertikalen Achse versetzt, da der Totaldruckrake sich an dieser Stelle in seiner Nullposition befindet. In Abb. 28 ist das Resultat einer solchen Messung zu sehen. Beim inneren, schwarz durchgezogenen Kreis handelt es sich um den Innengehäuse. Der äußere durchgezogene Kreis stellt den Außengehäuse dar.

Die x- und y-Koordinaten zeigen den Abstand vom Mittelpunkt in jeweils x- bzw. y-Richtung. Zudem ist auf der rechten Seite eine Farbskala (Colorbar) zu erkennen. Diese gibt Aufschluss über den verwendeten Farbcode, welcher den entsprechenden Totaldrücken zuzuordnen ist. Der maximale in der Farbskala dargestellte Totaldruck ist bei dunkelrot und hat den Wert 3,977 bar. Der kleinste Druck beträgt dort 3,952 bar und wird mit dunkelblau dargestellt. Die Farbskala wird so angepasst, dass alle zu vergleichenden Messungen dieselben Minima und Maxima aufweisen.

Im Hintergrund ist ein schwarzes Raster erkennbar. Die Knotenpunkte stellen die verschiedenen Messpunkte dar. Da die Messwerte in  $5^\circ$ -Schritten aufgenommen werden, sind auch die Abstände zwischen den Knotenpunkten über den Umfang immer jeweils  $5^\circ$ . Zudem werden diese als Koordinaten für die Matlab-Auswertung verwendet. Der Totaldruck zwischen einem und dem nächsten Knoten wird interpoliert. Es wird kein feineres Netz (Bsp.:  $2^\circ$ -Schritte) gewählt, da das gewählte Netz für die Strömungsuntersuchung ausreichend genau ist. Zudem würde ein feineres Netz die Messzeit für die  $360^\circ$ -Umfangsmessung erheblich erhöhen.

Außerdem können am Raster die verschiedenen Messstellen des Totaldruckrakes erkannt werden. Dabei ist in Abb. 28 zu sehen, dass es sich bei Messstelle 1 um die Position der untersten Staudrucksonde handelt, daraus folgend bei Messstelle 4 von der obersten Totaldrucksonde gesprochen wird. In der Messposition 1 befindet sich die Traversierung in Nullposition, also im Endschalter. Die Messwerte können nach dem Erreichen eines nahezu konstanten Betriebszustandes aufgenommen werden.



**Abb. 28: Beispiel Totaldruckmessung in Ebene A**

Im Beispielfeld (Abb. 28) befindet sich der niedrigste, gemessene Totaldruck an der Stelle der strichlierten Ellipse. Die Stelle des höchsten Druckes kennzeichnet die gelb eingefärbte Fläche auf der oberen rechten Seite, ausgehend von der vertikalen Achse. Der höchste Totaldruck beträgt 3,967 bar. Der niedrigste Druck beträgt dabei 3,952 bar. Die Drücke sind als Absolutwerte zu verstehen. Die Druckdifferenz über den gesamten Umfang der Ebene A beträgt in diesem Beispiel also 15 mbar.

Im Anhang sind die Totaldruckminima und -maxima der verschiedenen Messungen in Tabellen aufgelistet.

In der folgenden Abbildung (Abb. 29) sind die vier Umfangsmessungen über eine Versuchsfahrt dargestellt. Dabei entspricht die in der Abbildung verwendete Nummerierung der zeitlichen Abfolge der Messungen. Es ist zu erkennen, dass bei der ersten Messung ein höherer Totaldruck als bei den anderen drei Messungen evaluiert wird. Dies kann damit begründet werden, dass die erste Messung zu früh gestartet wurde. Somit war der

Betriebspunkt des Zwei-Wellen-Rigs noch nicht stabil. Auf dies wird aber später noch eingegangen. Es ist aber auch zu erkennen, dass die Druckverteilung über den Umfang konstant ist. Die größte Druckdifferenz weist die zweite Messung mit 15 mbar auf. Die Maxima und Minima der Messergebnisse können im Anhang gefunden werden

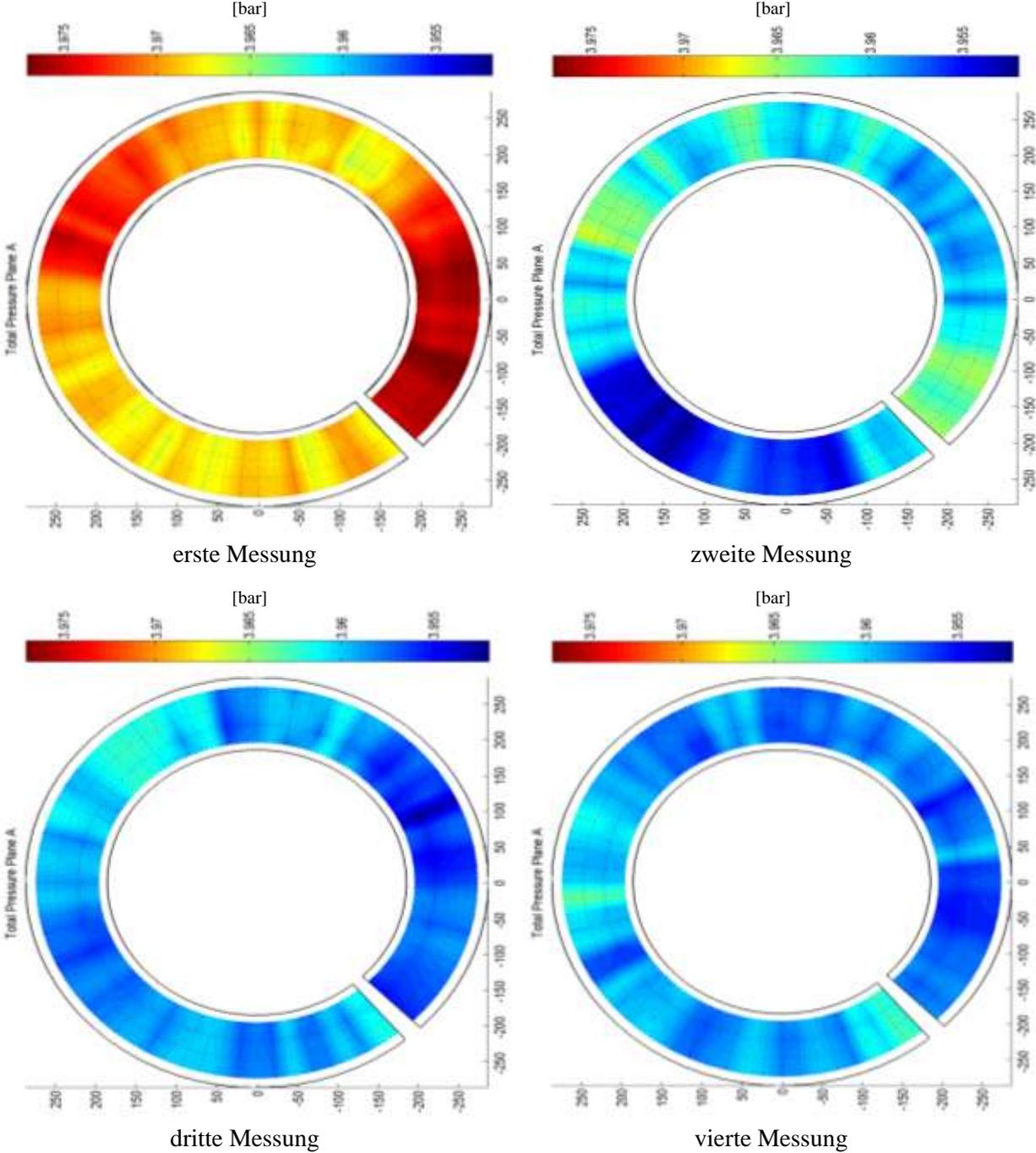


Abb. 29: Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene A (ADP)

Anschließend werden die Totaldrücke korrigiert, um die Betriebspunktschwankungen auszugleichen. Dies wird mit Hilfe des Mischkammerdrucks durchgeführt (lt. Gleichung (20)). Dazu wird der Mischkammerdruck über die jeweilige Messzeit der entsprechenden Umfangsmessung gemittelt.

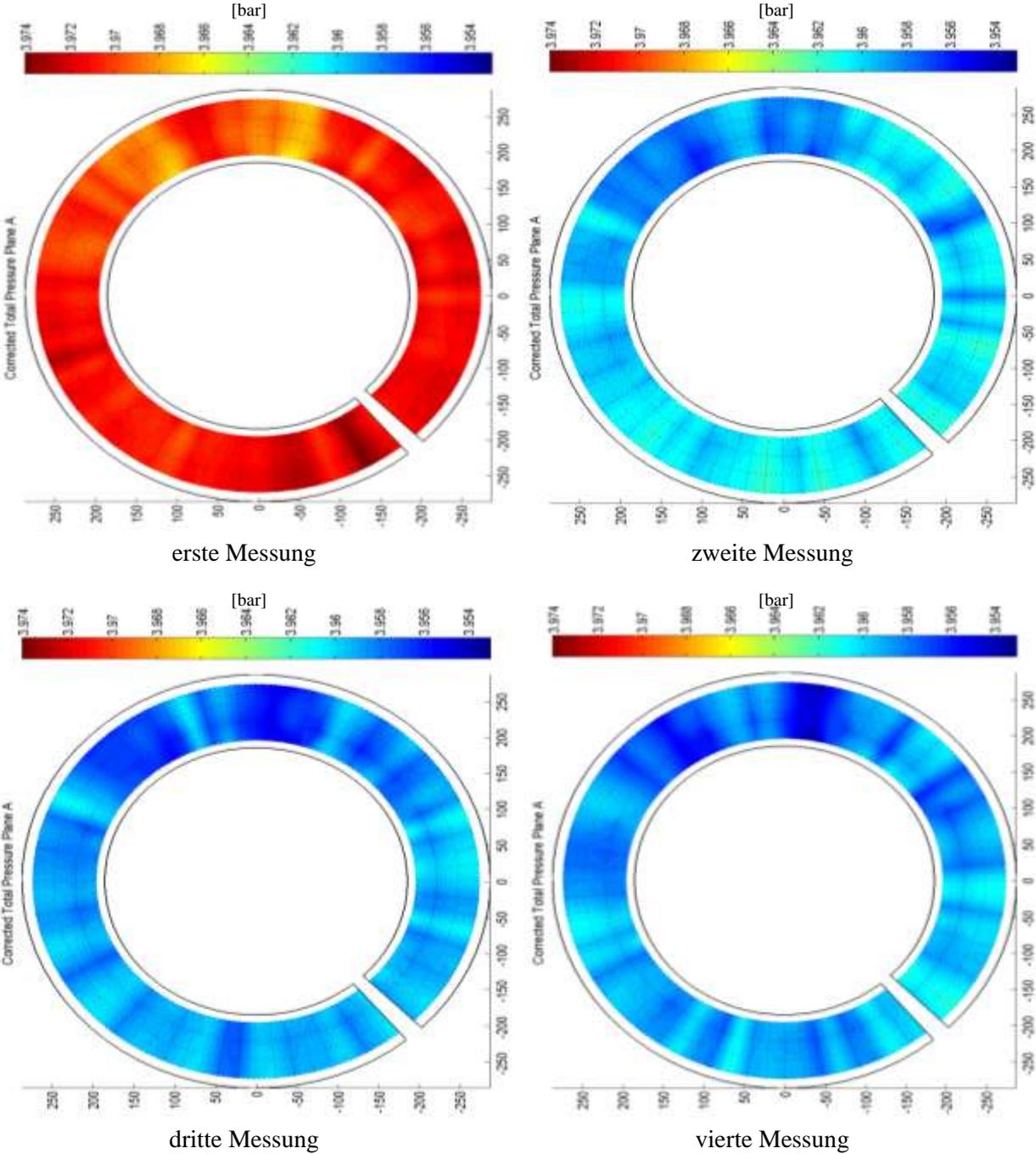


Abb. 30: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene A (ADP)

Die für die Korrektur verwendete Formel ist in (20) zu sehen. Durch diese Korrektur können die verschiedenen Messungen mit Vernachlässigung der Betriebspunktschwankungen untereinander verglichen werden. Es ist immer noch zu erkennen, dass der Totaldruck der ersten Messung erkennbar höher ist, als in den drei anderen Messungen (welche einen vergleichbar großen Totaldruck aufweisen). Dafür werden aber durch die Korrektur die Bereiche höheren und niedrigeren Drucks über den Umfang gleichmäßig. Die Maxima und Minima, welche in Abb. 29 erkannt werden können, sind also betriebspunktabhängig und können durch die Korrektur ausgeglichen werden.

Die somit erhaltenen tiefen und hohen Totaldrücke haben ihre Maxima und Minima immer an denselben Stellen in Umfangsrichtung. Diese wandern also nicht über die Dauer der Versuchsfahrt und dürfen somit untereinander verglichen werden.

Durch den Ausgleich der Betriebspunktschwankungen können sogar die Differenzdrücke der jeweiligen Minima und Maxima verkleinert werden. Somit weist Messung 1 noch eine Druckschwankung von 8 mbar über den Umfang auf. Bei den anderen drei Messungen belaufen sich diese auf 6 mbar (zweite und dritte Messung) bzw. 9 mbar (vierte Messung).

Der maximal gemessene Druckunterschied pro Messung begibt sich somit auf 15 mbar (zweite). Dieser kann jedoch durch die Korrektur des Betriebszustandes auf 9 mbar (vierte Messung) ausgebessert werden kann.

### **Totaltemperaturmessung:**

Die Auswertung der Totaltemperaturmessungen verläuft im Prinzip gleich wie jene des Totaldruckes. Die Messungen werden wieder in Abbildungen dargestellt.

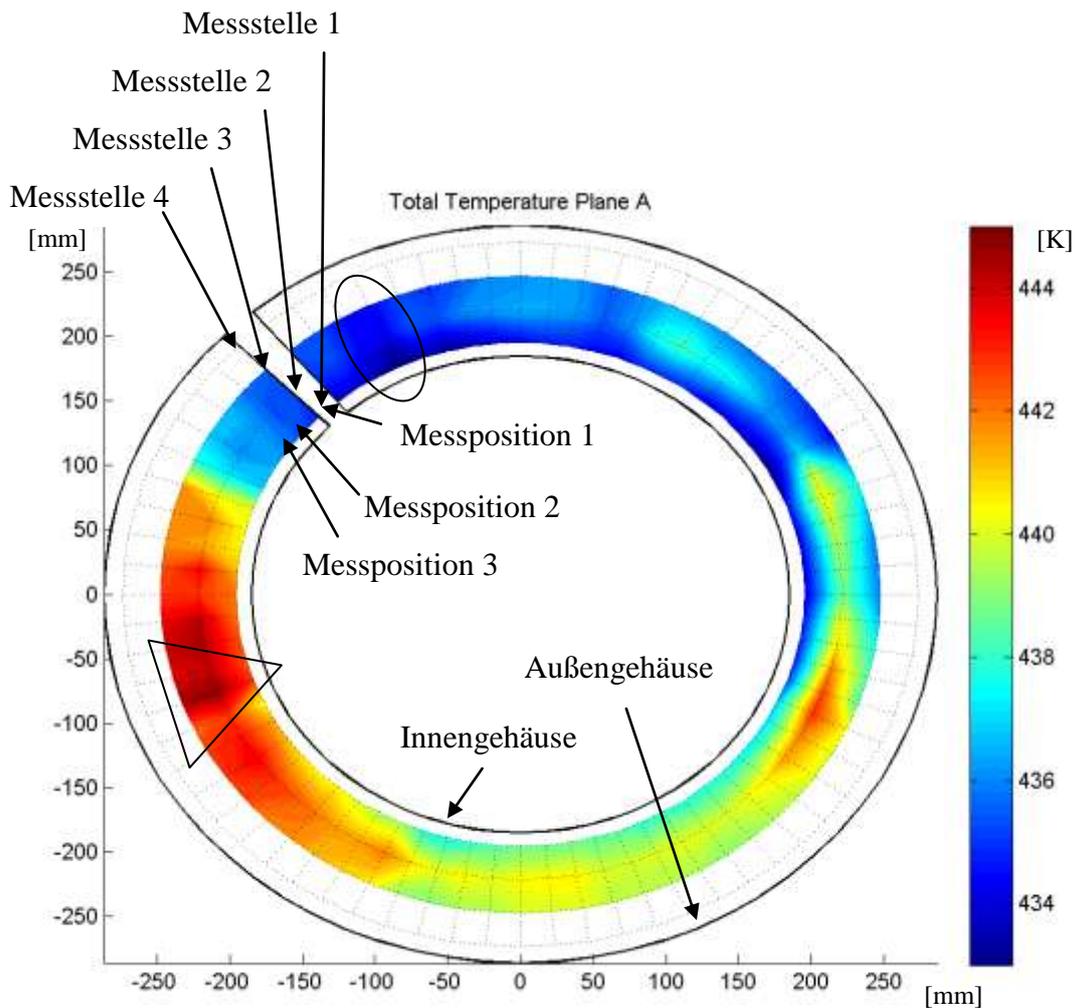
Die Totaltemperaturmessung in Ebene A hat ihren Startpunkt um  $45^\circ$  zur vertikalen Achse versetzt, da die Traversierung so im Endschalter steht. In Abb. 31 ist ein Beispiel einer Totaltemperaturmessung zu sehen. Beim inneren, schwarz durchgezogenen Kreis handelt es sich wieder um den Innengehäuse. Der äußere durchgezogene Kreis stellt, gleich wie bei der Totaldruckmessung, den Außengehäuse dar.

Die Abstände vom Mittelpunkt in x- und y-Richtung werden durch das Koordinatensystem gezeigt. Auch in dieser Darstellung ist auf der rechten Seite eine Farbskala zu erkennen. Durch diese kann der verwendete Farbcode den entsprechenden Temperaturen zugewiesen und entschlüsselt werden. Die Maximaltemperatur wird dabei mit dunkelrot dargestellt und beträgt 445 K. Die kleinste Temperatur in dunkelblau entspricht 433 K. Die Farbskala wird für alle vier Messungen gleich eingestellt. Somit werden Vergleiche der verschiedenen Messungen untereinander vereinfacht.

Auch in der Auswertung der Totaltemperatur kann im Hintergrund ein schwarzer Raster erkannt werden. Genannter ist gleich aufgebaut, wie bei den Abbildungen der Totaldruckmessung.

Am Raster können die verschiedenen Messstellen der Totaltemperaturrakes gefunden werden. In Abb. 31 sind die Messstellen 1 bis 4 markiert. Bei Messstelle 1 handelt es sich um die Position des untersten Thermoelements, daraus folgend bei Messstelle 4 um den obersten Temperaturfühler. Messstelle 4 ist defekt. Deswegen kann der äußere Teil des Rasters auch nicht dargestellt werden.

Zudem werden die Messpositionen 1 bis 3 in der folgenden Abbildung gezeigt. In Messposition 1 befindet sich die Traversierung im Endschalter. Da auch die Messergebnisse dieser Messungen in  $5^\circ$ -Schritten aufgenommen werden, können bei der Totaltemperaturmessung ebenfalls 72 Messpositionen angefahren und gemessen werden.



**Abb. 31: Beispiel Totaltemperaturmessung in Ebene A**

In Abb. 31 ist der Bereich der niedrigsten Temperatur durch die Ellipse markiert. Der Bereich der höchsten Temperatur wird mit dem Dreieck markiert. Die höchste Temperatur beträgt dabei 444,8 K (= 171,65°C), wobei die niedrigste Temperatur 432,7 K (= 159,55°C) aufweist. Die Temperaturdifferenz über den gesamten Umfang der Ebene A ergibt sich so also zu 12,1 K.

Im Anhang sind die Totaltemperaturminima und -maxima der verschiedenen Messungen in Tabellen aufgelistet.

In der folgenden Abbildung (Abb. 32) sind die vier Umfangsmessungen über eine Versuchsfahrt dargestellt. Die Nummerierung der verschiedenen Messungen können in der folgenden Darstellung gefunden werden. Es ist zu erkennen, dass die Bilder der vier Messungen nahezu identisch sind. Die warmen und kalten Stellen sind immer an derselben Position in Umfangsrichtung.

Dafür ist aber die Totaltemperaturdifferenz über den Umfang größer als erwartet. Die größte Temperaturdifferenz weist die dritte Messung mit 12,6 K auf. Die anderen Messungen haben eine Totaltemperaturdifferenz von 12,5 K (erste), 12,1 K (zweite) und 12 K (vierte) über den gesamten Umfang.

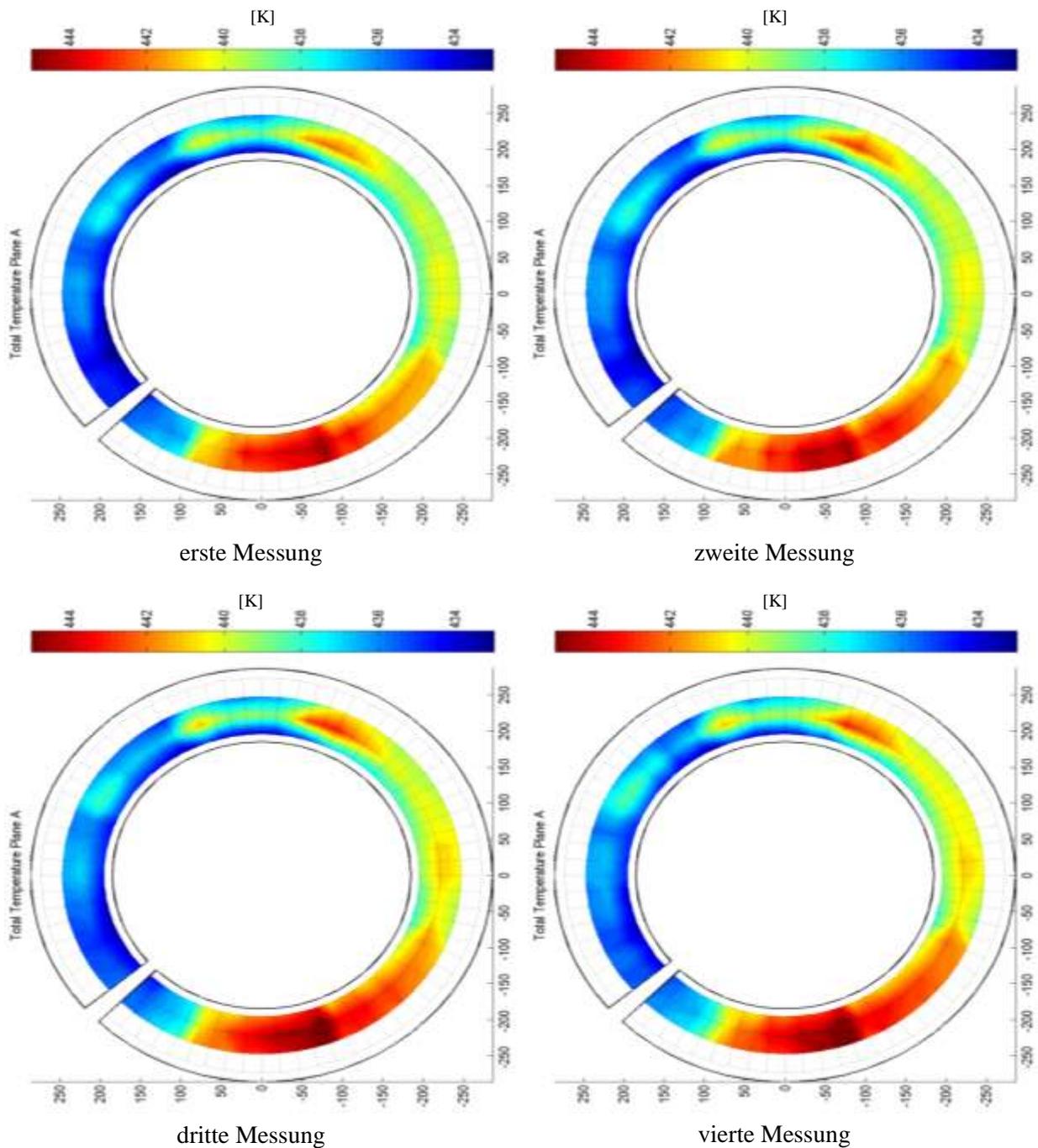


Abb. 32: Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (ADP)

Anschließend werden die Totaltemperaturen korrigiert, um auch hier die Betriebspunktschwankungen auszugleichen. Dies wird mit Hilfe der Mischkammertemperatur durchgeführt. Erreicht werden kann dies durch die zeitliche Mittelung der Mischkammertemperatur.

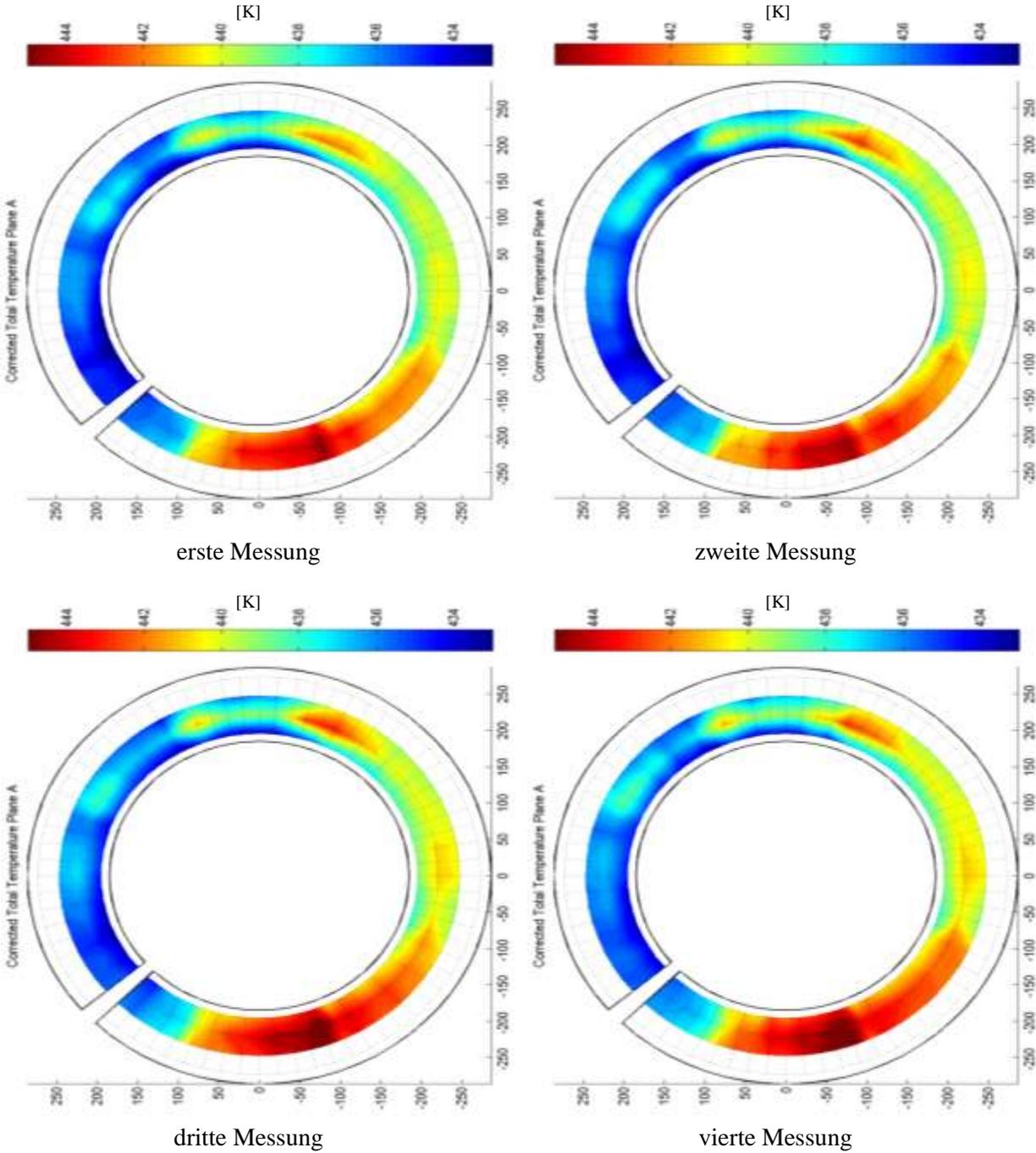


Abb. 33: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (ADP)

Die für die Korrektur verwendete Formel ist in (22) zu sehen. Wie bereits erwähnt können die verschiedenen Messungen durch diese Korrektur mit Vernachlässigung der Schwankungen des Betriebspunktes verglichen werden. Es ist aber auch erkennbar, dass dieser Einfluss auf die Totaltemperaturmessung vernachlässigbar klein ist. Durch diese Korrektur können keine wesentlichen Unterschiede erkannt werden. Gleich wie bei den Ergebnissen der Totaldruckmessung kann auch hier gesagt werden, dass sich die tiefsten und höchsten Temperaturen immer an denselben Stellen in Umfangsrichtung befinden. Die Minima und Maxima wandern also nicht über die Dauer einer Versuchsfahrt, somit dürfen auch diese vier Messungen untereinander verglichen werden.

Durch den durchgeführten Ausgleich werden die Temperaturdifferenzen der einzelnen Messungen sogar noch größer. So ergeben sich Totaltemperaturdifferenzen von 12,6 K für die erste, 12,2 K für die zweite, 12,9 K für die dritte und 12,7 K für die vierte Messung über den kompletten Umfang der Ebene A.

Das Ergebnis der Totaltemperaturmessung zeigt einen großen Totaltemperaturunterschied über den Umfang. Da die Temperatur in die Schallgeschwindigkeit eingeht, ist diese Temperaturdifferenz zu groß für die bevorstehende Akustikmessung. Möglichkeiten zu einer Anströmung des Zwei-Wellen-Rigs mit einer besseren Temperaturverteilung über den Umfang werden später noch besprochen.

#### 4.1.2 360-Grad-Messung in der Austrittsebene:

##### **Totaldruckmessung:**

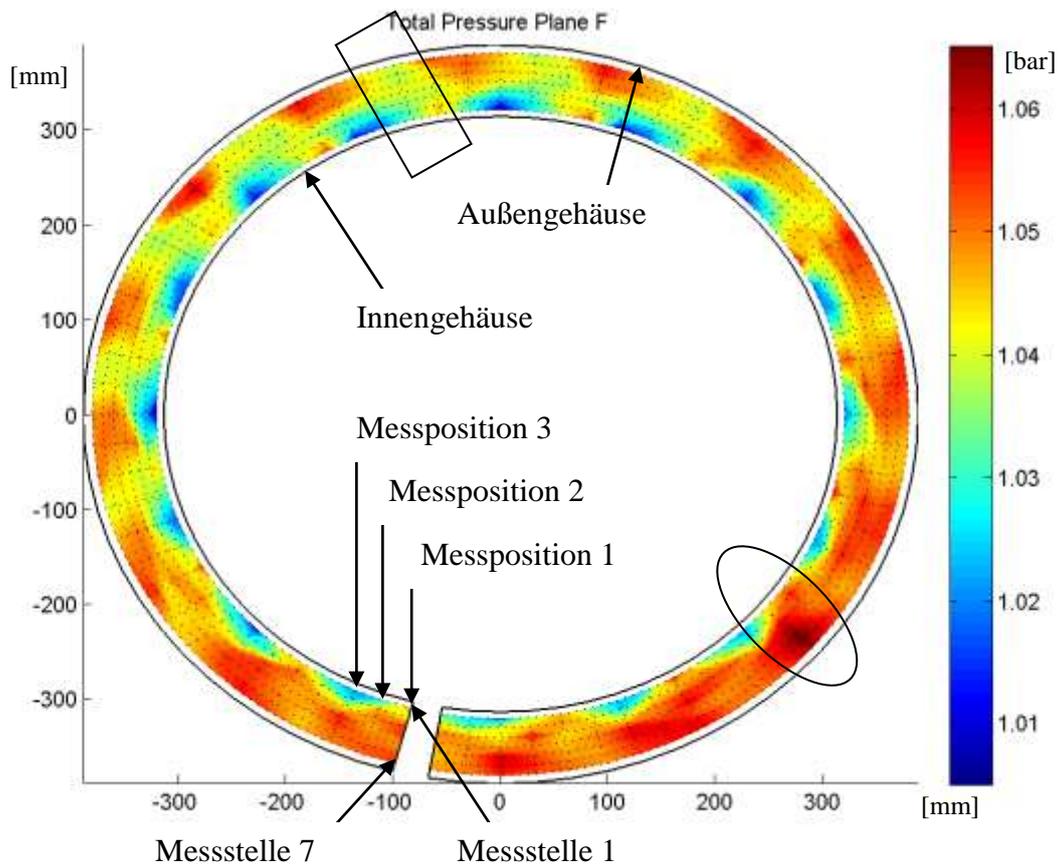
Der Aufbau der Darstellungen des Totaldruckes in Ebene F ist prinzipiell derselbe wie in Ebene A. Die Staudrucksonde steht in Nullposition um  $165^\circ$  von der vertikalen Achse versetzt. Es ist erkennbar, dass das in Abb. 34 dargestellte Raster in radialer Richtung viel feiner ist als jener in Ebene A. Dies lässt sich durch eine größere Anzahl von Messstellen in dieser Ebene erklären. Aufgrund der Kanalaufweitung werden hier sieben radiale Messstellen benötigt, um eine qualitative Aussage der Zustandsgrößen zu geben. Anschaulichkeitshalber werden im unteren Bild nur die Positionen der inneren und äußeren Staudrucksonde gezeigt.

Die Traversierung dreht in Ebene F in die umgekehrte Richtung, d.h. die Messwerte werden in diesem Fall gegen den Uhrzeigersinn aufgenommen. Die Abstände zwischen den Messpositionen in Umfangsrichtung betragen auch hier  $5^\circ$ . Insgesamt wird wieder von  $0^\circ$  bis  $355^\circ$  traversiert.  $0^\circ$  bezeichnet dabei die Nullposition. Es werden wieder 72 Messstellen angefahren. Die Messpositionen eins bis drei sind in Abb. 34 dargestellt.

Zudem ist an der x- und der y-Achse zu erkennen, dass der Innen- und der Außengehäuse einen größeren Durchmesser aufweisen als in der Eintrittsebene.

Die Farbskala (Abb. 34, rechts) zeigt ebenfalls die höchsten Totaldrücke in dunkelrot und die niedrigsten Totaldrücke in dunkelblau. Die Grenzen der Farbskala befinden sich bei 1 bar für die Minima und bei 1,07 bar für die Maxima. Die Totaldrücke in dieser Ebene sind niedriger, weil der Druck über die Hoch- und Niederdruckturbine abgebaut wird.

Bei der Auswertung werden die Totaldrücke zwischen den Messwerten an den anliegenden Knoten mit Zuhilfenahme von Matlab interpoliert. Somit kann ein vollständiges Strömungsbild dargestellt werden.



**Abb. 34: Beispiel Totaldruckmessung in Ebene F**

Abb. 34 zeigt, dass der Totaldruck im unteren Bereich des Strömungskanals größer ist als im oberen Bereich. Dies kann damit begründet werden, dass sich in einem geringen Abstand stromab der Austrittsebene das Abluftgehäuse befindet. Aufgrund des geringen Platzes hinter der genannten Ebene lenkt dieses um  $90^\circ$  um und verläuft anschließend senkrecht nach oben. Die Strömung kann aus diesem Grund nicht gleichmäßig abströmen, sondern hat aufgrund der Umlenkung einen unsymmetrischen Gegendruck.

Zudem kann ein Bereich hohen Druckes erkannt werden. Entsprechender wird in obiger Abbildung durch eine Ellipse markiert.

Auch die Nachläufe des TMTFs sind zu sehen. Dieses hat 16 dickwandige Struts, welche die Aufgabe der Leitschaufeln übernehmen. Ein solcher Nachlauf ist mit einem Viereck in der Darstellung markiert. Die Nachläufe der NDT sind nicht zu erkennen, da diese nur sehr dünnwandige Schaufeln besitzt.

In der obigen Abbildung beträgt der niedrigste gemessene Druck 1,0014 bar. Dabei liegt der höchste Druck bei 1,0527 bar. Die Druckdifferenz (51 mbar) ist also größer als in Ebene A. Dies kann einerseits durch die Umlenkung des Abluftkanals, andererseits durch die Strömungsumlenkungen im Zwei-Wellen-Rig begründet werden.

In der folgenden Abbildung (Abb. 35) sind die vier Messungen über eine Versuchsfahrt dargestellt. Die zweite Messung (im Bild oben rechts) wird auch als Beispielbild (Abb. 34) verwendet. Die Druckdifferenzen der vier Umfangsmessungen befinden sich alle im selben Größenbereich. Im Anhang sind die Druckminima und –maxima aufgelistet.

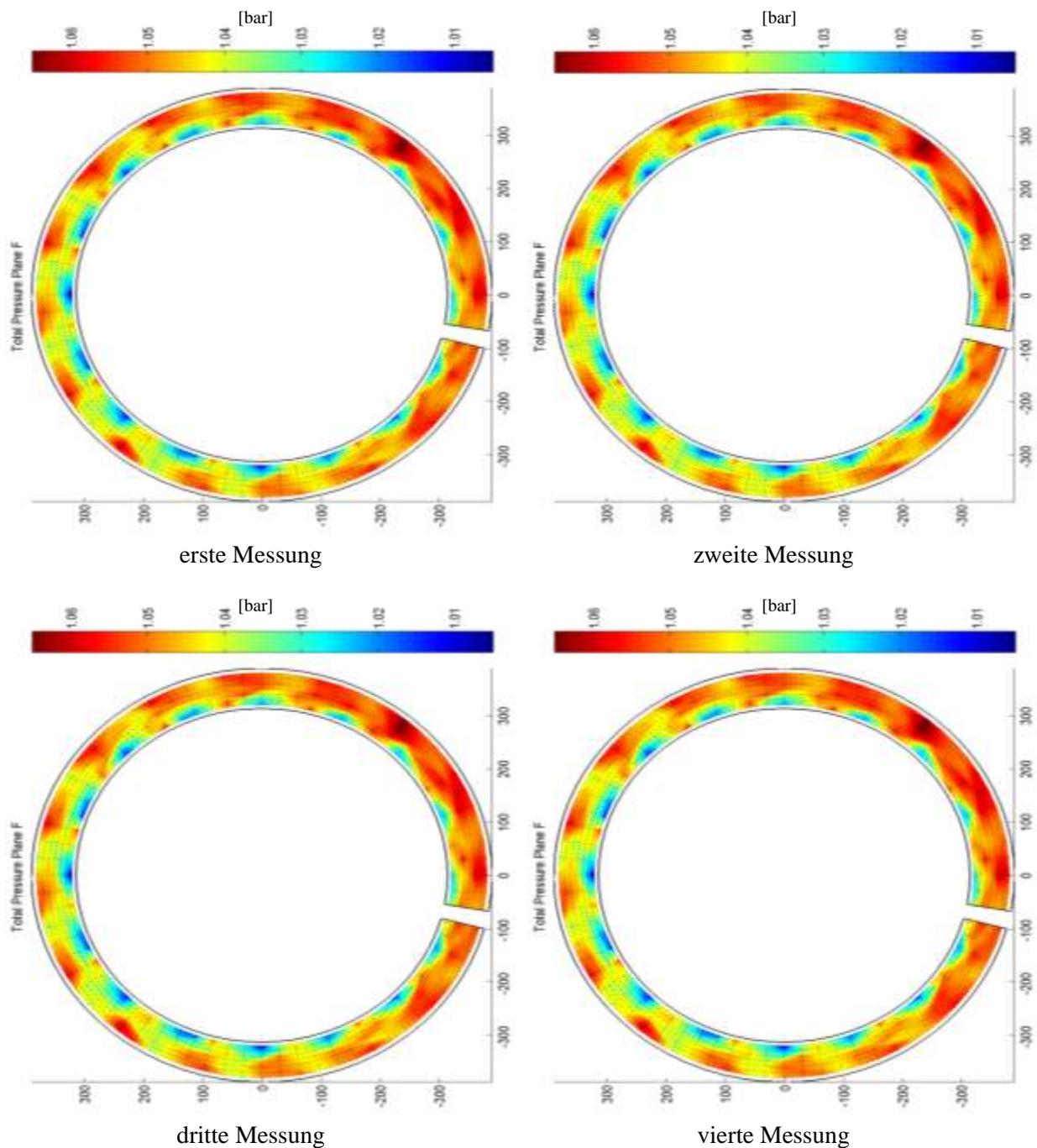


Abb. 35: Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene F (ADP)

Bei den in Abb. 36 dargestellten Messungen handelt es sich um die Korrektur der Umfangsmessungen, welche im obigen Bild dargestellt sind. Auch in Ebene F wird dies durch die zeitliche Mittelung des Mischkammerdruckes über die Zeit einer Messung durchgeführt. Im ADP können so auch diese vier Messungen ausgewertet werden.

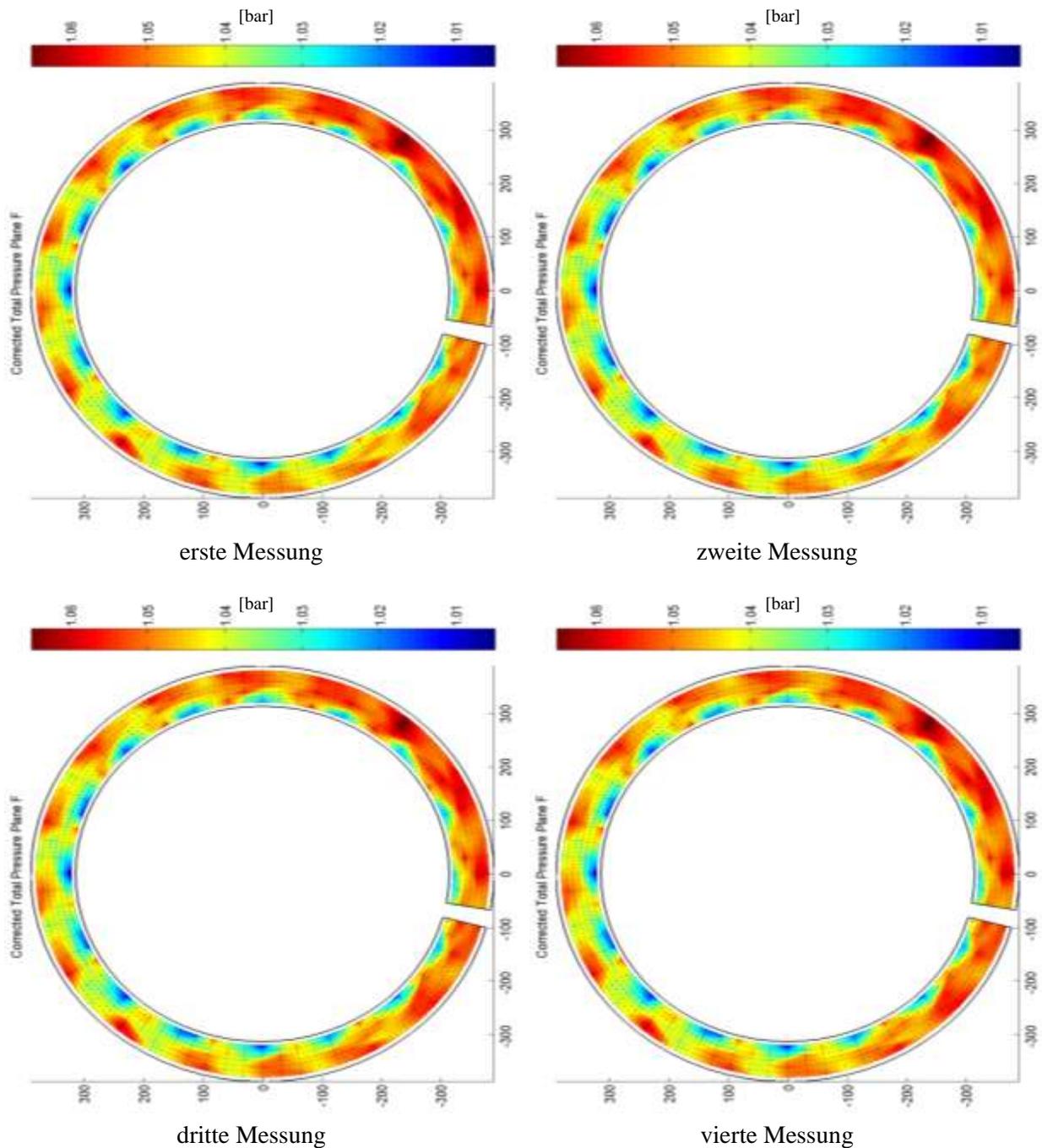


Abb. 36: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (ADP)

Die für die Korrektur verwendete Formel ist in (21) dargestellt. Auch hier wird diese durchgeführt, um die Betriebspunktschwankungen, welche auf die Messungen einwirken, zu korrigieren. Die daraus resultierenden Veränderungen der Minima und Maxima sind jedoch so klein, dass sie in den Darstellungen nicht bemerkbar sind. In der Tabelle der Druckminima und –maxima, welche sich im Anhang befindet, können die Unterschiede erkannt werden.

Der Vergleich der Messungen untereinander bringt auch hier ein zufriedenstellendes Ergebnis. Aufgrund der Druckunterschiede von Saug- zu Druckseite an den Turbinenschaufeln im Zwei-Wellen-Rig wird die Druckdifferenz größer als sie in der Eintrittsebene ist. Zusätzlich bewirkt der Abluftkanal, wie bereits gesagt, aufgrund der 90°-Umlenkung hinter der Austrittsebene, einen Rückstau des Fluids. Für eine andere Auslegung des Abluftkanals ist der entsprechende Platz aber nicht vorhanden. Auch eine axiale Abströmung kann nicht realisiert werden, da sich hinter der NDT die mit ihr gekoppelte Wasserbremse, welche die Turbinenleistung aufnimmt befindet.

## Totaltemperaturmessung:

Der Aufbau der folgenden Darstellungen der Ergebnisauswertungen unterscheidet sich nicht von den Anderen. Auch für die Totaltemperaturmessung in der Austrittsebene werden sieben Messstellen benötigt. Die innerste Messstelle (Messstelle 1) ist defekt. Deswegen kann die Totaltemperaturverteilung nicht über den gesamten Querschnitt des Kanals dargestellt werden. Die anderen sechs Messstellen reichen aber aus, um das Strömungsfeld zu charakterisieren. Abb. 37 zeigt ein Beispiel einer Totaltemperaturmessung in Ebene F. Die dargestellte Farbskala weist einen Temperaturbereich von 309 (dunkelblau) bis 321 K (dunkelrot) auf. Die Traversierung dreht in Ebene F, wie oben bereits erläutert, entgegen dem Uhrzeigersinn. Die erste Messposition, welche als Ausgangsposition bezeichnet werden kann (Traversierung im Limit Switch), ist hier um  $255^\circ$  von der vertikalen Achse versetzt. Dies ist in der unteren Abbildung zu erkennen. Auch bei dieser Messung werden 72 Messpositionen im Abstand von je  $5^\circ$ -Schritten über den Umfang angefahren.

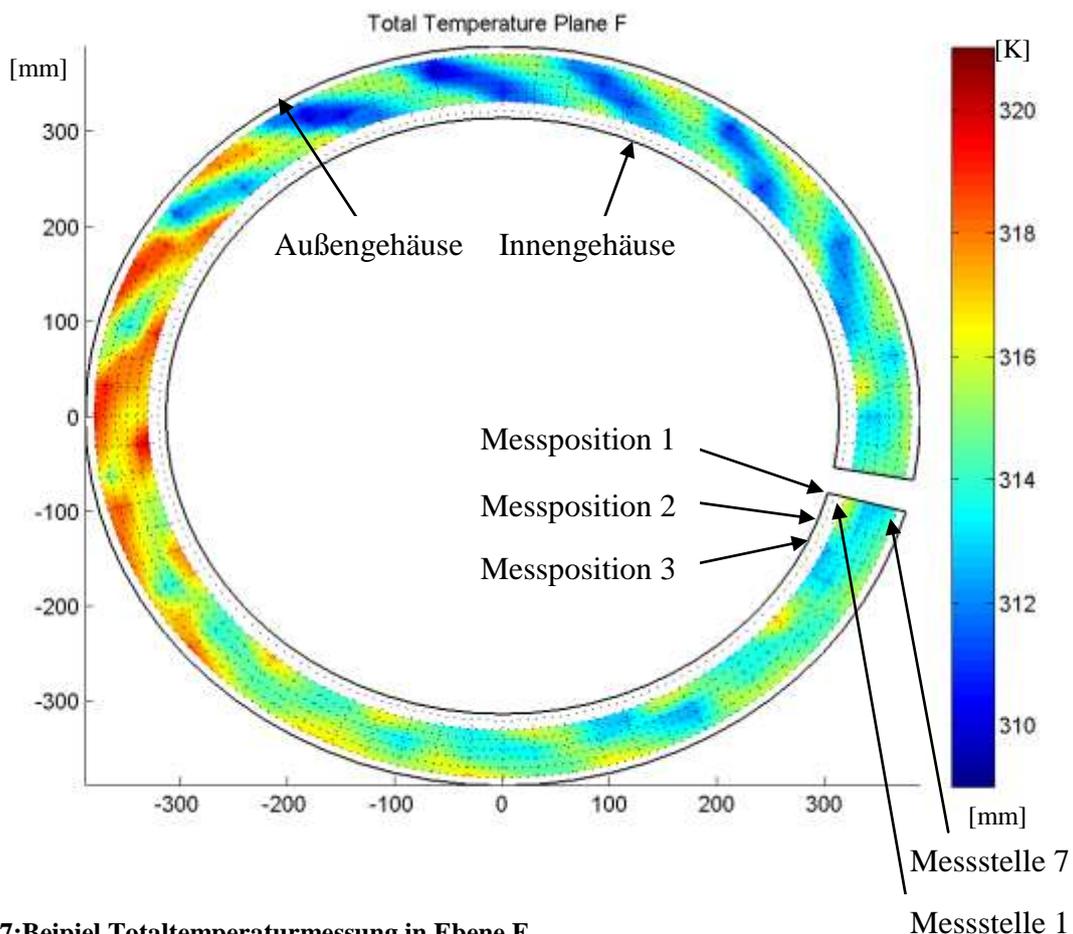


Abb. 37: Beispiel Totaltemperaturmessung in Ebene F

Bei genauer Betrachtung der Abb. 37 können die 16 Nachläufe der Struts erkannt werden. Im obersten Drittel sind diese am eindeutigsten zu sehen. Über die unteren zwei Drittel werden die Nachläufe verschmiert, können jedoch trotzdem erkannt werden. Zudem ist ersichtlich, dass sich der von der Mischkammer kommende und in Ebene A befindliche Hot Spot, auch in

die Ebene F fortpflanzt. Er befindet sich entlang des Umfangs an selber Stelle. Die in der unteren Abb. 38 dargestellten Messungen sind verwertete Rohdaten der Messungen der Totaltemperaturen in der Austrittsebene über eine Versuchsfahrt. Die warmen Bereiche können auch hier bei allen Messungen an den gleichen Stellen gefunden werden.

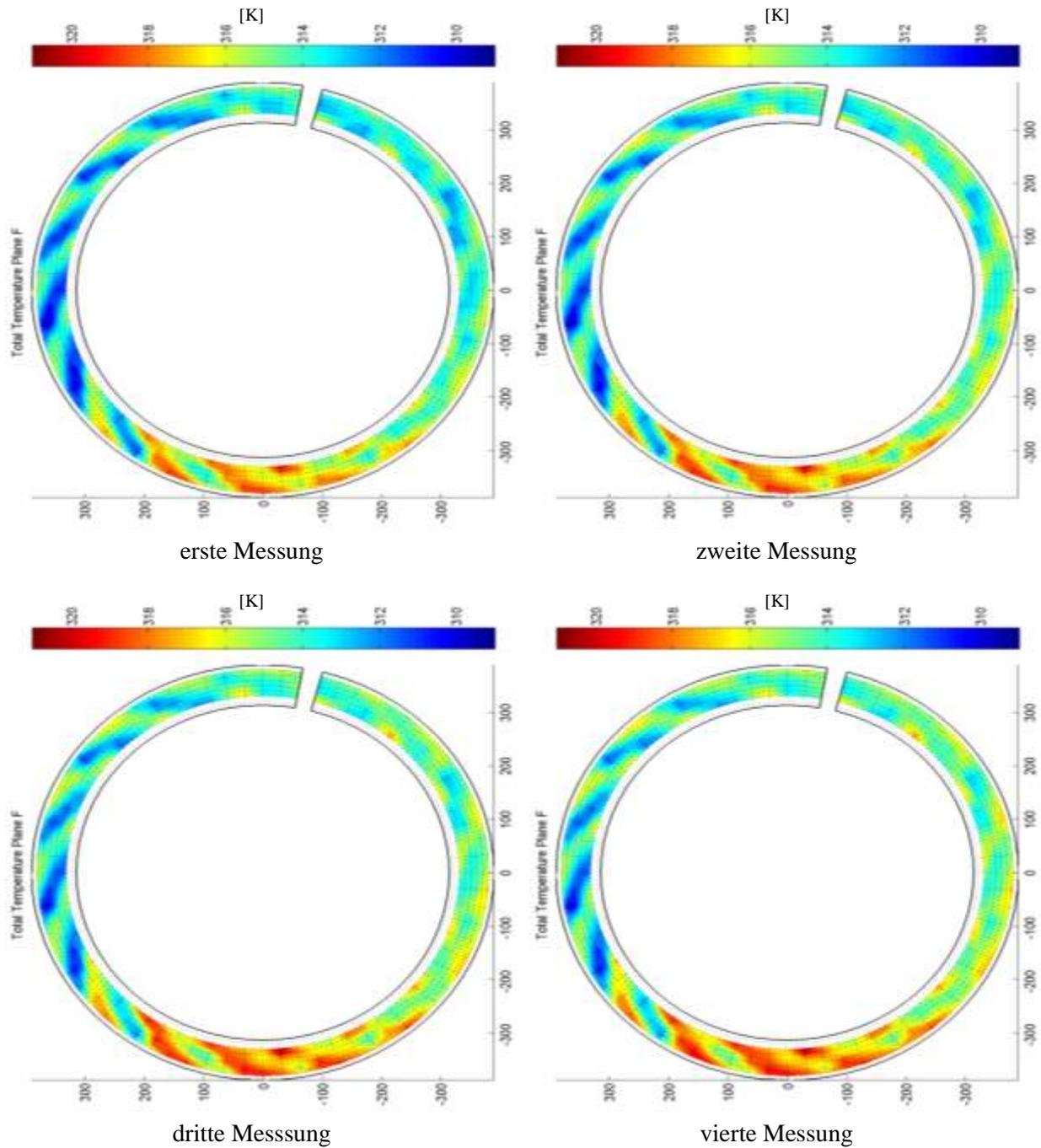


Abb. 38: Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (ADP)

Auch bei dieser Messung werden die Daten der vier Messungen korrigiert, um die Schwankung des Betriebszustands, welcher die Messung beeinflusst auszugleichen. Das Ergebnis dieses Ausgleichs ist in Abb. 39 zu sehen. Die Korrektur wird wieder mittels der Mischkammertemperatur durchgeführt.

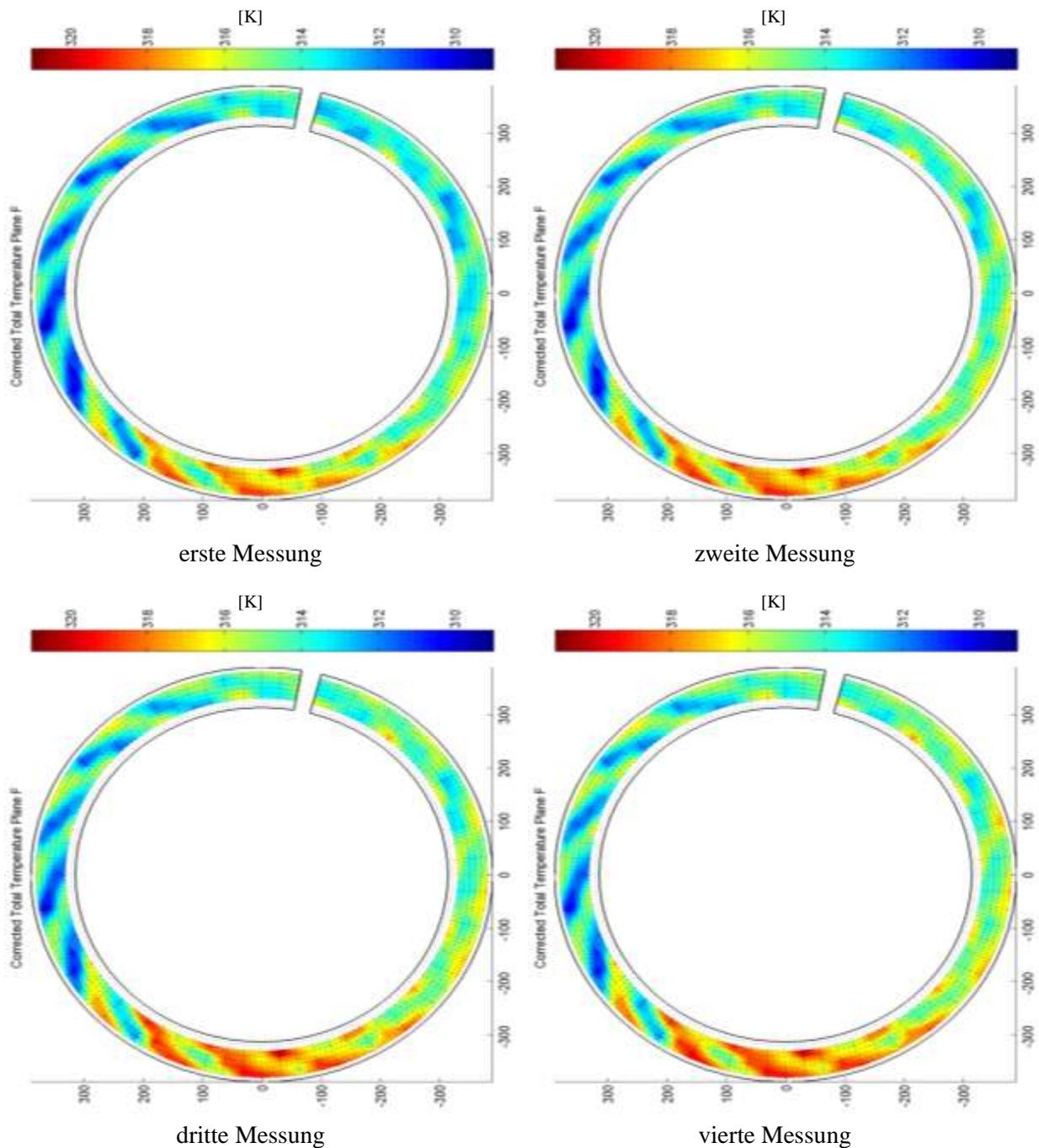


Abb. 39: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (ADP)

Die für die Korrektur verwendete Formel ist in (23) dargestellt. Die Veränderungen können in der im Anhang befindlichen Tabelle der Totaltemperaturminima und –maxima nachgeschlagen werden.

Untereinander können die vier Messungen erneut verglichen werden. Dabei können die heißen Bereiche, welche in der Eintrittsebene schon zu erkennen sind auch in der Austrittsebene gefunden werden. Diese befinden sich über den Umfang gesehen an denselben Stellen wie in der Eintrittsebene.

Wie in Ebene A ist auch im Strömungskanal der Ebene F der Totaltemperaturunterschied zu groß, um eine akustische Messung an genannter Stelle durchzuführen.

### 4.1.3 Oberflächenmessung an der Mischkammer:

In diesem Abschnitt wird auf die Messung der Oberflächentemperatur mittels IR-Kamera eingegangen. Um die Messung durchzuführen wird Position 1 (in Abb. 26 zu sehen) als Kameraposition verwendet. Der Abstand der IR-Kamera vom Messobjekt beträgt dabei 5 m. Da die Messung nicht durch Nebel oder ähnliches beeinflusst wird, können aufgrund der Atmosphärenkorrektur der Kamera die resultierenden Ergebnisse als richtig angenommen werden. Der Emissionsgrad des Messobjekts ist unbekannt. Aus diesem Grund wird die Oberfläche der Mischkammer mit matt schwarzem Auspufflack lackiert, um einen Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,97$  [10] zu erreichen. Es muss aber bedacht werden, dass die Kamera mit einem Winkel  $30^\circ$  zur Normalen auf die Oberfläche steht. Dies ist zwar nicht kritisch, trotzdem wird das Ergebnis dadurch beeinflusst. Alle anderen Fehler werden von der IR-Kamera direkt ausgeglichen.

Der Temperaturbereich, welcher an der IR-Kamera eingestellt und zur Messung verwendet wird, beginnt bei  $0^\circ\text{C}$  und endet bei  $500^\circ\text{C}$ . Die Eigenschaften der IR-Kamera sind in Kapitel 2.2.2 zu finden. Die Oberflächentemperatur wird über die gesamte Zeit der Umfangsmessung aufgenommen. Dabei wird alle 20 Sekunden ein Ist-Zustand der Oberflächentemperatur gespeichert.

In Abb. 41 ist ein solches Bild zu sehen. Diese Aufnahme zeigt den Zustand der Oberflächentemperatur in der Mitte der Versuchsfahrt. Es sind keine großen Veränderungen vor, sowie nach dem Zeitpunkt dieser Aufnahme zu erkennen. Auf der beigelegten CD können die dazu erstellten Videos der Temperaturänderung an der Mischkammeroberfläche über die Nacht einer Versuchsfahrt angesehen werden.

Die Farbskala wird von  $115^\circ\text{C}$  (dunkelblau) bis  $145^\circ\text{C}$  (dunkelrot) eingestellt. Auf der rechten Seite kann erkannt werden, dass sich ein Bereich höherer Temperatur ausbreitet. Dieser ist über die gesamte Messzeit zu beobachten. Die höchste evaluierte Temperatur beträgt  $140,3^\circ\text{C}$  und kann in der folgenden Abbildung gefunden werden. Das Minimum liegt bei  $129,1^\circ\text{C}$  und ist im grünen Bereich zu erkennen.

Es werden im ADP keine anderen Kamerapositionen verwendet. Im OFF 1 und 2 werden der Vollständigkeit halber zusätzlich noch andere Positionen verwendet, um die komplette Oberfläche der oberen Hälfte der Mischkammer darzustellen. Die Ergebnisse hierfür können im Anhang gefunden werden.

Die Temperaturunterschiede an der Mischkammeroberfläche können auf den kurzen Durchmischungsweg der beiden Teilmassenströme zurückgeführt werden und würden durch eine bessere Durchmischung vergleichmäßigt werden.

Abb. 40 zeigt ein Foto der oberen Hälfte der Mischkammer. Dieses Foto wurde in etwa aus der Sicht des danach folgenden Thermographiebildes aufgenommen und soll dem besseren Verständnis des IR-Bildes dienen.



**Abb. 40: Foto der oberen Hälfte der Mischkammer**

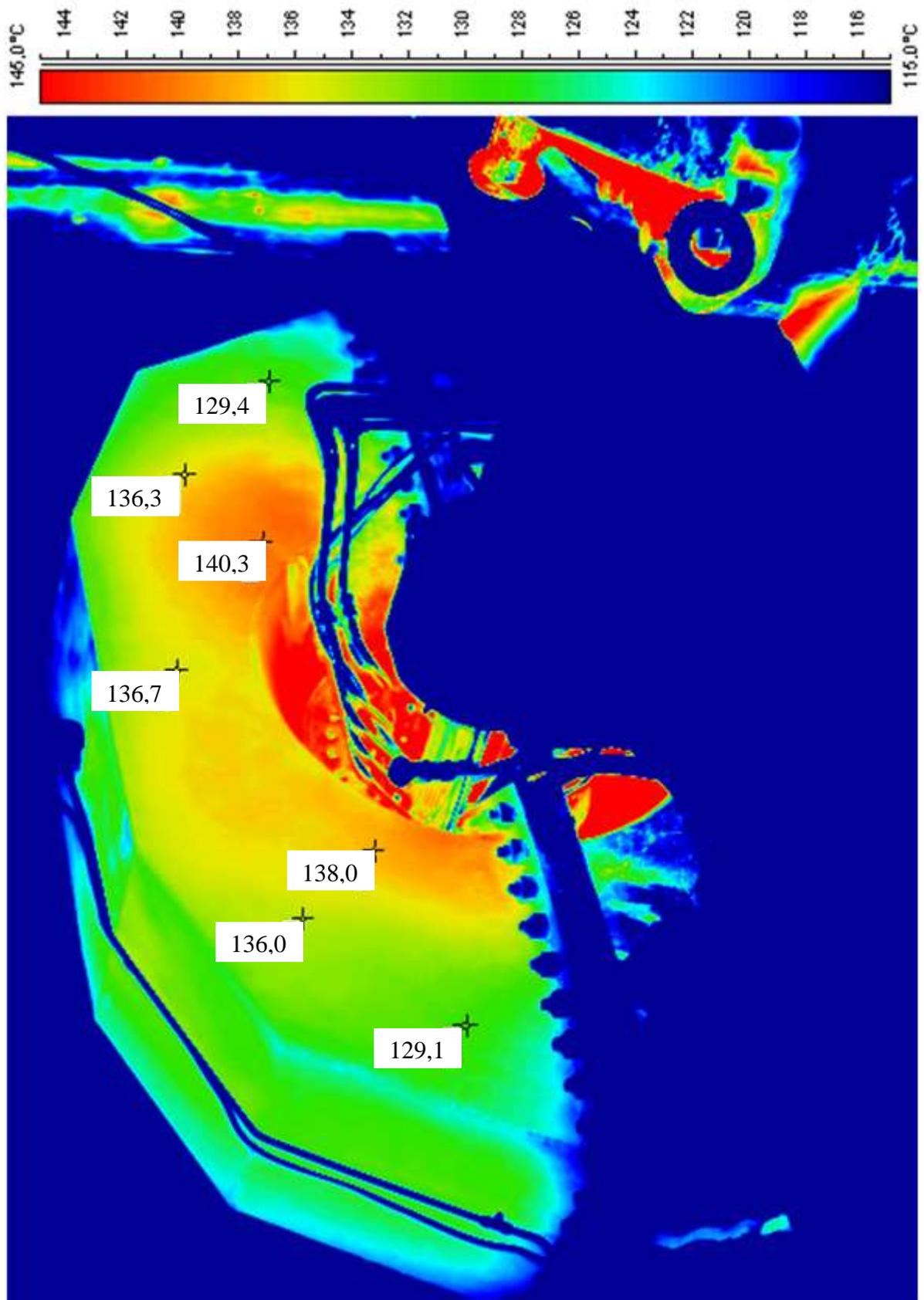


Abb. 41: Messung der Mischkammertemperatur während der Umfangsmessungen (ADP)

#### 4.1.4 Betriebspunkt über die Zeit der Messung:

Im folgenden Abschnitt wird auf die Betriebspunktschwankungen eingegangen. Der Betriebspunkt ist unter Anderem vom Umgebungszustand abhängig und kann nur mit großem Aufwand konstant gehalten werden. Zudem muss die komplette Anlage zuerst auf Betriebsdrehzahl gebracht werden und anschließend auch dort gehalten zu werden. Es muss so lange mit der Messung gewartet werden, bis das Zwei-Wellen-Rig mit den dazugehörigen Komponenten auf Betriebstemperatur ist. Die damit verbundene Wärmeausdehnung und die daraus folgende Kanalaufweitung dürfen zum Zeitpunkt der Messung keine Veränderungen mehr aufweisen. Erst nach Abschluss dieses Prozesses kann von einem konstanten Betriebspunkt des Prüfstandes konstanter Betriebspunkt gesprochen werden.

Es wurde festgestellt, dass es im ADP bis zu vier Stunden dauert, einen konstanten Betriebspunkt, der essentielle Voraussetzung für vergleichbare Messergebnisse ist, zu erreichen. Diese vier Stunden werden vom Anfang des Hochfahrvorgangs bis zum Anfang der Messung gerechnet. In den Betriebspunkten OFF 1 und 2 ist dieser Vorgang auch nicht kürzer. Abb. 42 zeigt die Betriebspunktschwankungen über die Dauer der Messung im ADP.

Das in Abb. 42 a) dargestellte Diagramm, zeigt die Drehzahl der Hochdruckturbinen über die Zeit aller vier Messungen. Die HDT ist mit einem Bremsverdichter verbunden, welcher Umgebungsluft im GHH verdichtet. Die Drehzahl der Hochdruckturbinen wird im Aerodesign Punkt auf 11070 Umdrehungen pro Minute eingestellt.

Das Diagramm rechts daneben (b)) zeigt die Temperaturen des Massenstroms vom GHH kommend (schwarz) und des Massenstroms, welcher von der Verdichteranlage geliefert wird (rot). Diese werden auch über die Dauer der Versuchsfahrt dargestellt. Der Massenstrom, welcher vom GHH angesaugt wird, weist eine beinahe konstante Temperatur von knapp über 490 K über die Messzeit auf. Der von der Verdichteranlage kommende Massenstrom hingegen kann bei 400 K als konstant angenommen werden. Hier sieht man dass die beiden fast gleich großen Massenströme, welche in der Mischkammer vermischt werden, eine Temperaturdifferenz von circa 90 K aufweisen. Wie in den 360°-Umfangs-Abbildungen schon ersichtlich war, verursacht dieser Temperaturunterschied der beiden Massenströme aufgrund des kurzen Durchmischungsweges eine unsymmetrische Temperaturverteilung über den Umfang.

In Abb. 42 c) wird die Mischkammertemperatur über die Dauer der Messung gezeigt. Es ist zu sehen, dass sich diese zum Zeitpunkt der ersten und zweiten Messung noch erhöht. Das bedeutet auch für die Totaltemperaturmessung, dass mindestens die erste Messung zu früh gestartet wurde, da der Betriebspunkt noch nicht stabil war. Die Totaltemperaturen und –

drücke der Umfangsmessungen werden aber im Nachhinein über die mittlere Mischkammertemperatur bzw. den mittleren Mischkammerdruck korrigiert.

Das Diagramm rechts daneben (d)) zeigt die beiden Massenströme, der des GHH (schwarz) und den von der Verdichteranlage (rot) kommenden. Erkennbar ist, dass beide Massenströme ungefähr gleich groß sind, wobei der des GHH etwas kleiner ist. Zudem kann am Anfang der ersten Messung ein Ausreißer des vom GHH kommenden Massenstroms gesehen werden. An dieser Stelle ist die Massenstrommessung des GHHs kurzzeitig ausgefallen.

In Diagramm e) ist der Mischkammerdruck über die Messzeit zu sehen. Es ist zu erkennen, dass der Mischkammerdruck während der ersten Umfangsmessung noch sinkt.

Rechts daneben (f)) ist der reduzierte Massenstrom über die Zeit dargestellt, welcher zwar schwankt, diese Schwankungen aber vernachlässigt werden können.

Abb. 42 g) zeigt den Druck am Austritt aus dem Zwei-Wellen-Rig (im Abluftkanal gemessen) über die Zeit der Umfangsmessungen dargestellt. Dabei befindet sich dieser über die gesamte Messzeit im Bereich zwischen 993 und 990 mbar.

Auf der rechten Seite unten (h)) kann die eingestellte Drehzahl der NDT abgelesen werden. Die hierfür zum Bremsen der NDT verwendete Wasserbremse wird auf 3550 Umdrehungen pro Minute eingestellt.

Abschließend kann gesagt werden, dass die erste Umfangsmessung zu früh gestartet wurde. Zu diesem Zeitpunkt war der Betriebspunkt noch nicht stabil. Folgend muss mindestens vier Stunden vom Hochfahren bis zum Messbeginn gewartet werden, damit ein stabiler Betriebspunkt als Grundlage vergleichbarer Messungen erreicht wird.

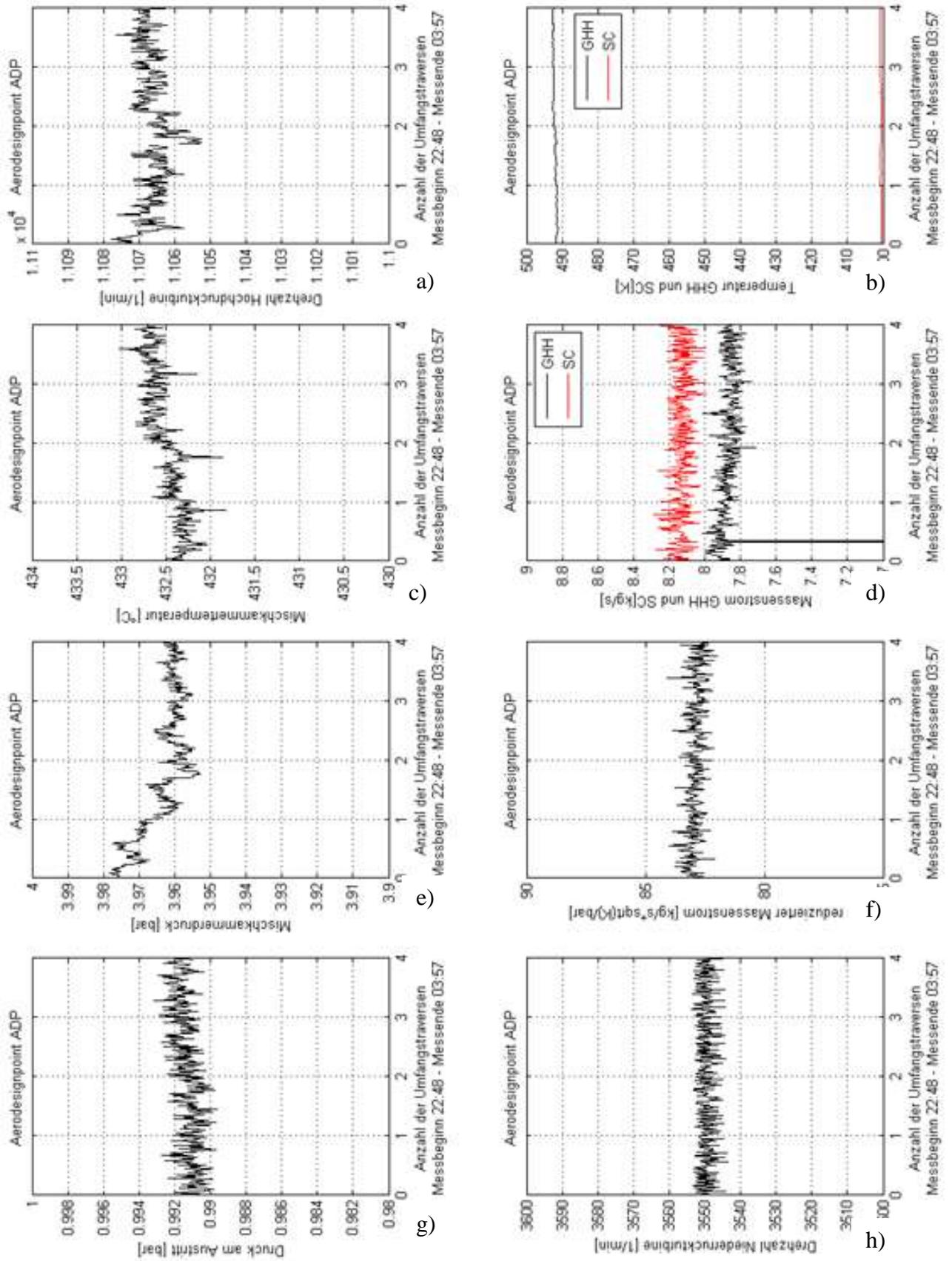


Abb. 42: Betriebspunkt über die Zeit der Umfangmessungen (ADP)

## 4.2 Offdesign 1

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Messung im Betriebspunkt Offdesign 1 erläutert werden, da diese von den Ergebnissen der Messung im ADP teilweise abweichen. Die Ergebnisse des ADP sind den Ergebnissen in Offdesign 2 sehr ähnlich, deswegen wird auf diese nicht eingegangen. Entsprechende werden im Anhang der Vollständigkeit halber angeführt.

### 4.2.1 360-Grad-Messung in der Eintrittsebene:

Im Falle der Messung des Offdesign 1 werden fünf Messungen durchgeführt.

Es ist zu erkennen, dass in Abb. 43 die Totaldrücke der verschiedenen Messungen sehr unterschiedlich aussehen. Die einzigen vergleichbaren Totaldruckmessungen sind hier Messung 2 und 3. Diese weisen auch denselben Mischkammerdruck auf. Es muss jedoch angemerkt werden, dass es sich hier um eine Totaldruckdifferenz vom kleinsten bis zum größten gemessenen Wert von lediglich 10,8 mbar handelt (über alle fünf Messungen). Dabei hat Messung 1 die größten Druckdifferenzen mit 7,3 mbar. Zudem kann gesagt werden, dass sich bei allen Messungen die Bereiche höheren Drucks an denselben Stellen in Umfangsrichtung befinden.

Bei den korrigierten Totaldruckmessungen in Ebene A (Abb. 44) sind die Bereiche höheren und niedrigen Druckes um einiges besser zu erkennen als in den nicht-korrigierten Darstellungen. Diese Bereiche sind Abbildungen von Stützrippen, welche das Turbinenloslager tragen. Bei genauer Betrachtung können alle acht Stützrippen, konstant über den Umfang verteilt erkannt werden. Diese sind übrigens auch in der ADP-Messung zu erkennen. Die Bereiche des niedrigsten Drucks befinden sich im ADP und in den Offdesignmessungen immer an denselben Stellen in Umfangsrichtung.

Bei den Totaltemperaturmessungen in Ebene A der Offdesign 1 Messung (Abb. 45) bilden sich auch warme und kalte Bereiche aus. Diese befinden sich jedoch an anderen Stellen in Umfangsrichtung im Vergleich zum Aerodesignpunkt. Also muss es zu einer anderen Durchmischung der beiden Massenströme kommen.

Die korrigierten Totaltemperaturmessungen (in Abb. 46) zeigen keinen signifikanten Unterschied zu den nicht-korrigierten Abbildungen.

Die Ergebnisse der Ebene F werden im nächsten Kapitel separat beschrieben.

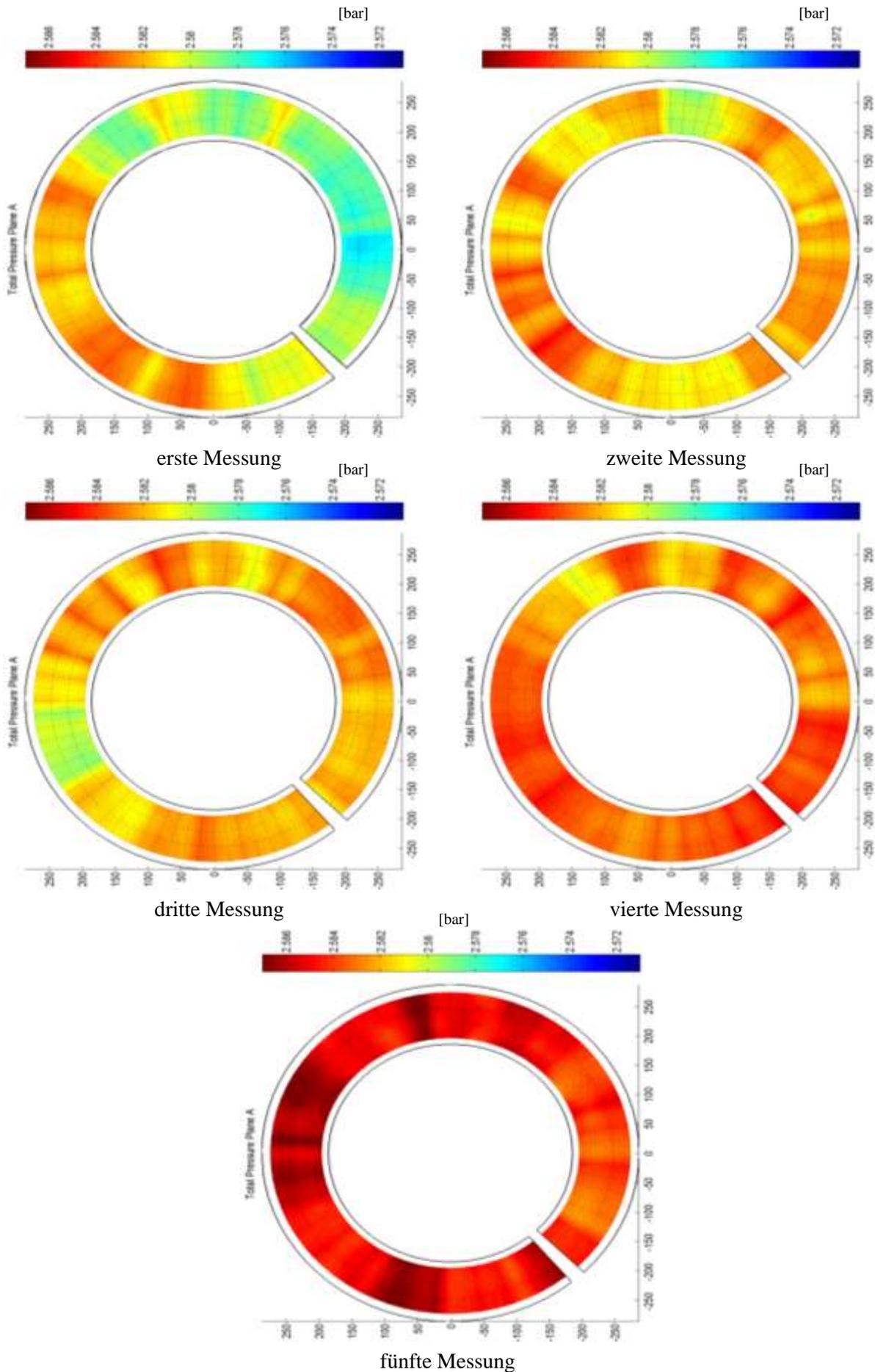


Abb. 43: Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF1)

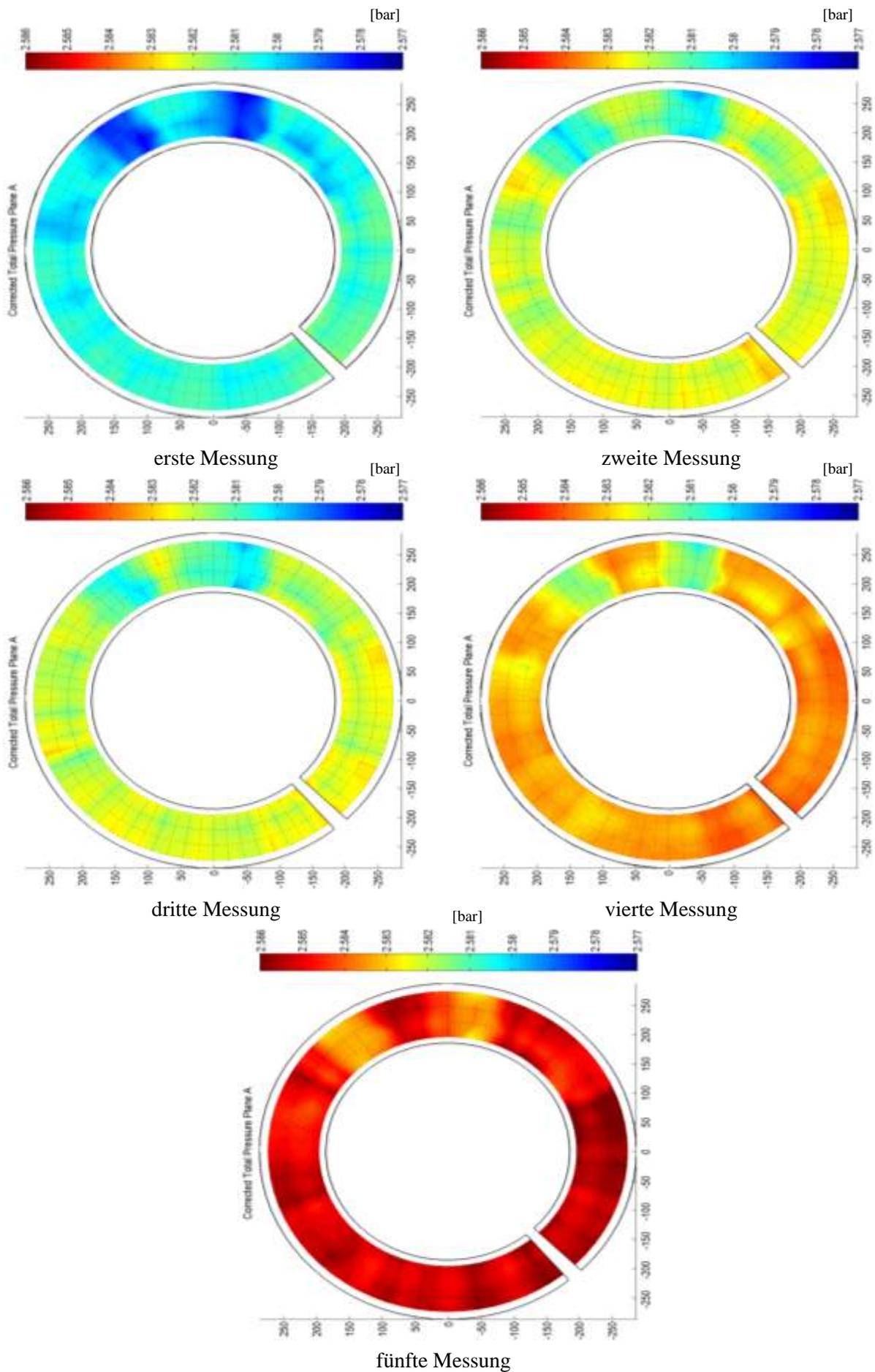


Abb. 44: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 1)

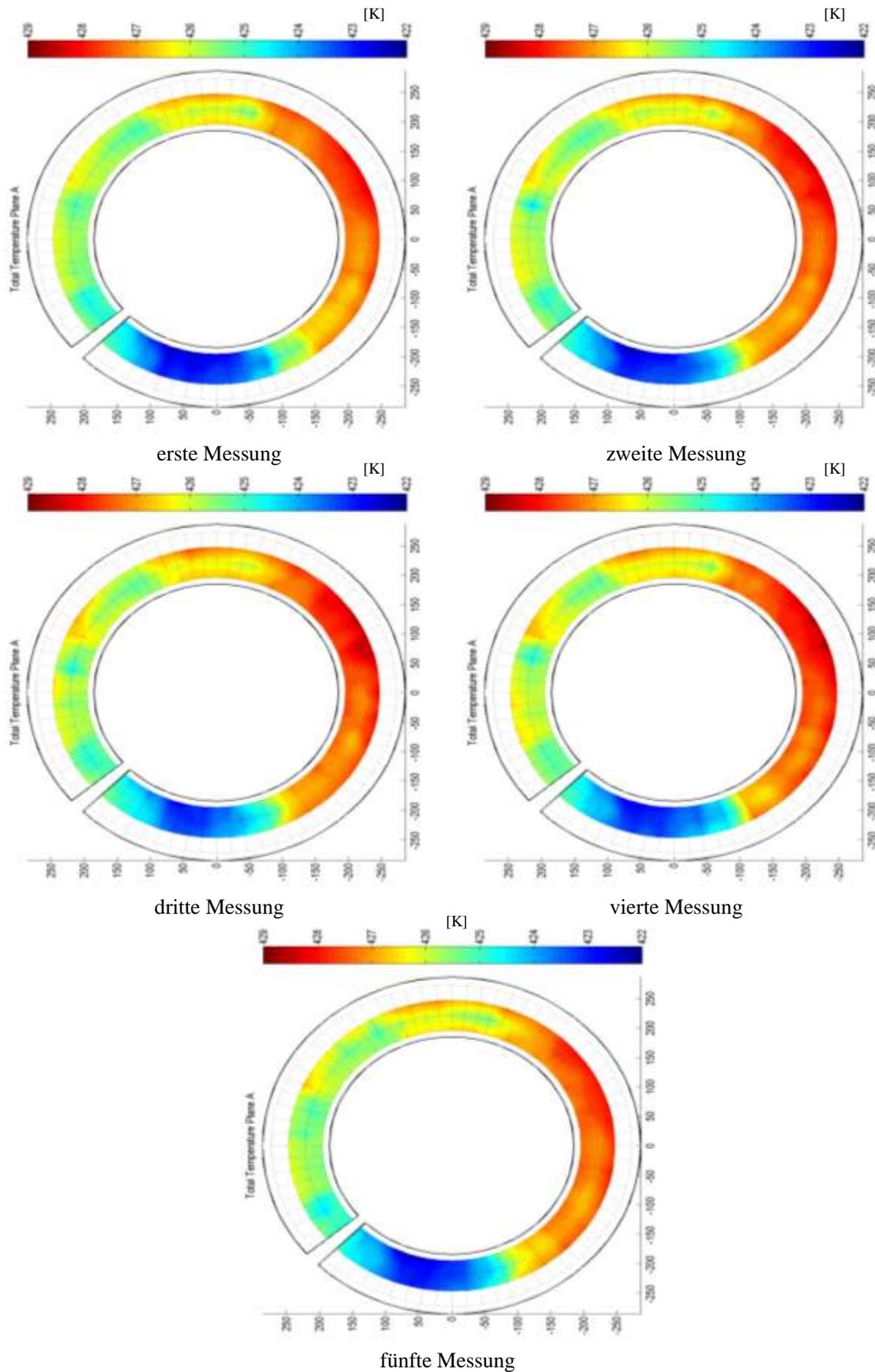


Abb. 45: Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (OFF 1)

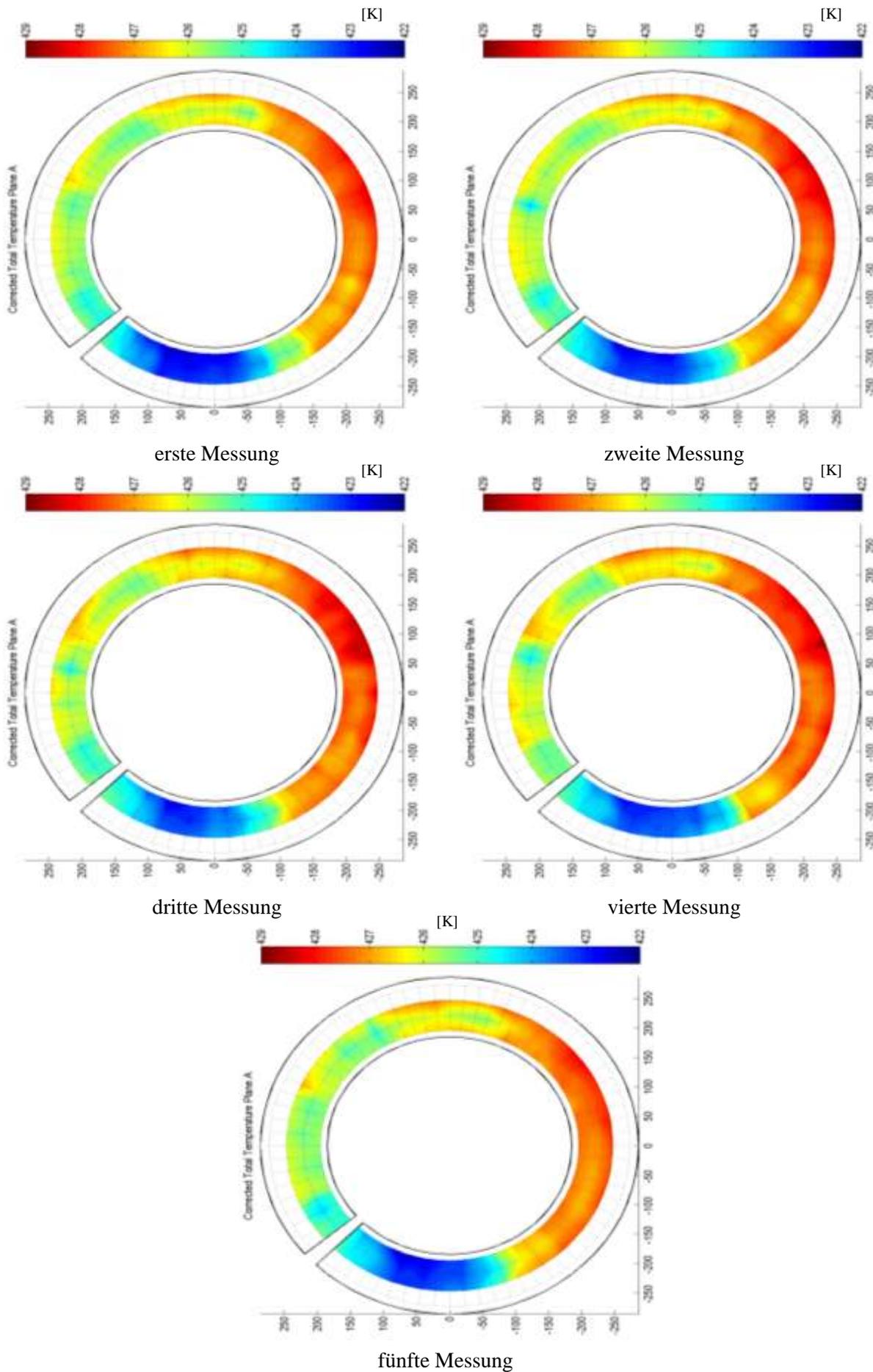


Abb. 46: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (OFF 1)

#### **4.2.2 360-Grad-Messung in der Austrittsebene:**

Auch im Offdesign 1 werden Totaldruck und -temperatur in Ebene F gemessen.

Bei der Totaltemperaturmessung können wieder die warmen und kalten Bereiche beobachtet werden. Diese befinden sich bei allen fünf Messungen immer an denselben Stellen in Umfangsrichtung. Im Vergleich zum ADP befinden sich diese Bereiche jedoch an einer anderen Position über den Umfang gesehen. Die Totaldruckmessung in Ebene F zeigt Abb. 49. In Abb. 50 sind die korrigierten Ergebnisse dargestellt. Auch hier sind keine signifikanten Veränderungen zu den nicht-korrigierten Messwerten zu erkennen.

Die Totaldruckmessung (Abb. 47) über den Umfang ist auch hier als zufriedenstellend anzunehmen. Durch die Korrektur kann auch hier der Einfluss der Betriebspunktschwankungen vernachlässigt werden. In Ebene F hat dieser Einfluss aber keine signifikante Wirkung auf das Ergebnis.

Die korrigierten 360°-Umfangsmessungen des Totaldrucks in der Austrittsebene sind in Abb. 48 zu sehen.

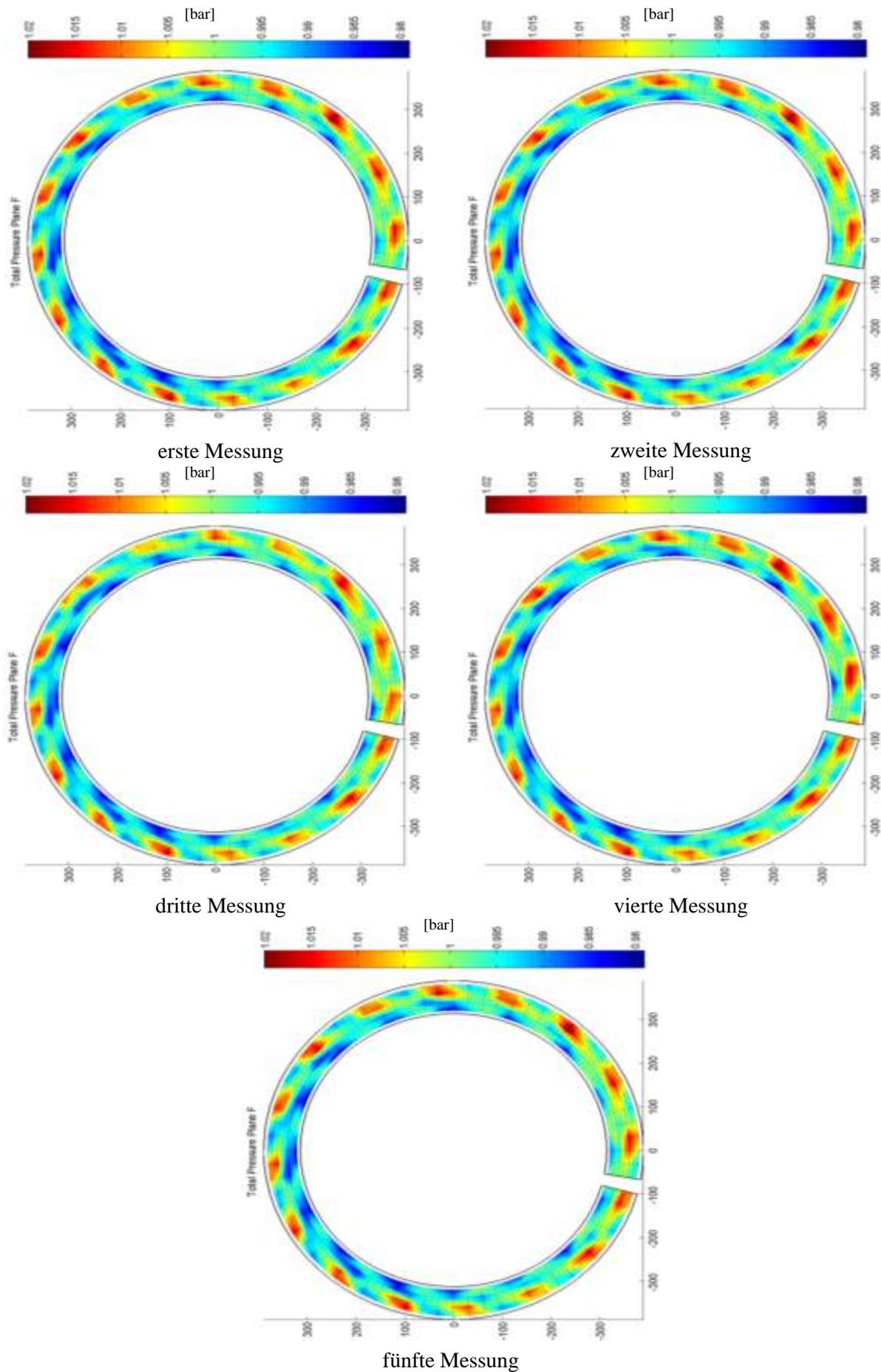


Abb. 47: Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene F (OFF 1)

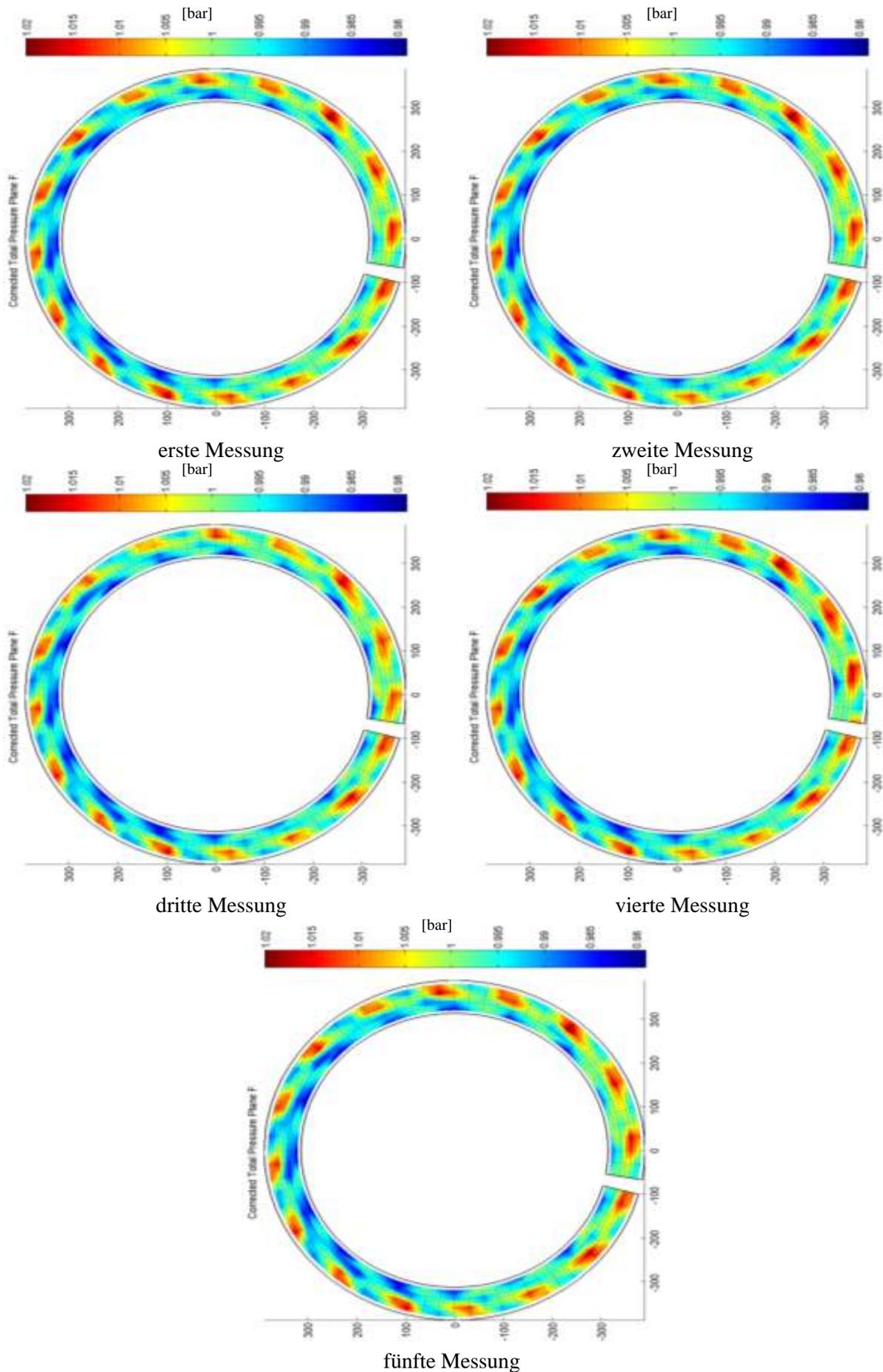


Abb. 48: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 1)

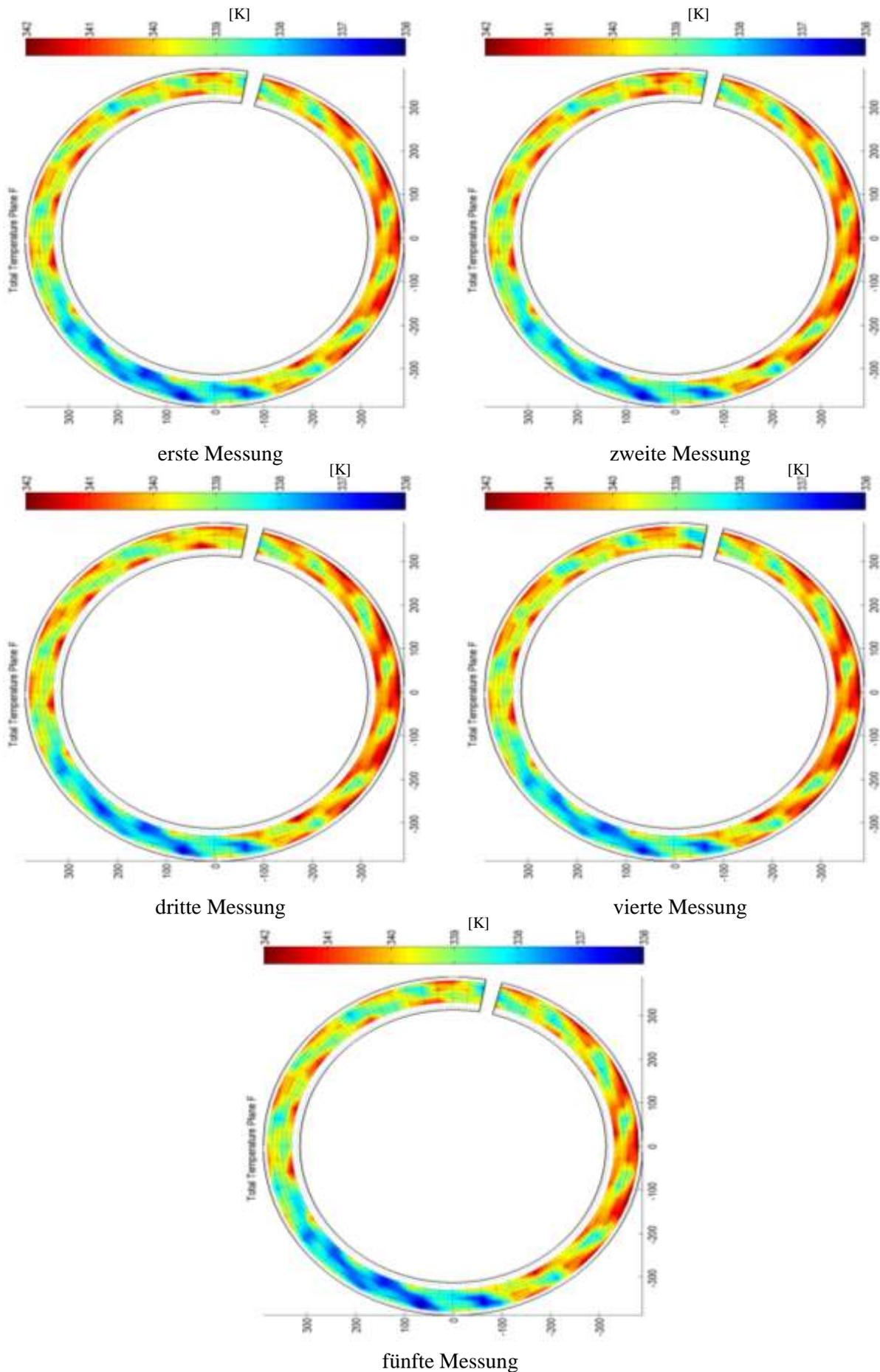


Abb. 49: Totaltemperatur der Umfangmessungen in Ebene F (OFF 1)

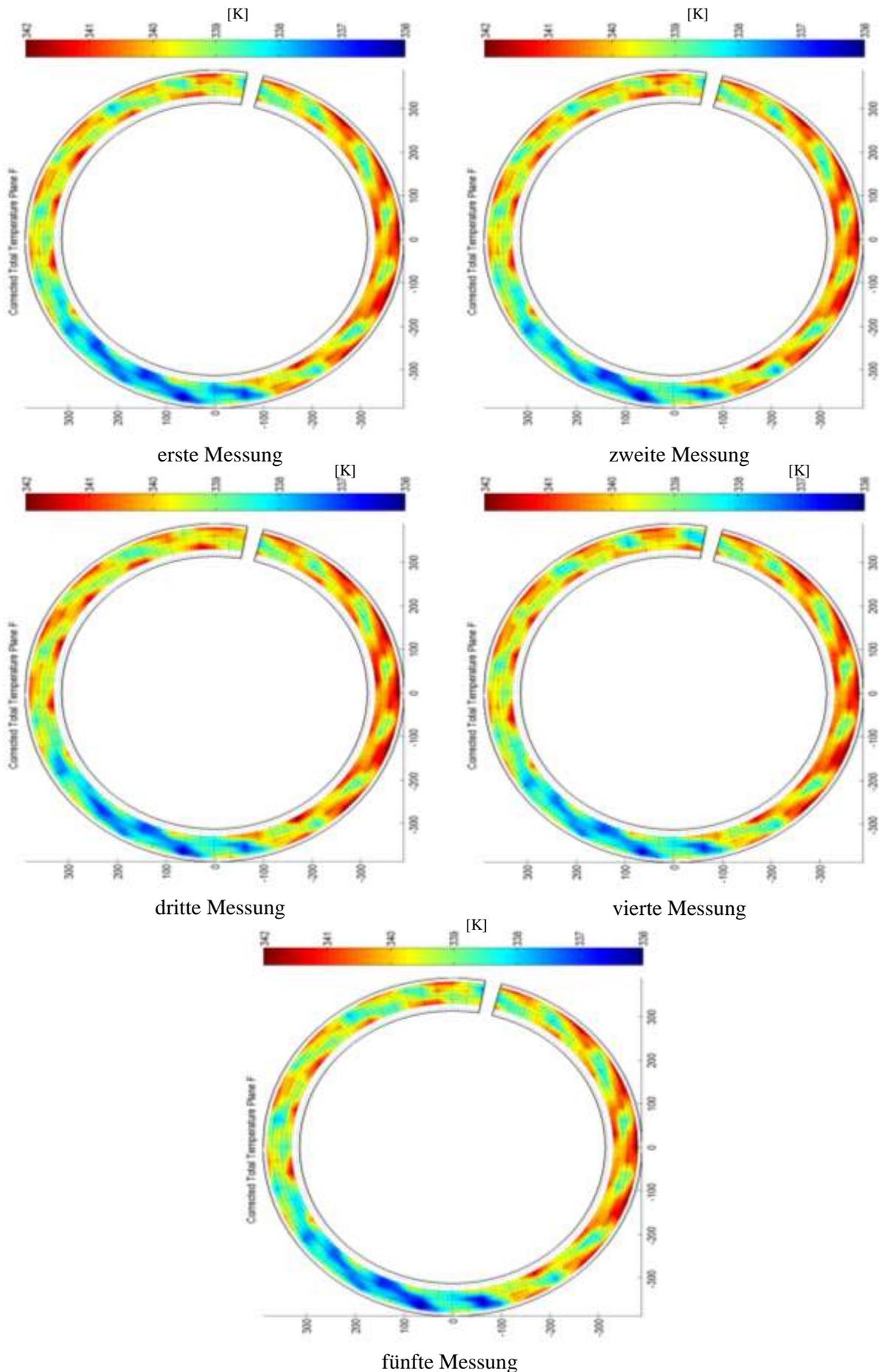


Abb. 50: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene F (OFF 1)

### 4.2.3 Oberflächenmessung an der Mischkammer:

Aufgrund niedriger Temperaturen während der Offdesign 1 Messung kann die Temperaturdifferenz der Mischkammeroberfläche auf  $6,6^{\circ}\text{C}$  reduziert werden. Abb. 51 zeigt ein Bild der Thermographiekamera aufgenommen aus Position 1 lt. Abb. 26. In der dahinter folgenden Darstellung wird Kameraposition 2 verwendet. Aus der Sicht von oben ist eine Temperaturdifferenz von  $4,7^{\circ}\text{C}$  zu erkennen. Die hier verwendete Position kann in Abb. 40 angesehen werden, was ein Foto der oberen Hälfte der Mischkammer darstellt.

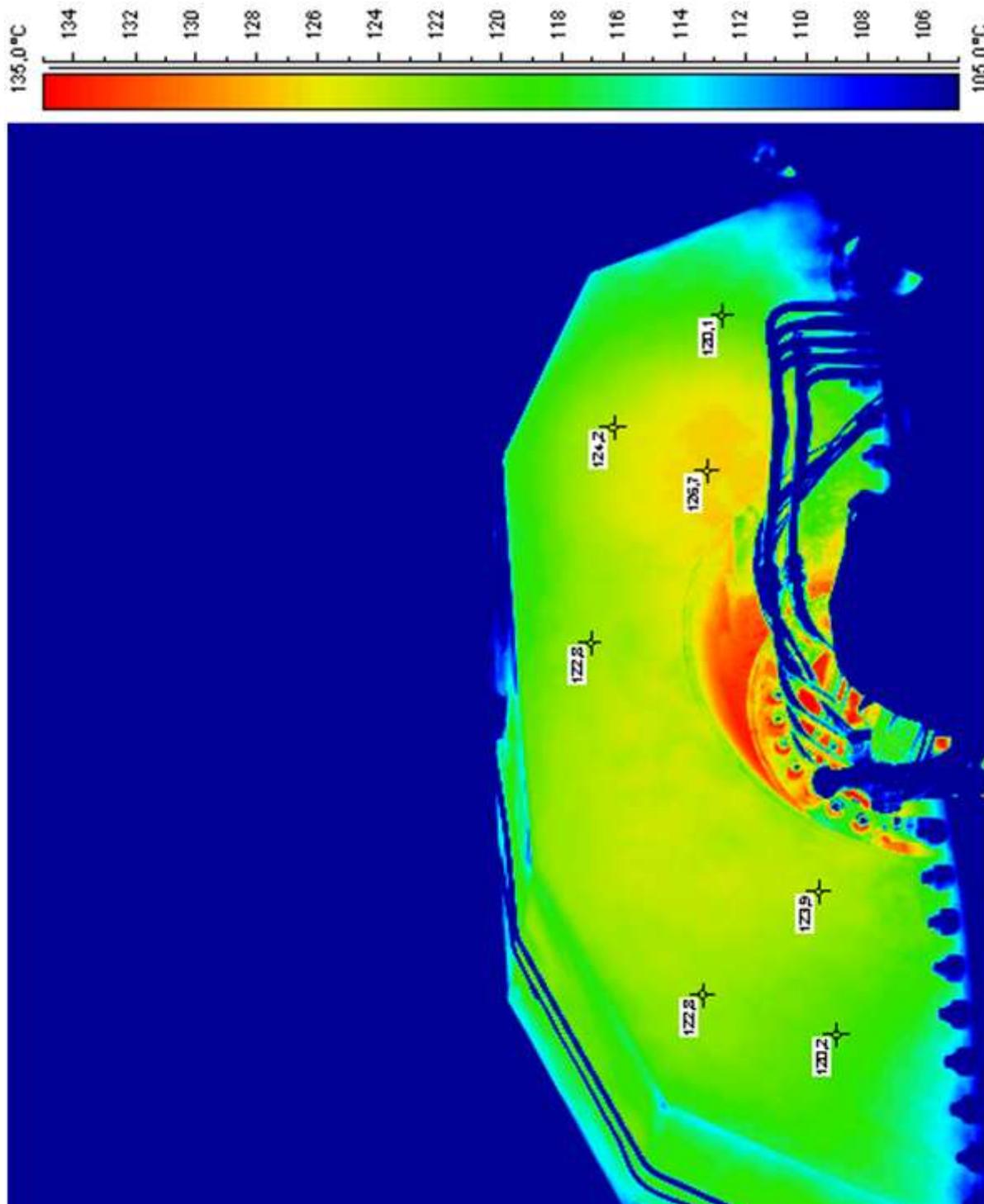


Abb. 51: Messung der Mischkammertemperatur am Beginn der Umfangsmessung (OFF 1)

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Temperaturverteilung der Mischkammeroberfläche aus der Sicht von oben.

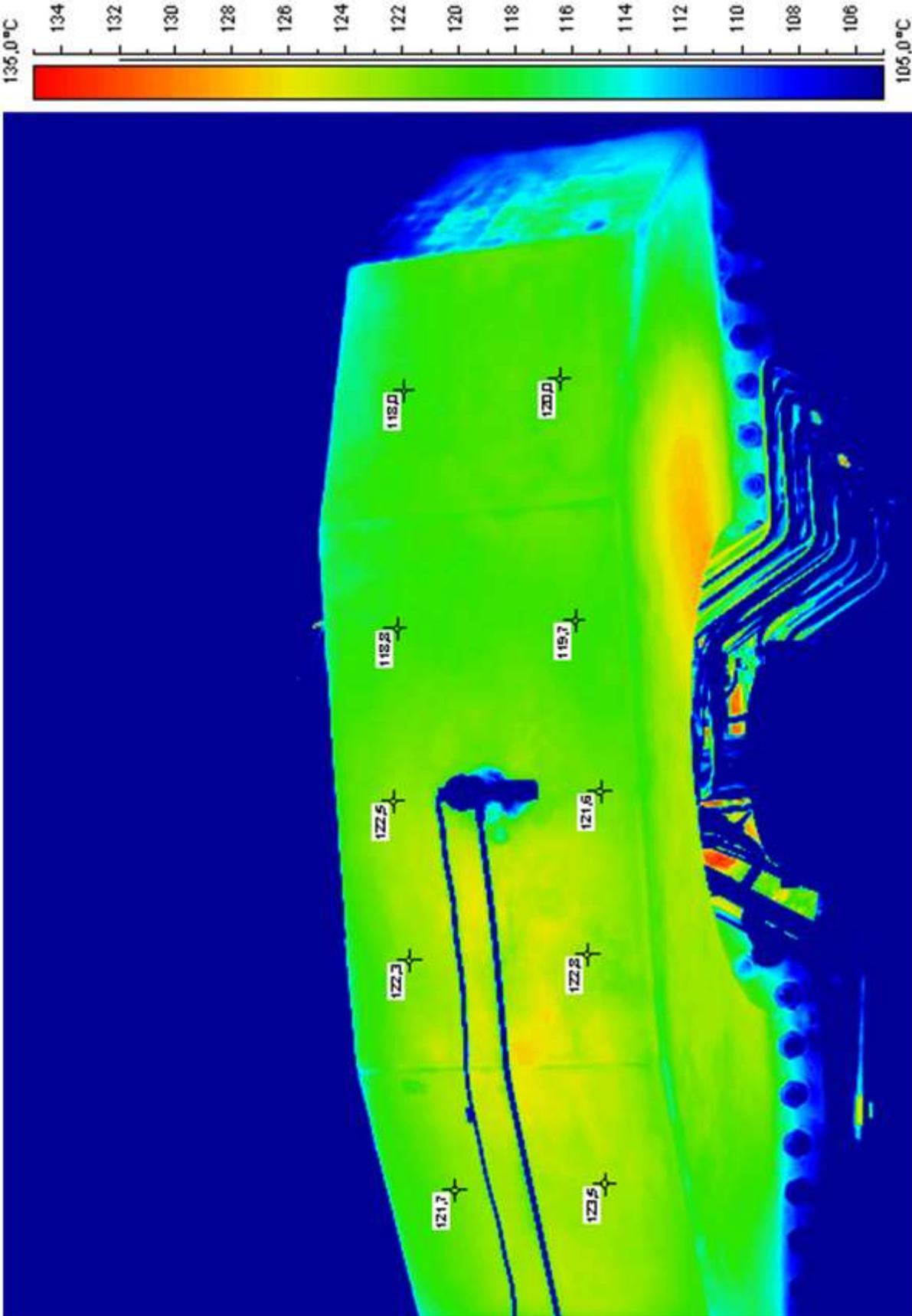


Abb. 52: Messung der Mischkammertemperatur am Ende der Umfangsmessung (OFF1)

#### 4.2.4 Betriebspunkt über die Zeit der Messung:

In Abb. 53 wird der Betriebspunkt über die Dauer aller fünf Messungen veranschaulicht. Die Diagramme zur Darstellung der Betriebspunkte über die gesamte Versuchsfahrt sind genau gleich aufgebaut, wie bei den Messungen im ADP. Somit wird nur auf die Unterschiede zu der vorherigen Messung eingegangen.

In Diagramm a) ist zu erkennen, dass die HDT auf eine geringere Drehzahl eingestellt wird. Aufgrund dessen weist der Bremsverdichter zusätzlich eine geringere Drehzahl auf. Es wird weniger Leistung an ihn abgegeben. Deshalb kann er weniger Luft verdichten und der Massenstrom des GHH (d)) ist geringer. Zusätzlich ist die Temperatur des GHH (b)) niedriger als im ADP. Über die gesamte Versuchsfahrt steigt diese aber gleich wie im ADP an.

Um eine geringere HDT-Leistung zu erzielen, wurde die Verdichteranlage auf einer niedrigeren Stufe betrieben. So ist der geförderte Massenstrom (d)) im OFF 1 kleiner als der des GHH, wobei die Temperatur ((b)) um etwa 40 K höher ist als im Aero-Design-Point.

Die Temperaturdifferenz der beiden Massenströme beträgt bei dieser Messung ca. 20 K (Vergleich ADP: 90 K). Dies ist der Grund, dass die Temperaturdifferenz im Zwei-Wellen-Rig niedriger ist als im ADP.

Abb. 53 c) zeigt die Mischkammertemperatur über die Messzeit. Die Temperatur ist fast konstant und weist nur geringe Schwankungen auf.

Der Mischkammerdruck (e)) steigt jedoch über alle fünf Messungen. Das hat zur Folge, dass die Totaldruckmessungen in der Eintrittsebene unterschiedliche Werte aufweisen.

Der reduzierte Massenstrom (f)) nimmt in der Mitte der Messung etwas ab, dennoch sind keine wesentlichen Veränderungen über die Zeit zu erkennen.

In Abb. 53 g) kann der Austrittsdruck aus dem Zwei-Wellen-Rig erkannt werden, welcher über die Versuchsfahrt minimal abnimmt.

Die NDT wird, wie auch im OFF 1, auf 3550 Upm eingestellt (h)) und zeigt keinen wesentlichen Unterschied zur oben beschriebenen Messung im ADP.

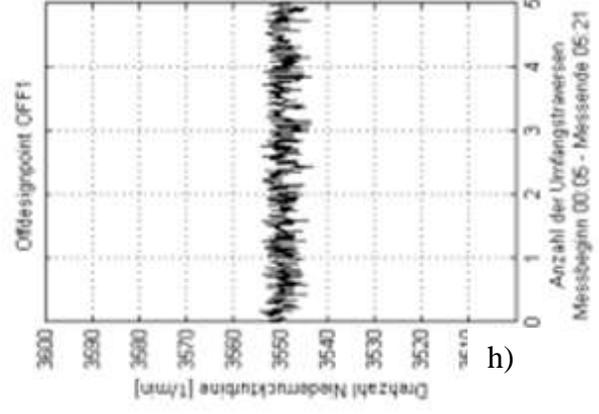
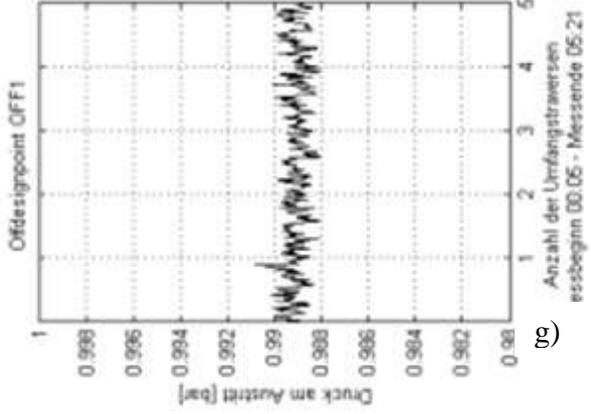
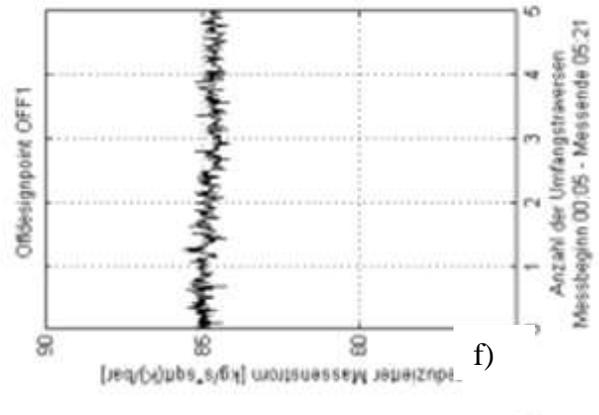
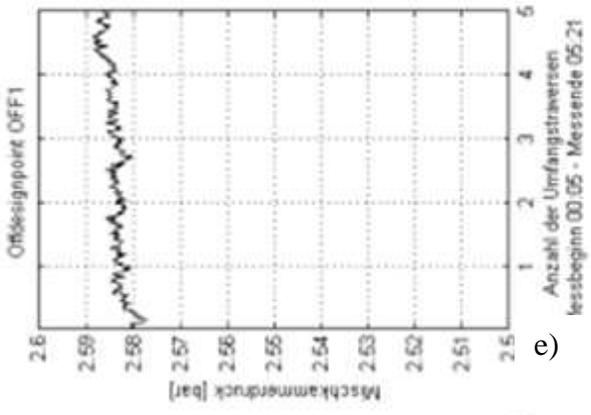
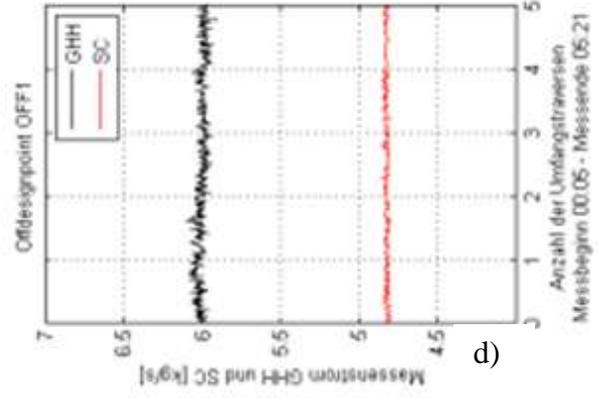
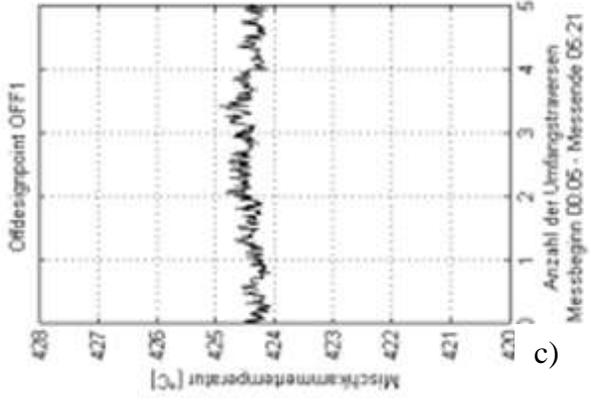
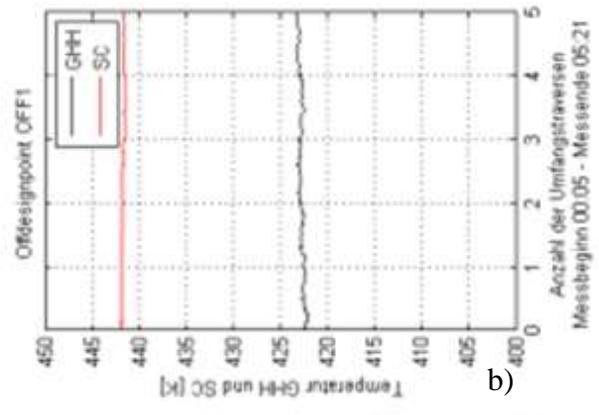
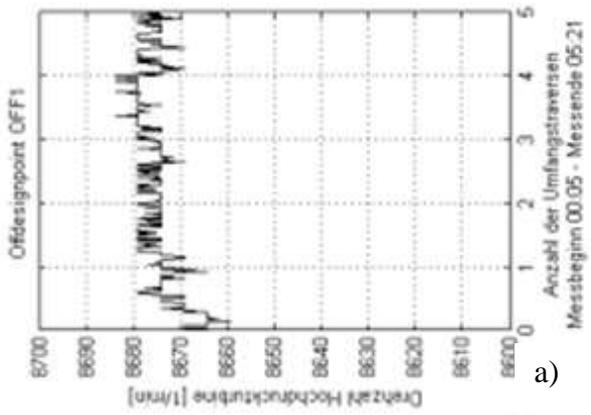


Abb. 53: Betriebspunkt über die Zeit der Umfangsmessungen



### Konzeptidee 1:

Konzeptidee 1 wird in Abb. 55 dargestellt. Dabei wird der vom GHH angesaugte Massenstrom in den Keller geführt. Dort werden beide Massenströme durch einen Mischer vermischt. Dieser muss jedoch im Vorstadium noch ausgelegt werden. Danach werden beide Massenströme zusammen so weit wie möglich im Keller umhergeführt. Somit kann eine möglichst gute Durchmischung erreicht werden. Zudem wird eine Massenstrommessung des Gesamtmassenstromes bei dieser Gelegenheit eingebaut. Anschließend wird der gesamte Massenstrom in die Mischkammer geleitet, um das Zwei-Wellen-Rig anzuströmen.

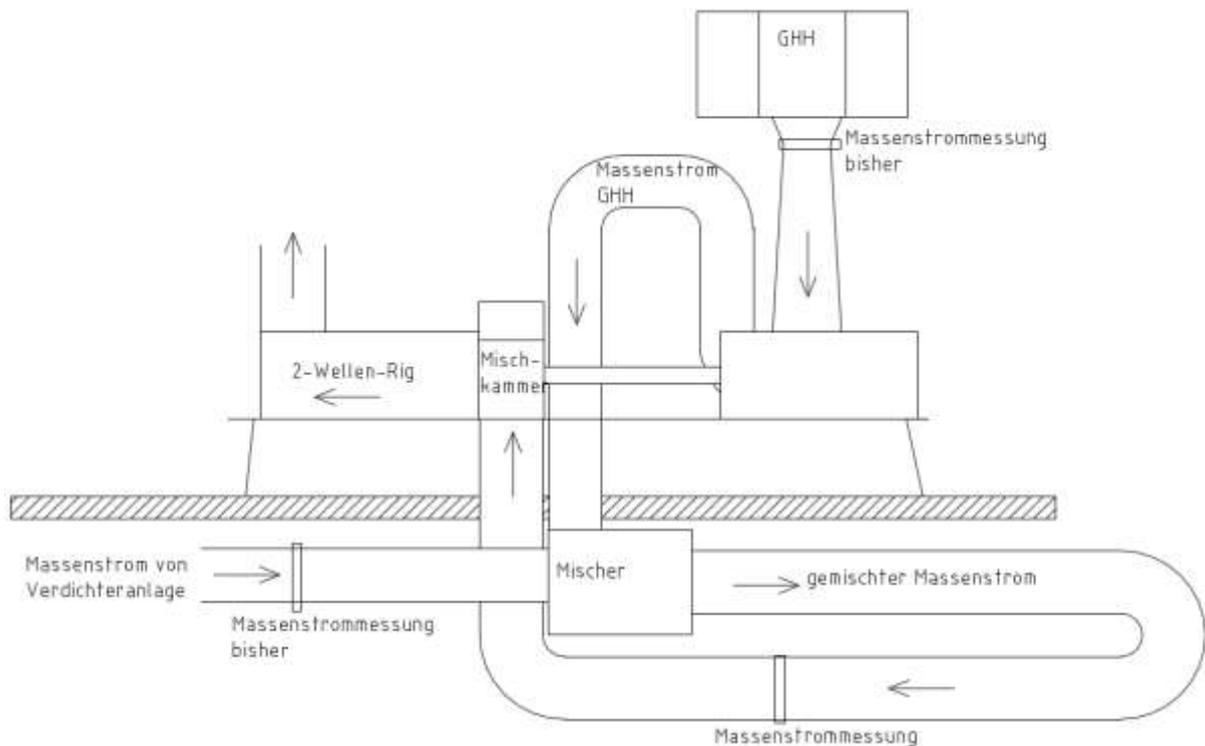
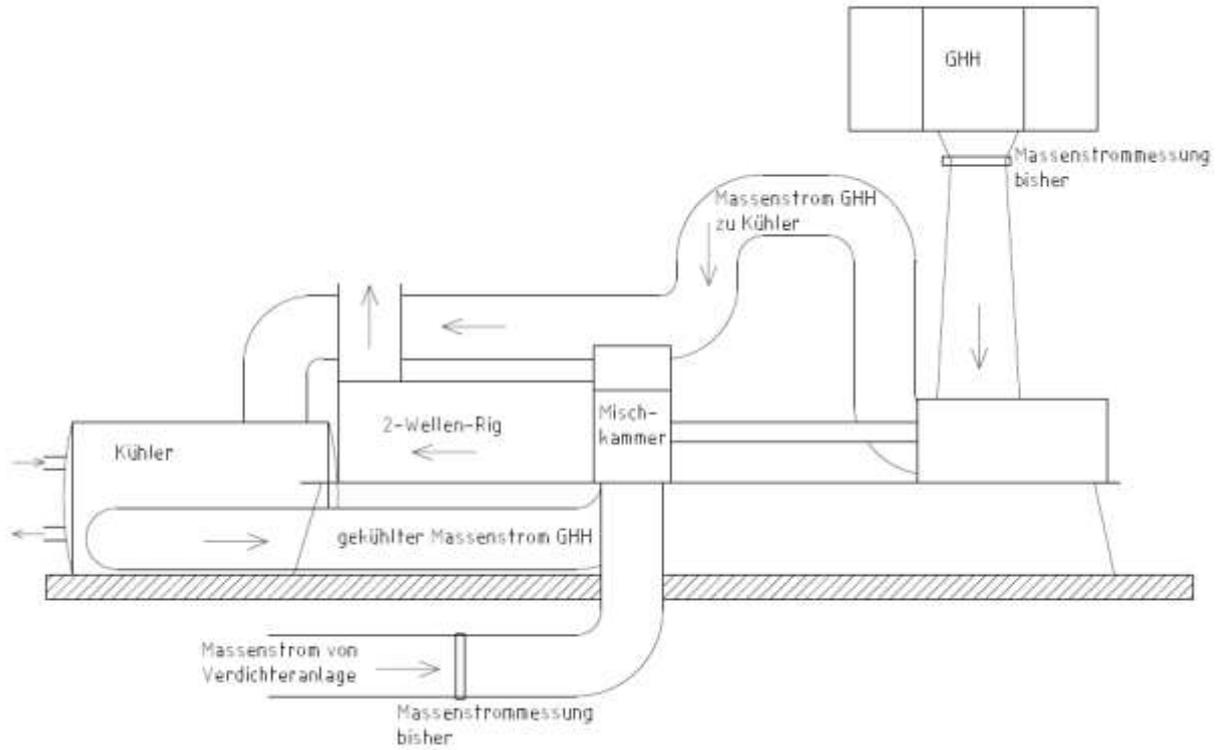


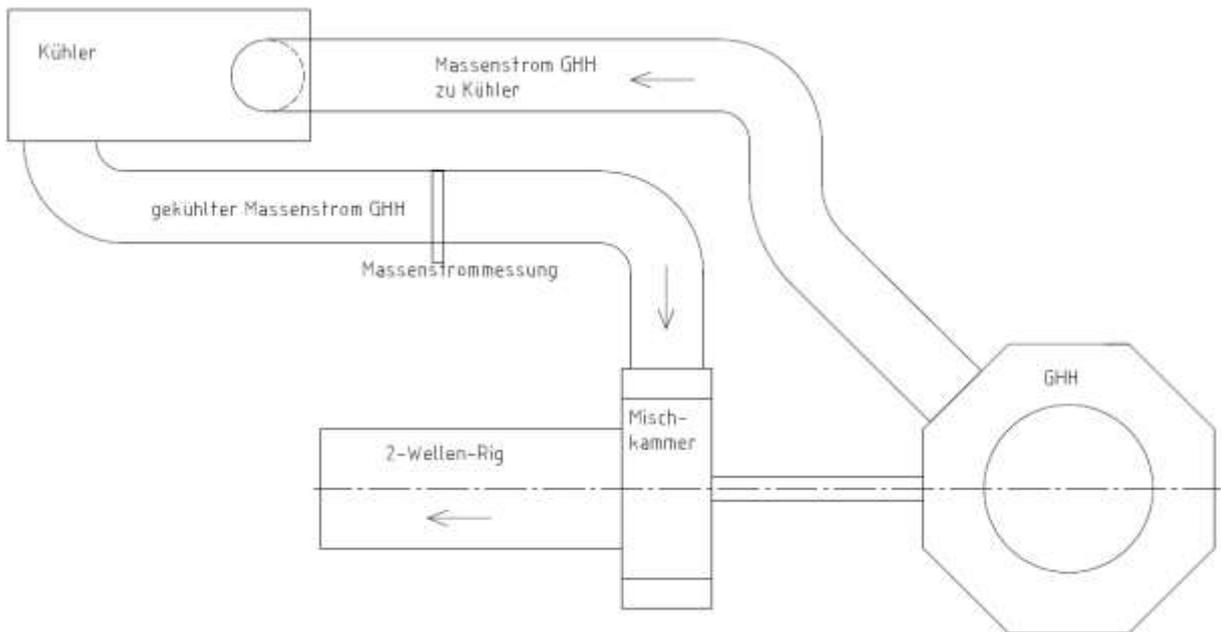
Abb. 55: Mischung beider Massenströme im Keller

### Konzeptidee 2:

Der vom GHH kommende Massenstrom wird in der Halle durch einen Kühler auf die Temperatur des vom Keller kommenden Verdichtermassenstroms abgekühlt. Anschließend wird der gekühlte Massenstrom der Mischkammer an derselben Stelle wie vor dem Umbau zugeführt. Zwischen Kühler und Eingang in die Mischkammer kann die neue Massenstrommessung eingebaut werden. Der von der Verdichteranlage kommende Massenstrom kann unverändert weitergenutzt werden. Die beiden folgenden schematischen Darstellungen (Abb. 56 und Abb. 57) zeigen die beschriebene Konzeptidee 2.



**Abb. 56: Kühlung des GHH-Massenstroms (seitliche Darstellung)**



**Abb. 57: Kühlung des GHH-Massenstroms (von oben)**

### Gegenüberstellung der beiden Konzeptideen:

In der folgenden Tabelle werden die beiden Konzeptideen hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte verglichen. Eine Neudefinition der Betriebspunkte muss in Betracht gezogen werden, wenn durch die Umbaumaßnahmen die Druckverluste so groß werden, dass der derzeit vorgegebene Eintrittsdruck nicht mehr erreicht werden kann. Der Zeitraum währenddessen der Prüfstand umgebaut wird und somit keine Forschung betrieben werden kann, wird als Stillstandszeit bezeichnet. Das Leihpersonal muss deshalb eingestellt werden, weil derartige Umbaumaßnahmen zu keinem wissenschaftlichen Beitrag führen und somit nicht von Dissertanten durchgeführt werden können.

**Tab. 6: Gegenüberstellung der beiden Konzeptideen**

	Konzeptidee 1	Konzeptidee 2
Kosten für die Umbaumaßnahmen	-	+
Eingriff in die Gebäudestruktur	-	+
Zeitbedarf für die Umbaumaßnahmen	-	+
Platzbedarf für die Erweiterungen	+	-
Neudefinition der Betriebspunkte	+	-
Erneuerung der Massenstrommessung des vom Bremsverdichter kommenden Massenstroms	+	+
Stillstandszeit der Anlage	-	+
Leihpersonal	-	+

In Summe ist die Konzeptidee 2, welche eine Kühlung des vom Bremsverdichter kommenden Massenstroms vorsieht, der Konzeptidee 1 vorzuziehen.

## 6 Fazit:

Zur Evaluierung der Zu- und Abströmbedingungen des Zwei-Wellen-Turbinenprüfstands am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik wurden die Totaldruck- und die Totaltemperaturverteilungen über den Umfang in der Eintritts- und Austrittsebene untersucht. Zudem wurde mittels einer Thermografiekamera die Oberflächentemperatur der Mischkammer auf Unregelmäßigkeiten überprüft. Alle Messungen wurden in drei Betriebspunkten durchgeführt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Totaldruckverteilung in beiden untersuchten Ebenen eine zufriedenstellende Homogenität aufweisen.

Aufgrund des kurzen Durchmischungsweges beider Teilmassenströme ergibt sich eine nicht zufriedenstellende Totaltemperaturverteilung über den Umfang der Eintritts- bzw. Austrittsebene. Dies kann in allen drei Betriebspunkten beobachtet werden. Zudem ist zu erkennen, dass die Bereiche höherer und niedrigerer Totaltemperatur, abhängig vom Betriebspunkt, in Umfangsrichtung variieren, jedoch während einer Versuchsfahrt örtlich konstant bleiben. Die Umfangsvariation kann auf die unterschiedlichen Temperaturen der beiden Teilmassenströme zurückgeführt werden, welche ebenfalls betriebspunktabhängig sind.

Bei der Messung der Oberflächentemperatur an der Mischkammer wurde ein Bereich höherer Temperatur ermittelt. Der Temperaturgradient ist jedoch so gering, dass eine Isolation der Mischkammer keinen signifikanten Vorteil ergeben würde.

Zudem wurde festgestellt, dass die Betriebspunktschwankungen über die gesamte Versuchsfahrt durch eine Wartezeit von mindestens vier Stunden zwischen Hochfahrvorgang und Messbeginn minimiert werden kann.

Aufgrund der Totaltemperaturdifferenzen über den Umfang des Zwei-Wellen-Rigs werden zwei Konzeptideen vorgeschlagen. Konzeptidee 1 schlägt vor, den Bremsverdichtermassenstrom in den Keller zu leiten. Dieser kann dort mit dem Verdichtermassenstrom vermischt werden. Konzeptidee 2 kann durch eine Kühlung des Bremsverdichtermassenstroms im Erdgeschoss realisiert werden. Im Zuge des Umbaus kann bei beiden Konzeptideen die Massenstrommessung des vom Bremsverdichter kommenden Massenstroms verbessert werden.

Dabei ist zu sagen, dass Konzeptidee 2 günstiger ist, da ein ähnlicher Kühler am Institut bereits im Einsatz ist. Dies vereinfacht die Auslegung eines neuen Kühlers erheblich. Zudem ist diese Idee bautechnisch einfacher zu realisieren.

## Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: S-förmiger TMTF zur besseren Strömungsführung.....	2
Abb. 2: Zwei-Wellen-Rig (Hubinka)[6].....	3
Abb. 3: Mischung beider Massenströme in der Mischkammer .....	4
Abb. 4: schematische Darstellung eines Pitot-Rohres .....	7
Abb. 5: Winkelcharakteristik von Pitot-Sonden (links, nach Huston) [7] und von Gesamt-/Totaldrucksonden (rechts, nach Chue) [7] .....	7
Abb. 6: schematischer Aufbau von Drucktransmittern (Absolut-, Überdruck-, Differenzdrucktransmitter) [7] .....	9
Abb. 7: Piezoresistive Aufnehmer für die Messung von Differenz- bzw. Absolutdrücken (nach Kistler) [7] .....	9
Abb. 8: Foto der verwendeten PSI-Module .....	10
Abb. 9: schematische Darstellung einer Totaltemperatursonde.....	13
Abb. 10: Aufbau Thermoelement.....	14
Abb. 11: Beispiel der Abweichung der gemessenen von der eingestellten Temperatur und anschließender Korrektur .....	16
Abb. 12: Beispiel der Abweichung der gemessenen von der eingestellten Temperatur und anschließender Korrektur .....	17
Abb. 13: Rake F und Pt100 bei Kalibrierung in Befestigung(links); Kalibrierung desselben Rakes (rechts).....	18
Abb. 14: Temperaturbäume in Ebene C (oben) und Ebene F (unten).....	19
Abb. 15: Strahlenspektrum nach [12] .....	20
Abb. 16: Spezifische Ausstrahlung (links) und Emissionsgrad (rechts) in Abhängigkeit der Wellenlänge eines schwarzen, grauen und realen Körpers nach [12].....	23
Abb. 17: Spektrale Leistung über die Wellenlänge in Abhängigkeit der Temperatur nach [12] .....	23
Abb. 18: schematische Darstellung von Optik und Detektor [10] .....	26
Abb. 19: Schema - Mikrobolometer [11] .....	28
Abb. 20: Anteile, der vom Detektor empfangenen IR-Strahlung bei einer Objekttemperatur von 30 °C, einem Emissionsgrad des Objekts von 0,7, einer Umgebungstemperatur(auch Kamera, Teleobjektiv und Atmosphäre) von 20 °C. [12] .....	29
Abb. 21: Hohlraumstrahler zur Kalibrierung einer Thermographie-Kamera nach [12] .....	30
Abb. 22: Hohlraumstrahler der Firma mawi-therm zur Kalibrierung von Infrarotkameras nach [13] .....	31
Abb. 23: Beispiel der Auswirkung der Korrektur .....	33
Abb. 24: Schnittbild des Zwei-Wellen-Rigs .....	34
Abb. 25: Positionen der Rakes; korrigierte Temperaturen und Drücke.....	35
Abb. 26: Skizze der Kamerapositionen.....	35
Abb. 27: Halterung der Thermographiekamera am Hallenkran montiert .....	36

Abb. 28: Beispiel Totaldruckmessung in Ebene A .....	39
Abb. 29: Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene A (ADP).....	40
Abb. 30: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene A (ADP).....	41
Abb. 31: Beispiel Totaltemperaturmessung in Ebene A .....	44
Abb. 32: Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (ADP).....	45
Abb. 33: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (ADP).....	46
Abb. 34: Beispiel Totaldruckmessung in Ebene F .....	49
Abb. 35: Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene F (ADP).....	50
Abb. 36: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (ADP).....	51
Abb. 37: Beispiel Totaltemperaturmessung in Ebene F .....	53
Abb. 38: Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (ADP).....	54
Abb. 39: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (ADP).....	55
Abb. 40: Foto der oberen Hälfte der Mischkammer .....	58
Abb. 41: Messung der Mischkammertemperatur während der Umfangsmessungen (ADP) ...	59
Abb. 42: Betriebspunkt über die Zeit der Umfangsmessungen (ADP).....	62
Abb. 43: Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF1).....	64
Abb. 44: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 1).....	65
Abb. 45: Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (OFF 1) .....	66
Abb. 46: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene A (OFF 1).....	67
Abb. 47: Totaldruck der Umfangsmessung in Ebene F (OFF 1) .....	69
Abb. 48: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 1) .....	70
Abb. 49: Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 1) .....	71
Abb. 50: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessung in Ebene F (OFF 1) .....	72
Abb. 51: Messung der Mischkammertemperatur am Beginn der Umfangsmessung (OFF 1). 73	
Abb. 52: Messung der Mischkammertemperatur am Ende der Umfangsmessung (OFF1) .....	74
Abb. 53: Betriebspunkt über die Zeit der Umfangsmessungen.....	76
Abb. 54: Zwei-Wellen-Rig bisher .....	77
Abb. 55: Mischung beider Massenströme im Keller.....	78
Abb. 56: Kühlung des GHH-Massenstroms (seitliche Darstellung) .....	79
Abb. 57: Kühlung des GHH-Massenstroms (von oben) .....	79
Abb. 58: Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2).....	86
Abb. 59: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2).....	87
Abb. 60: Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2).....	88
Abb. 61: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2).....	89
Abb. 62: Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2).....	90
Abb. 63: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2) .....	91
Abb. 64: Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2) .....	92
Abb. 65: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2) .....	93
Abb. 66: Messung der Mischkammertemperatur in Position 1 (OFF 2).....	94
Abb. 67: Messung der Mischkammertemperatur in Position 2 (OFF 2).....	95
Abb. 68: Messung der Mischkammertemperatur in Position 3 (OFF 2).....	96

Abb. 69: Messung der Mischkammertemperatur in Position 4 (OFF 2).....	97
Abb. 70: Betriebspunkt über die Zeit der Umfangsmessung (OFF 2) .....	98

## **Tabellenverzeichnis:**

Tab. 1: zur Kalibrierung verwendete Komponenten .....	15
Tab. 2: Ergebnis der Kalibrierung des Temperaturbaumes in Ebene C .....	16
Tab. 3: Ergebnis der Kalibrierung des Temperaturbaumes in Ebene F .....	17
Tab. 4: Auszug: Emissionsgrad verschiedener Werkstoffe [10] .....	24
Tab. 5: Betriebspunkte, welche zur Messung eingestellt werden .....	36
Tab. 6: Gegenüberstellung der beiden Konzeptideen .....	80

## Literaturverzeichnis:

- |      |   |                                     |      |
|------|---|-------------------------------------|------|
| [1]  | <a href="http://www.cerina.org/de/co2-2010">http://www.cerina.org/de/co2-2010</a>   |                                     | 2012 |
| [2]  | <a href="http://www.europa.eu">http://www.europa.eu</a>   |                                     | 2012 |
| [3]  | <a href="http://www.newac.org">http://www.newac.org</a>   |                                     | 2012 |
| [4]  | <a href="http://www.wikipedia.org">http://www.wikipedia.org</a>   |                                     | 2012 |
| [5]  | <i>Experimentelle Untersuchung des Einflusses von Wirbelgeneratoren auf ablösende Diffusorströmung</i>  | <b>Santner C.</b>                   | 2008 |
| [6]  | <i>Design and operation of a two spool high pressure test turbine facility</i>  | <b>Hubinka et al</b>                | 2010 |
| [7]  | <i>Strömungsmesstechnik</i>   | <b>Nitsche, Brunn</b>               | 2006 |
| [8]  | <a href="http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/13/pc/sp_ektroskopie/theorie/images/spekber.gif">http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/13/pc/sp_ektroskopie/theorie/images/spekber.gif</a> |                                     | 2012 |
| [9]  | <i>Skriptum „Höhere Strömungslehre“</i>   | <b>Steiner</b>                      | 2010 |
| [10] | <i>Infrarotmesstechnik Grundlagen</i>   | <b>Messfeld; nbn<br/>ELEKTRONIK</b> |      |
| [11] | <i>Bildverarbeitung und optische Meßtechnik in der industriellen Praxis</i>   | <b>Breuckmann</b>                   | 1993 |
| [12] | <i>Skriptum „Energie- und Umwelttechnisches Mess- und Versuchswesen –Teil: Optische Messtechnik, Lasermesstechnik“</i>  | <b>Woisetschläger</b>               | 2010 |
| [13] | <a href="http://www.mawi-therm.com/produkte/vi---kalibratoren/index.html">http://www.mawi-therm.com/produkte/vi---kalibratoren/index.html</a>   |                                     | 2012 |

# ANHANG:

## I Offdesign 2:

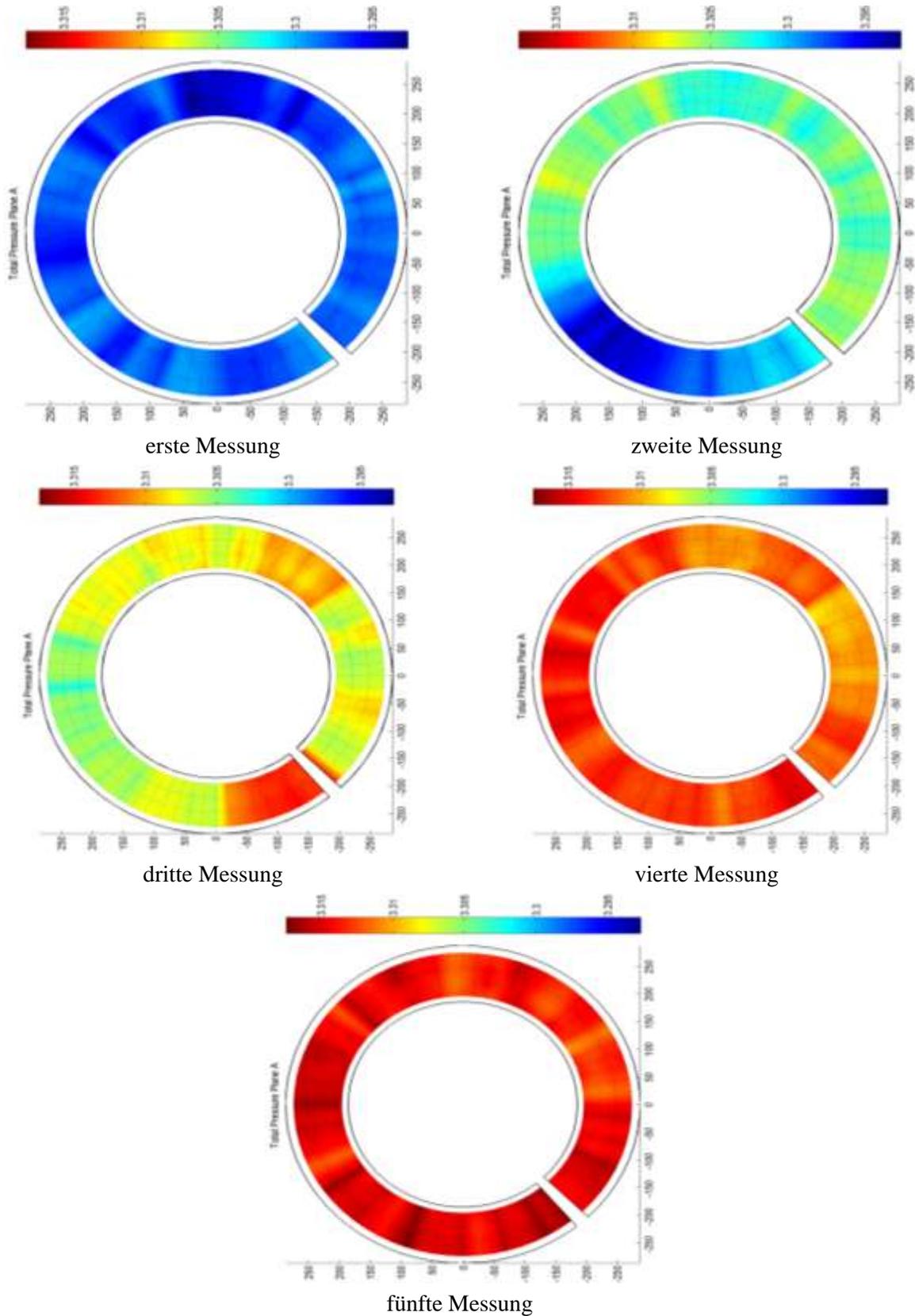


Abb. 58: Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2)

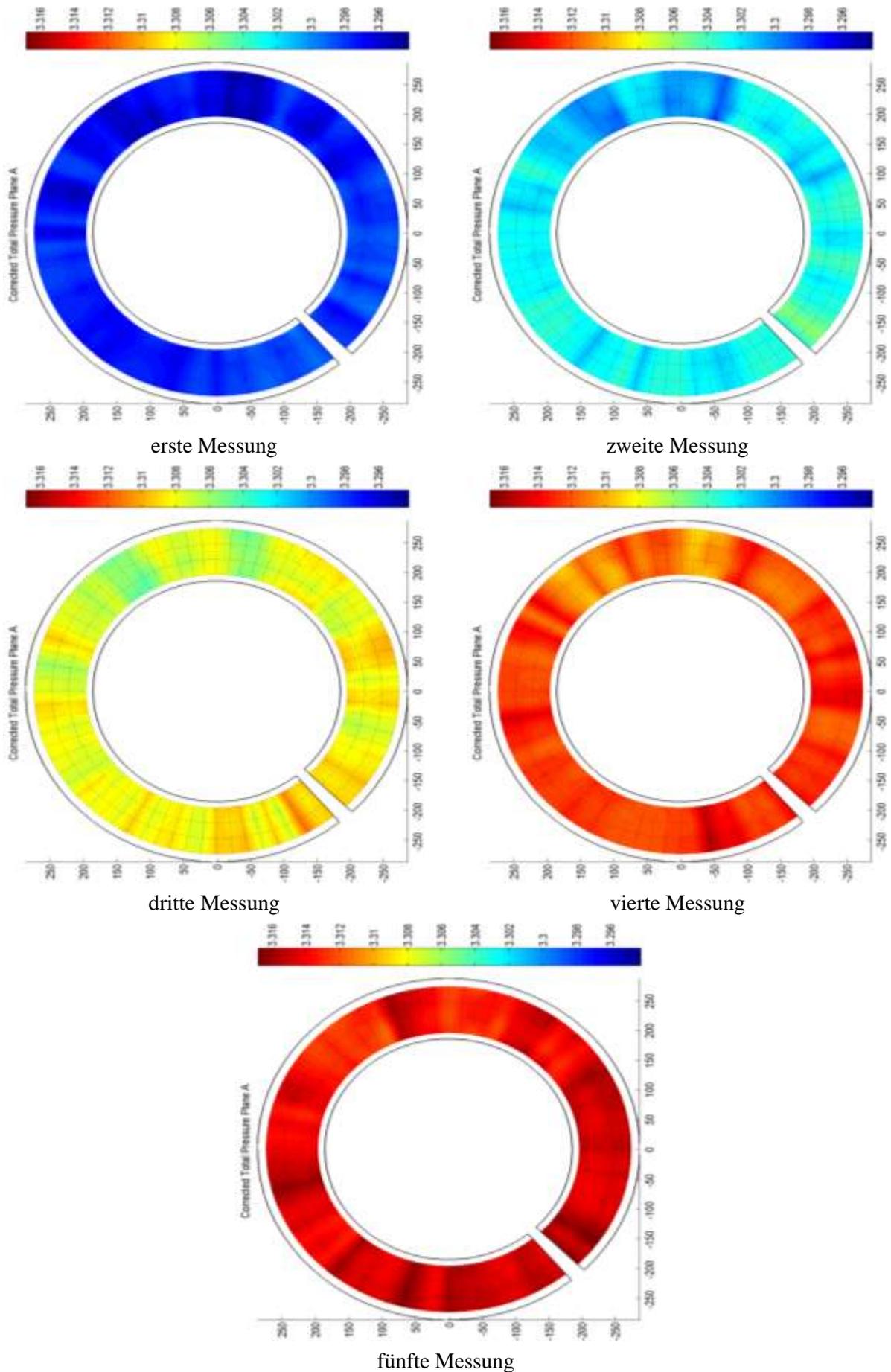
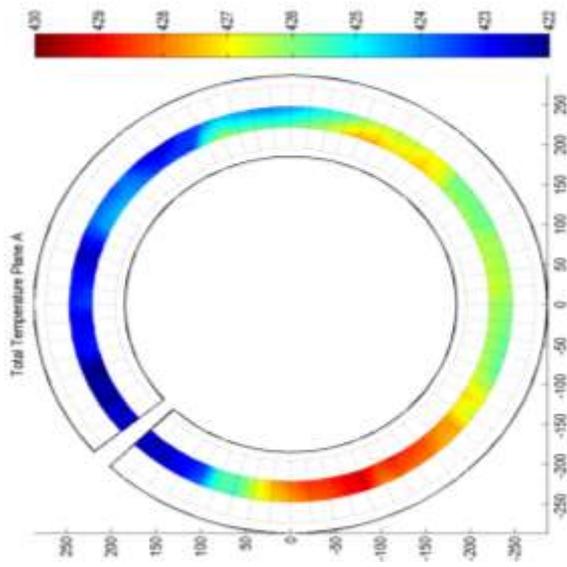
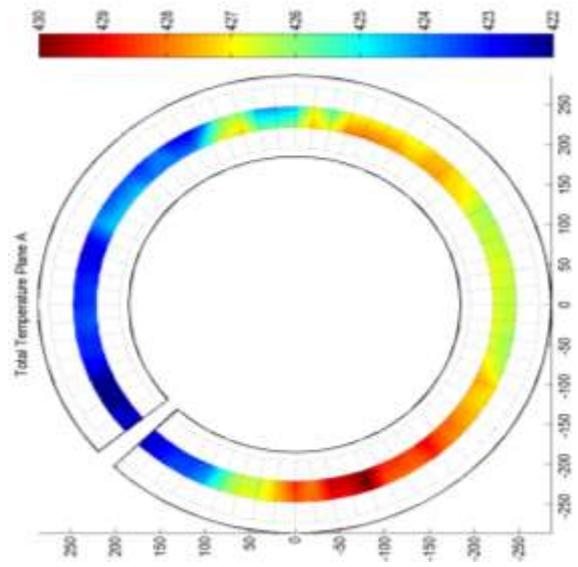


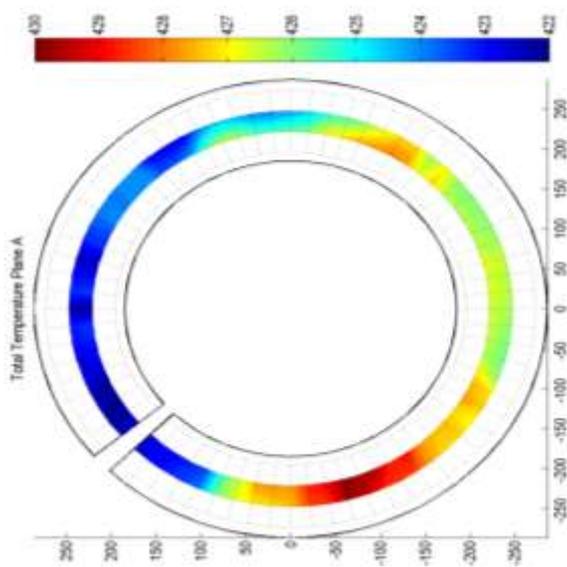
Abb. 59: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2)



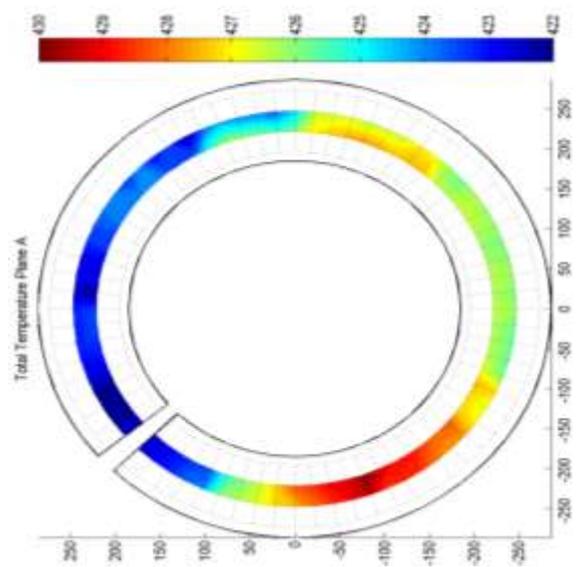
erste Messung



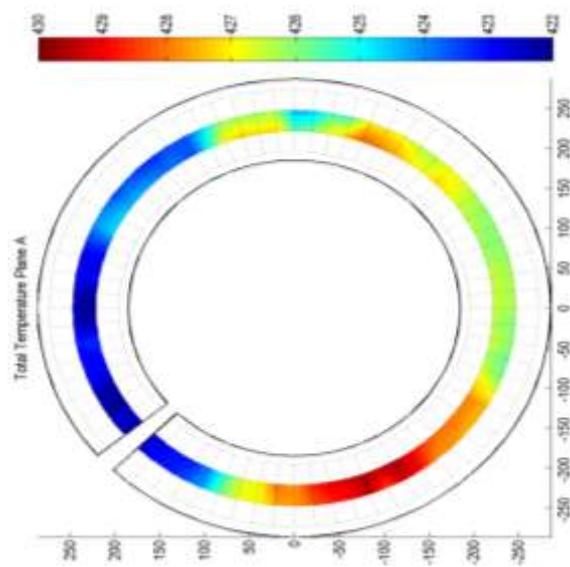
zweite Messung



dritte Messung

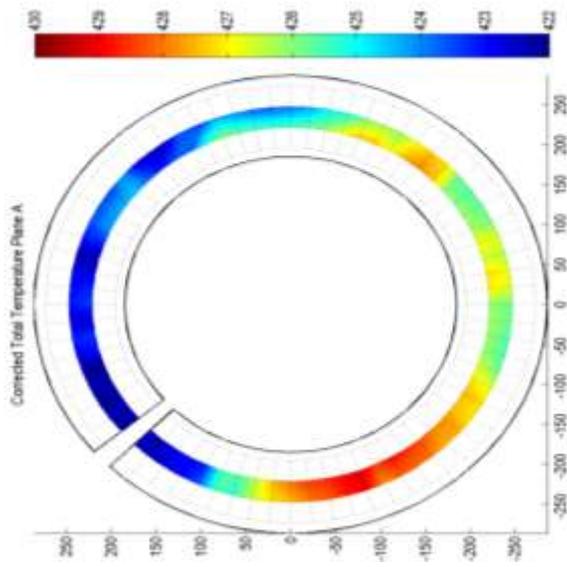


vierte Messung

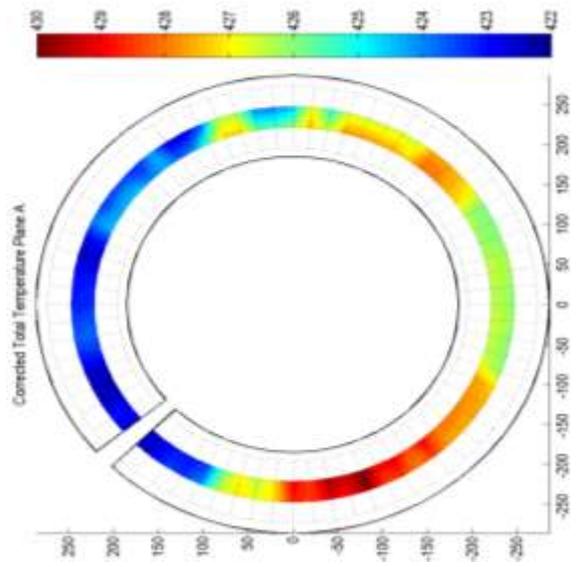


fünfte Messung

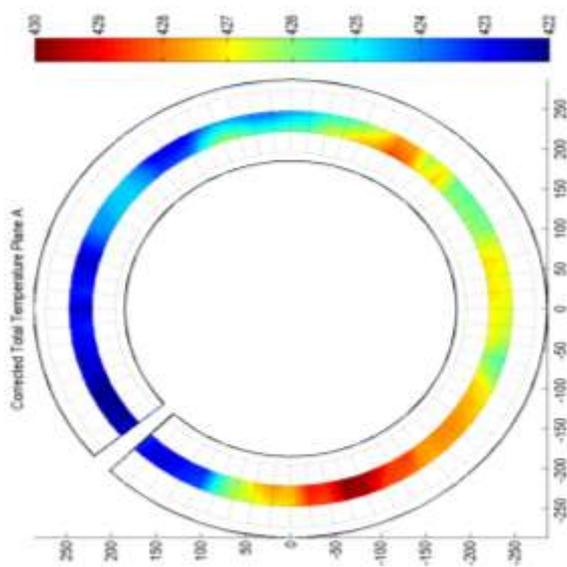
Abb. 60: Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2)



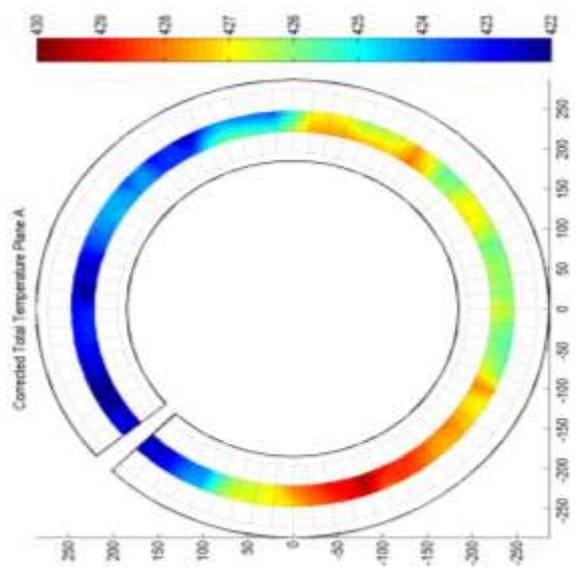
erste Messung



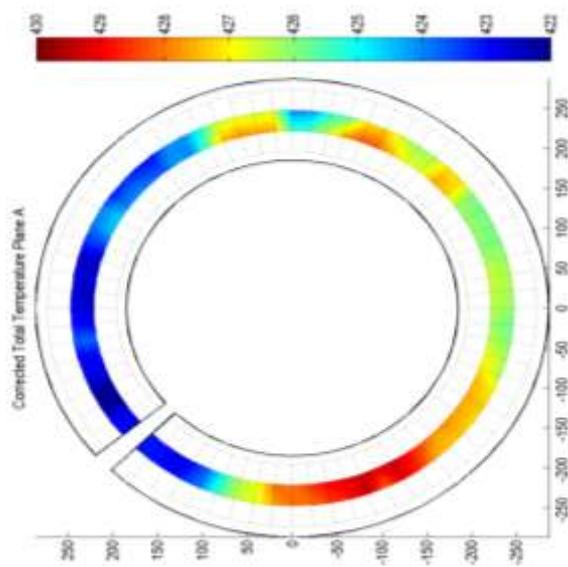
zweite Messung



dritte Messung

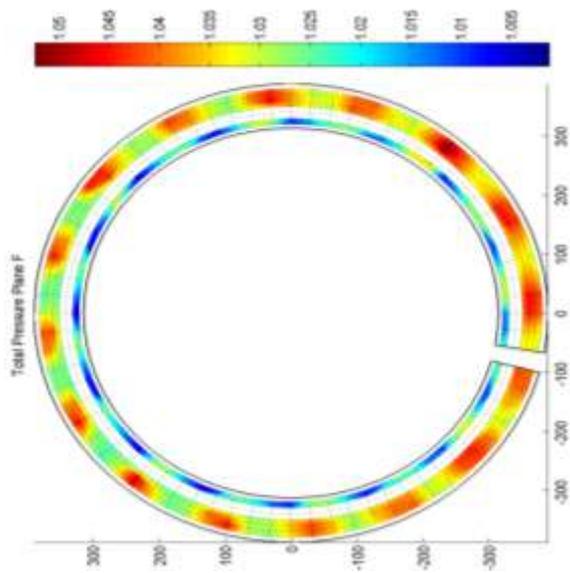


vierte Messung

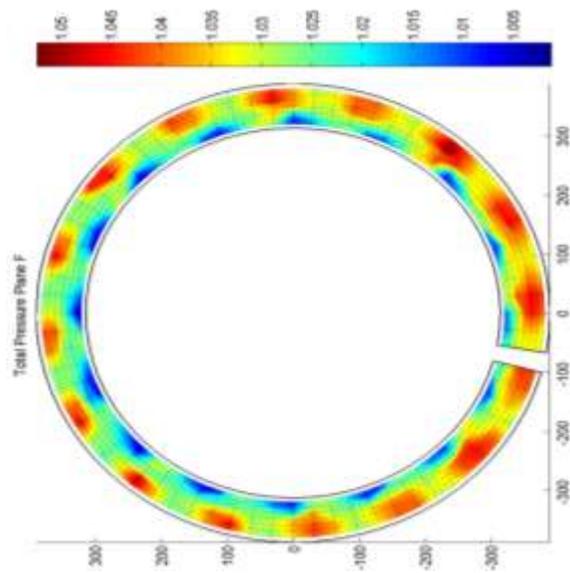


fünfte Messung

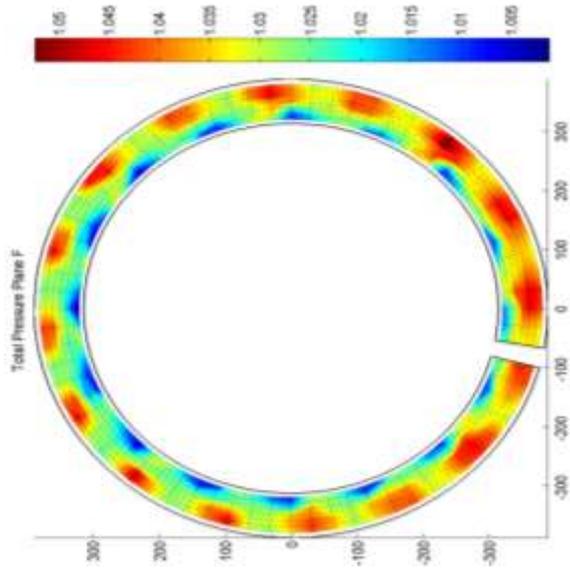
Abb. 61: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene A (OFF 2)



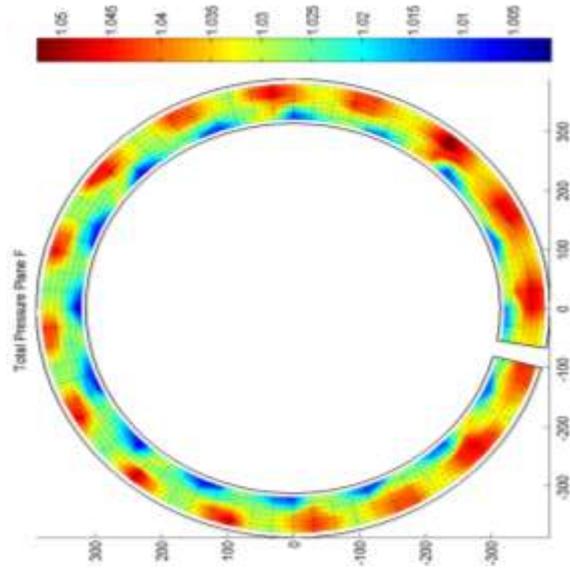
erste Messung



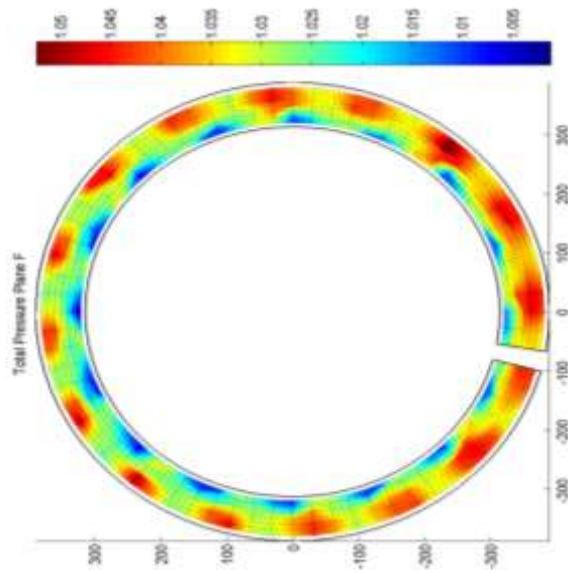
zweite Messung



dritte Messung

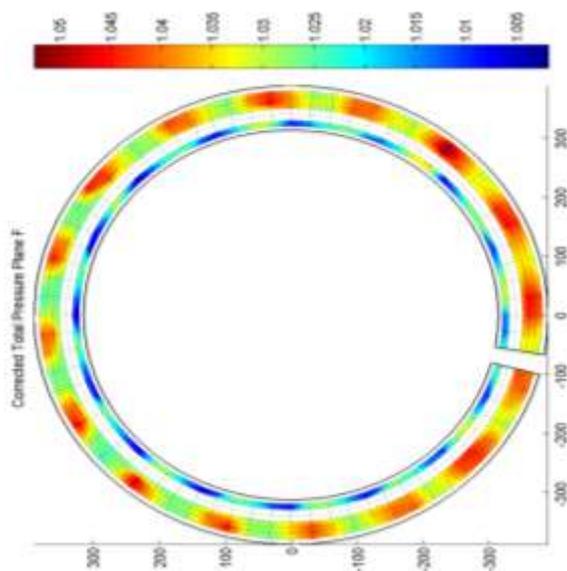


vierte Messung

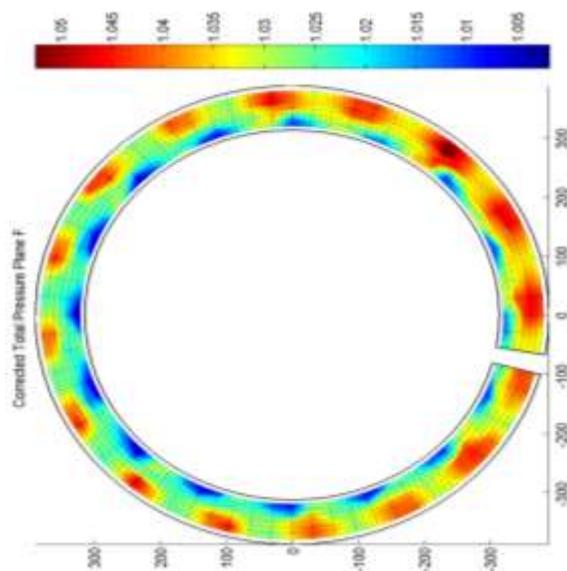


fünfte Messung

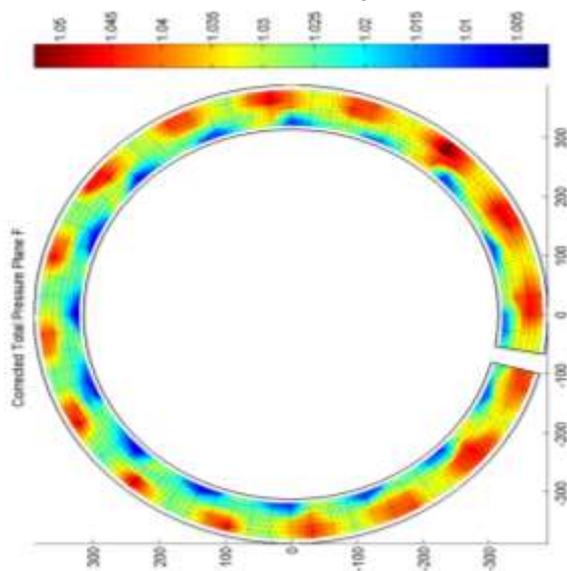
Abb. 62: Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2)



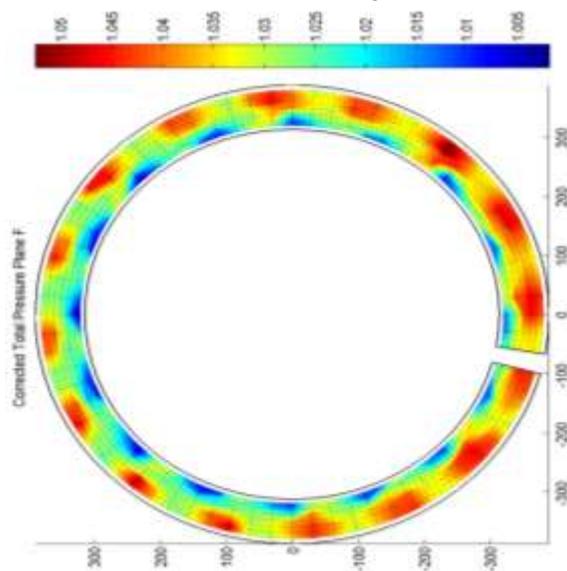
erste Messung



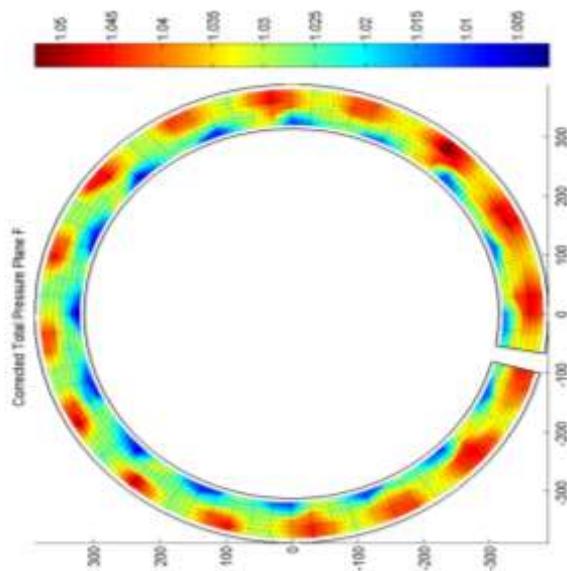
zweite Messung



dritte Messung

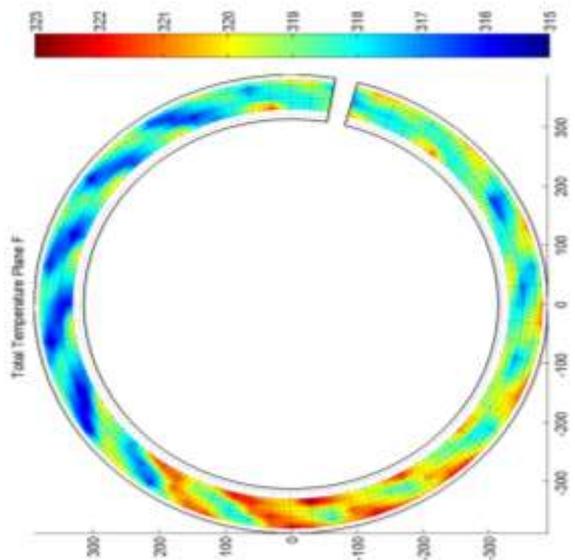


vierte Messung

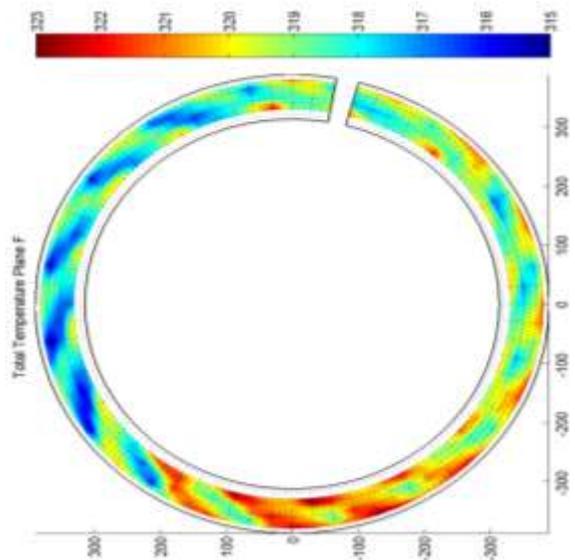


fünfte Messung

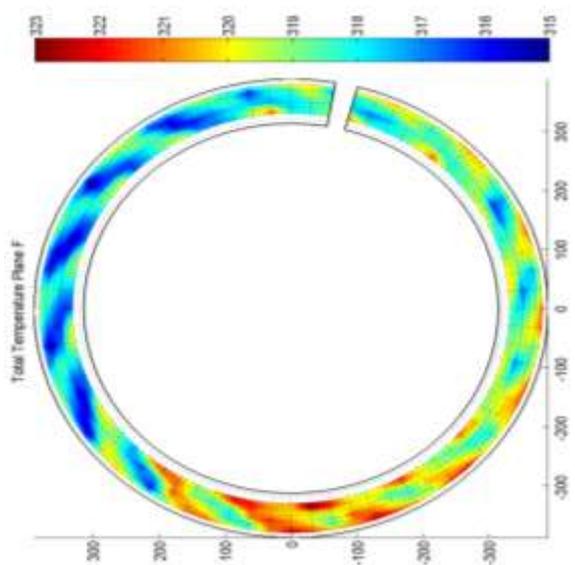
Abb. 63: korrigierter Totaldruck der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2)



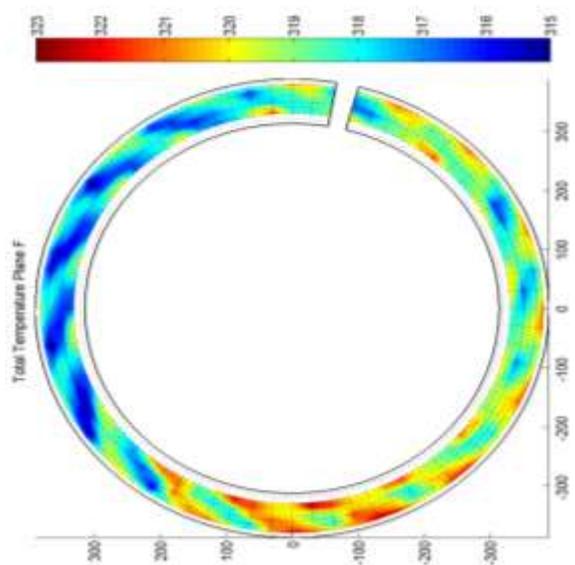
erste Messung



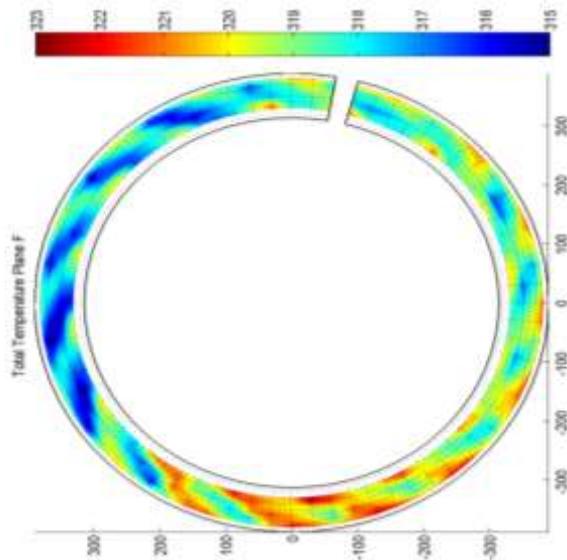
zweite Messung



dritte Messung

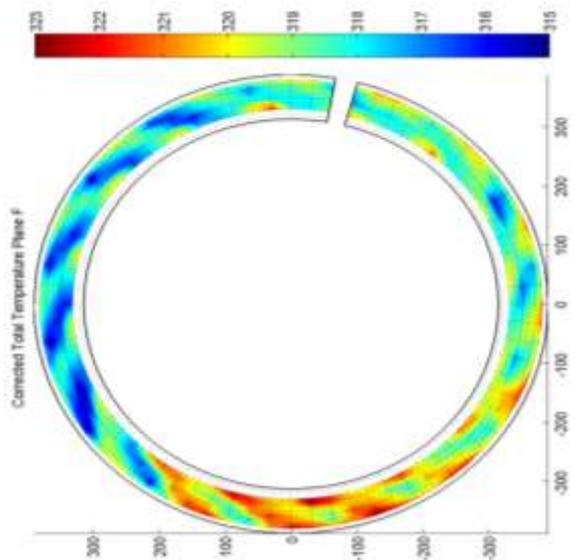


vierte Messung

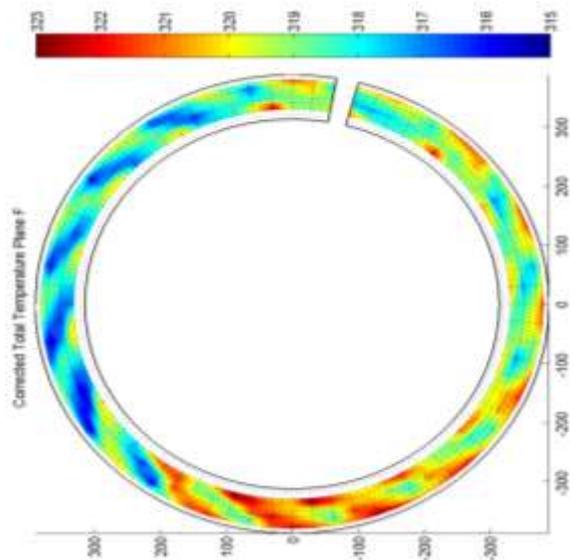


fünfte Messung

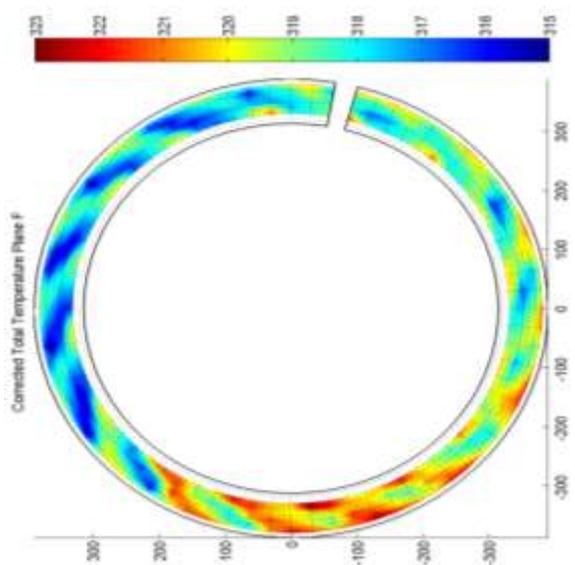
Abb. 64: Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2)



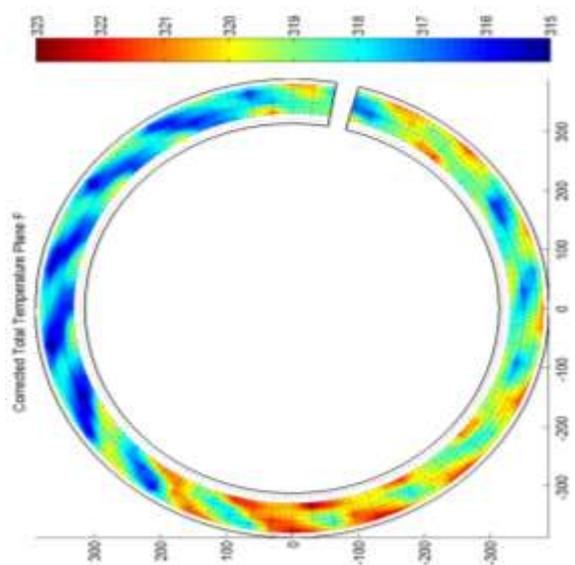
erste Messung



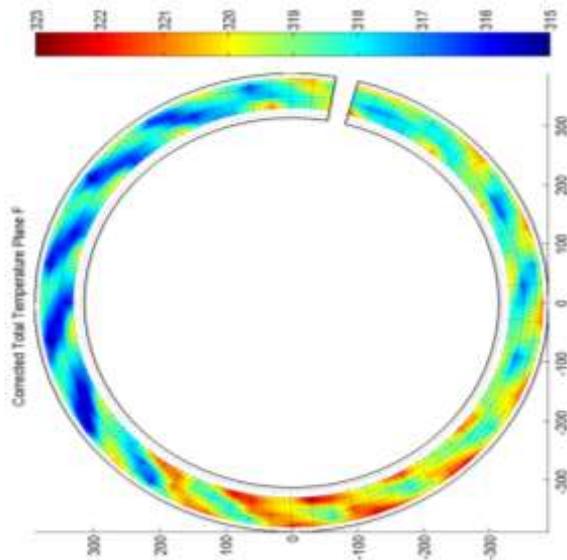
zweite Messung



dritte Messung



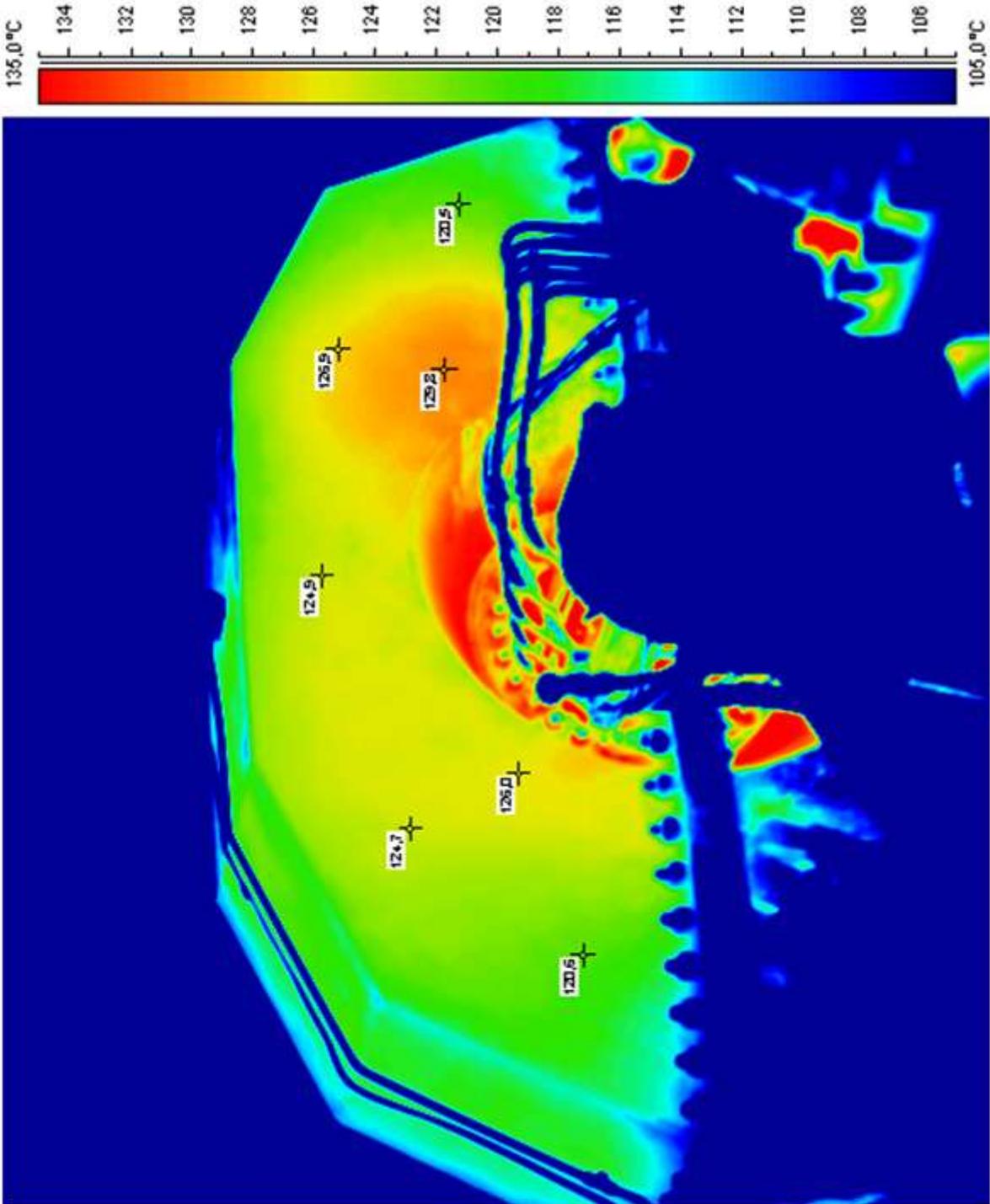
vierte Messung



fünfte Messung

Abb. 65: korrigierte Totaltemperatur der Umfangsmessungen in Ebene F (OFF 2)

**Oberflächenmessung an der Mischkammer:**



**Abb. 66: Messung der Mischkammertemperatur in Position 1 (OFF 2)**

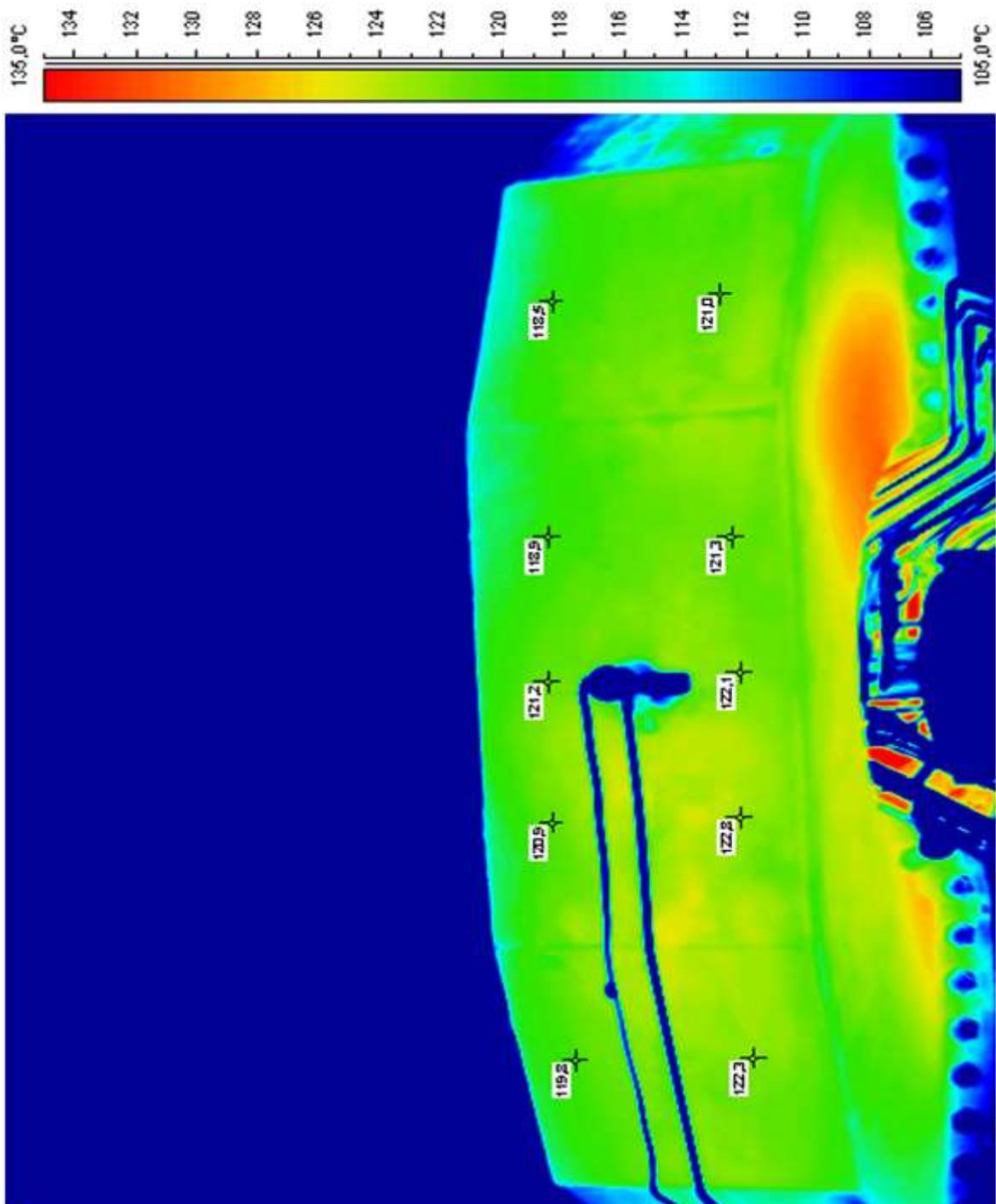


Abb. 67: Messung der Mischkammertemperatur in Position 2 (OFF 2)

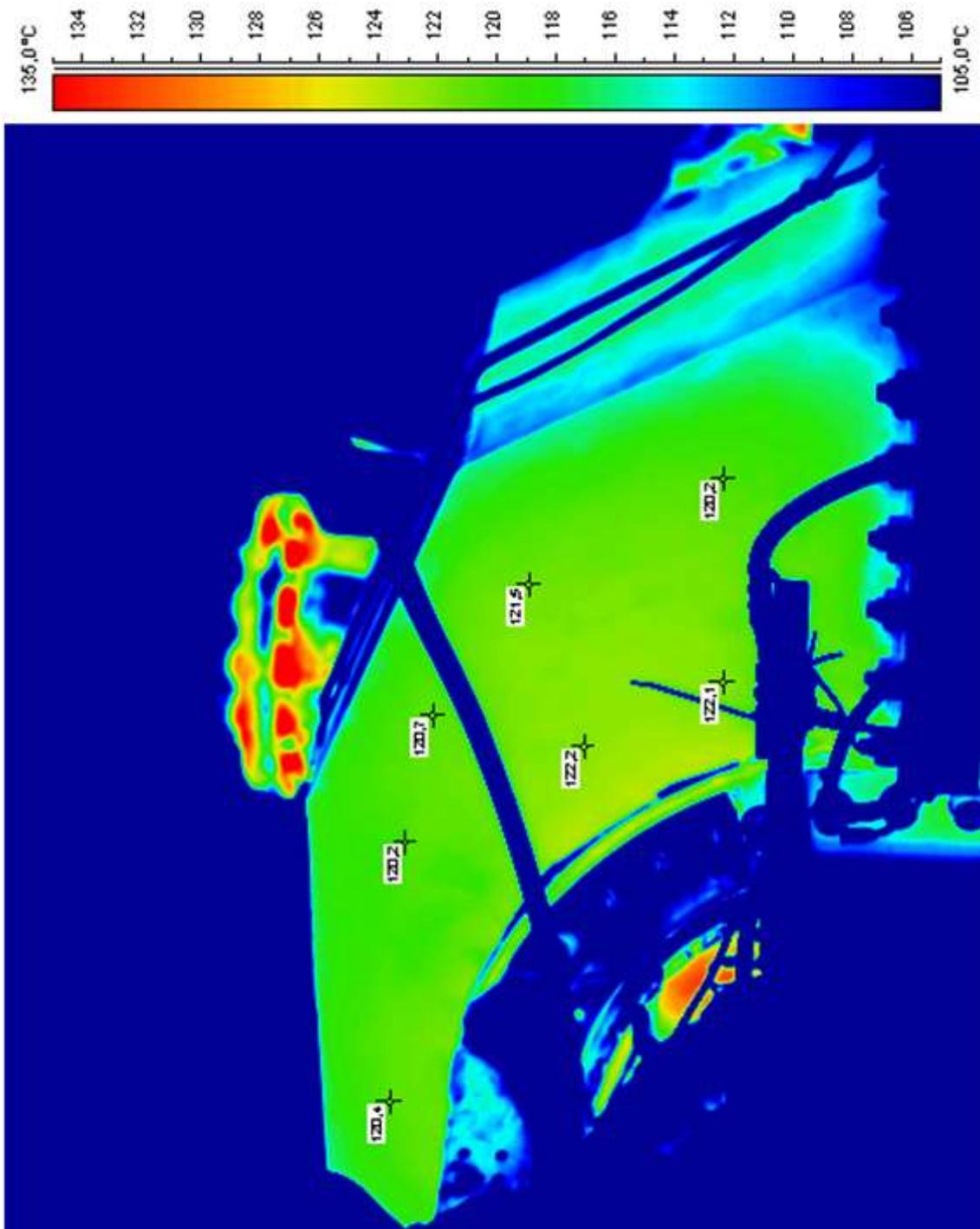


Abb. 68: Messung der Mischkammertemperatur in Position 3 (OFF 2)

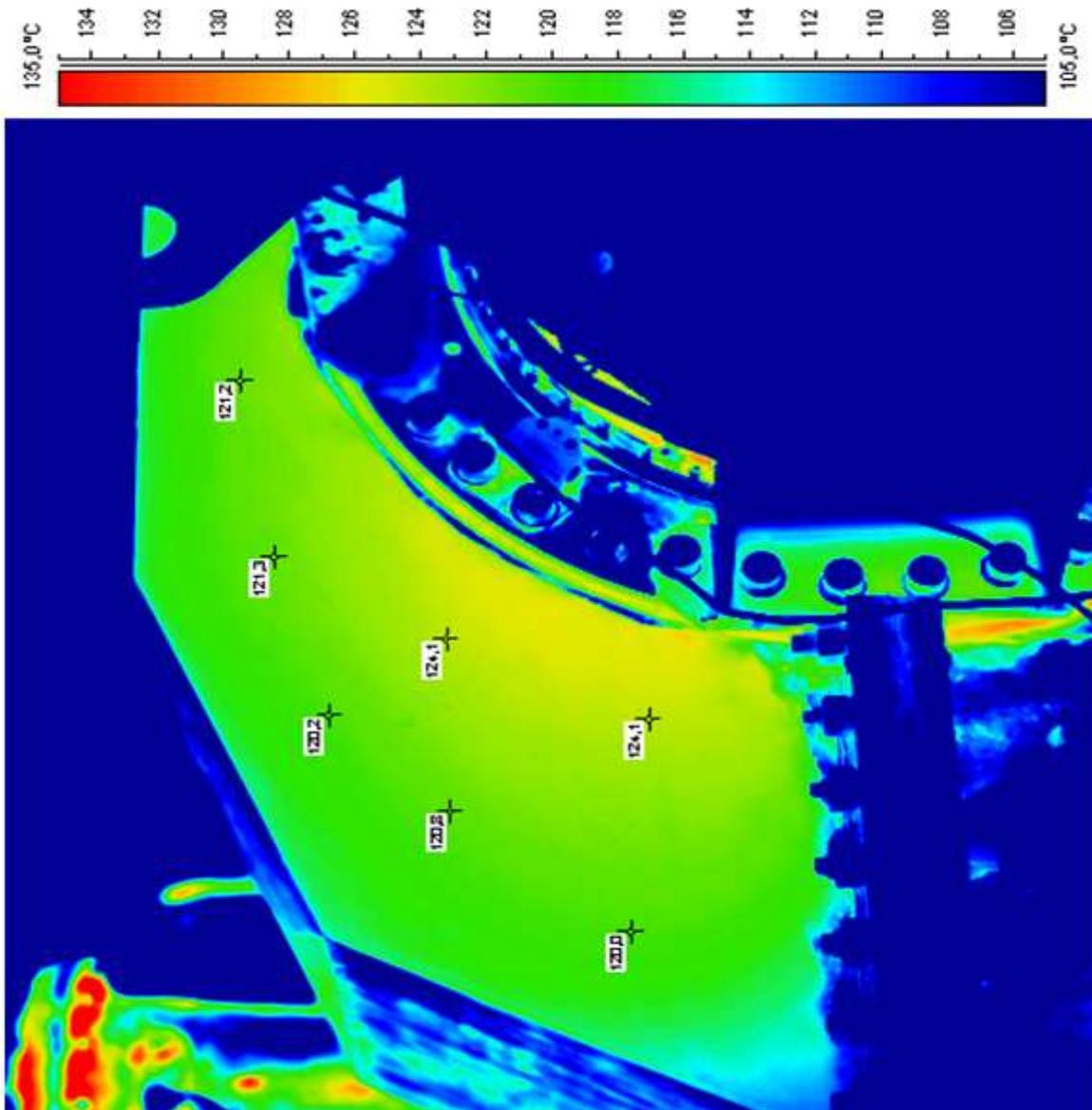


Abb. 69: Messung der Mischkammertemperatur in Position 4 (OFF 2)

## Betriebspunkt über die Zeit der Messung:

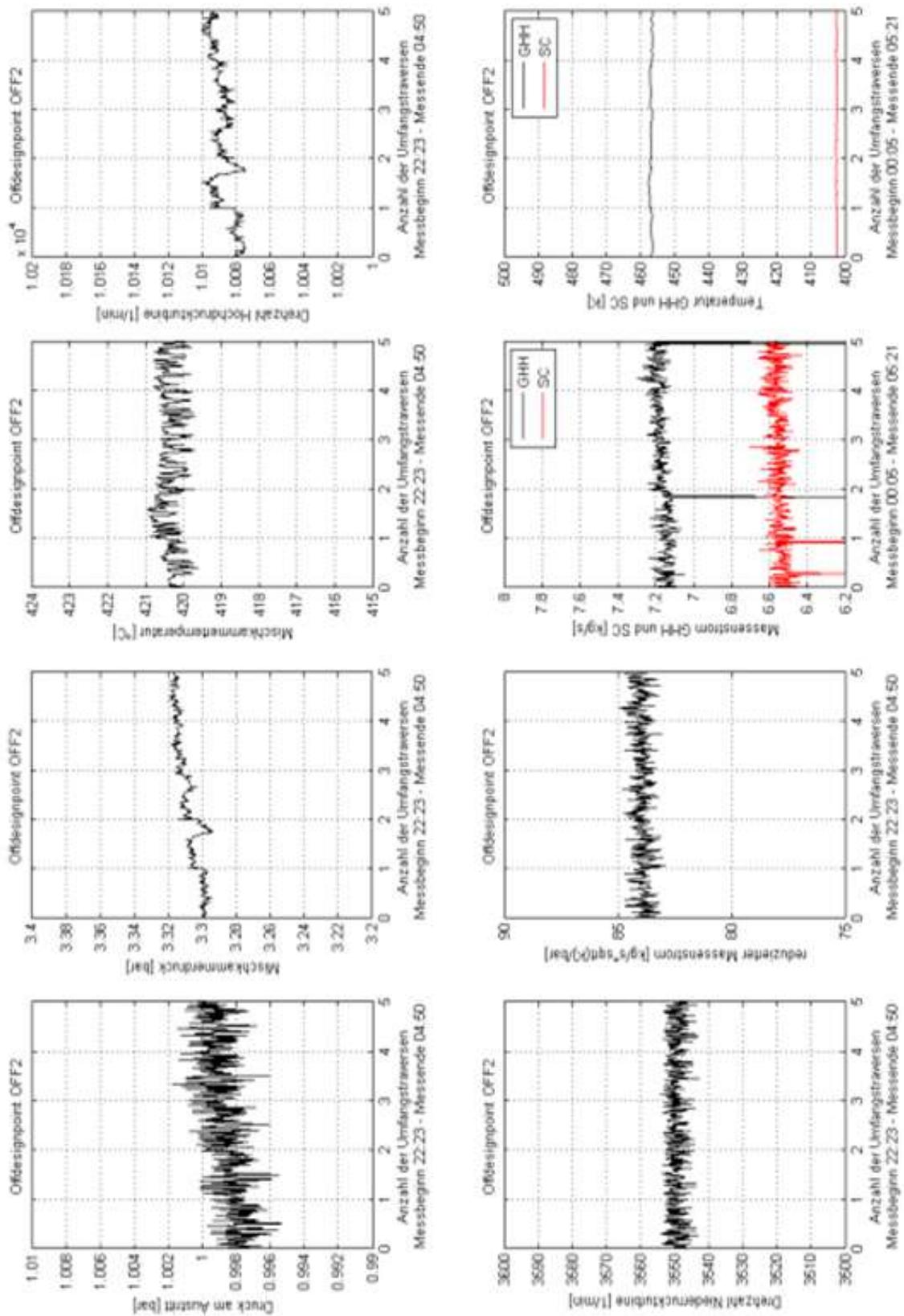


Abb. 70: Betriebspunkt über die Zeit der Umfangsmessung (OFF 2)

## II Grenzwerte:

### ADP:

	Ebene	1	2	3	4	min/max	Einheit
T_min	A	432,3	432,7	433,2	433,0	432,3	K
T_max	A	444,8	444,8	445,9	445,7	445,9	K
T_corr_min	A	432,3	432,6	433,0	433,1	432,3	K
T_corr_max	A	444,9	444,8	445,9	445,8	445,9	K
p_min	A	3,966	3,952	3,952	3,954	3,952	bar
p_max	A	3,978	3,967	3,963	3,964	3,978	bar
p_corr_min	A	3,966	3,956	3,955	3,953	3,953	bar
P_corr_max	A	3,974	3,962	3,961	3,962	3,974	bar
T_min	F	309,1	309,3	309,5	309,4	309,1	K
T_max	F	320,2	320,5	321,0	321,1	321,1	K
T_corr_min	F	309,1	309,3	309,5	309,4	309,1	K
T_corr_max	F	320,3	320,5	321,0	321,1	321,1	K
p_min	F	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	bar
p_max	F	1,066	1,066	1,066	1,067	1,067	bar
p_corr_min	F	1,005	1,004	1,004	1,005	1,004	bar
P_corr_max	F	1,067	1,067	1,066	1,067	1,067	bar
						mean	
p_0_MC		3,972	3,961	3,960	3,960	3,963	bar
TT_MC		432,3	432,4	432,6	432,7	432,5	K
20.12.2011							
Uhrzeit Start		22:48	00:25	02:04	03:10		
Uhrzeit Ende		23:39	01:17	02:53	03:57		

**OFF 1:**

	Ebene	1	2	3	4	5	min/max	Einheit
T_min	A	422,2	422,2	422,7	422,6	422,4	422,2	K
T_max	A	428,3	428,4	428,6	428,8	428,1	428,8	K
T_corr_min	A	422,2	422,4	422,6	422,7	422,4	422,2	K
T_corr_max	A	428,3	428,5	428,6	428,9	428,2	428,9	K
p_min	A	2,576	2,579	2,579	2,580	2,582	2,576	bar
p_max	A	2,584	2,585	2,584	2,586	2,588	2,588	bar
p_corr_min	A	2,578	2,579	2,580	2,580	2,582	2,578	bar
P_corr_max	A	2,582	2,583	2,583	2,584	2,587	2,587	bar
T_min	F	336,0	336,0	336,1	336,3	335,8	335,8	K
T_max	F	342,5	342,6	342,7	342,7	342,5	342,7	K
T_corr_min	F	336,0	335,8	336,1	336,3	335,8	335,8	K
T_corr_max	F	342,6	342,6	342,7	342,7	342,5	342,7	K
p_min	F	0,980	0,980	0,979	0,979	0,980	0,979	bar
p_max	F	1,022	1,022	1,019	1,022	1,022	1,022	bar
p_corr_min	F	0,980	0,980	0,979	0,979	0,979	0,979	bar
P_corr_max	F	1,022	1,022	1,019	1,022	1,022	1,022	bar
							mean	
p_0_MC		2,582	2,583	2,583	2,585	2,586	2,584	bar
TT_MC		424,3	424,4	424,5	424,5	424,3	424,4	K
25.01.2012								
Uhrzeit Start		00:05	01:07	02:37	03:44	04:48		
Uhrzeit Ende		00:36	01:37	03:10	04:14	05:21		

**OFF 2:**

	Ebene	1	2	3	4	5	min/max	Einheit
T_min	A	421,9	421,8	422,0	421,9	422,0	421,8	K
T_max	A	429,3	430,2	429,8	429,9	429,7	430,2	K
T_corr_min	A	422,0	422,2	421,9	421,8	421,9	421,8	K
T_corr_max	A	429,2	430,1	429,8	429,7	429,5	430,1	K
p_min	A	3,293	3,293	3,302	3,308	3,310	3,293	bar
p_max	A	3,300	3,308	3,314	3,316	3,317	3,317	bar
p_corr_min	A	3,294	3,298	3,304	3,309	3,311	3,294	bar
P_corr_max	A	3,300	3,306	3,312	3,316	3,317	3,317	bar
T_min	F	315,2	314,8	314,9	314,8	314,4	314,4	K
T_max	F	323,6	323,9	323,7	323,4	323,5	323,9	K
T_corr_min	F	315,0	315,1	314,8	314,6	314,7	314,6	K
T_corr_max	F	323,8	323,6	323,6	323,6	323,4	323,8	K
p_min	F	1,001	1,001	1,002	1,002	1,003	1,001	bar
p_max	F	1,052	1,053	1,053	1,054	1,054	1,054	bar
p_corr_min	F	1,002	1,001	1,002	1,002	1,003	1,001	bar
P_corr_max	F	1,052	1,055	1,054	1,054	1,053	1,055	bar
							mean	
p_0_MC		3,299	3,304	3,310	3,314	3,316	3,308	bar
TT_MC		420,3	420,6	420,4	420,3	420,4	420,4	K
26.01.2012								
Uhrzeit Start		22:23	23:38	01:42	03:28	04:22		
Uhrzeit Ende		22:52	00:10	03:16	03:54	04:50		

### III Beschreibung der beigelegten CD:

- Diplomarbeit.pdf
- Videos Thermographiekamera
  - ADP
    - ADP\_Pos.1
  - OFF1
    - OFF1\_Pos.1
    - OFF1\_Pos.2
  - OFF2
    - OFF2\_Pos.1
    - OFF2\_Pos.2
    - OFF2\_Pos.3
    - OFF2\_Pos.4
- Umfangsmessungsauswertung
- Messstellenübersicht
  - Messstellenübersicht.xls
  - Messstellenübersicht.pdf
- 5LochSonde\_manual.docx