



TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ  
INSTITUT FÜR THERMISCHE TURBOMASCHINEN UND MASCHINENDYNAMIK  
LEITER: UNIV.-PROF. DR.-ING. FRANZ HEITMEIR

MASTERARBEIT

# Untersuchung turbulenter Schwankungen stromab einer Hochdruckturbinenstufe mittels Hitzdrahtanemometrie

vorgelegt von

*Balthasar Maria Schönangerer, BSc*

Betreuer

Dipl.-Ing. Patrick Zeno Sterzinger

Beurteiler

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Emil Göttlich

Graz im April 2019

*«Wenn ich Gott treffe, dann werde ich ihm zwei Fragen stellen: warum Relativität?  
Und warum Turbulenz? Ich glaube schon, dass er auf die erste Frage eine Antwort  
parat hat.»*

Werner Heisenberg

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum, Ort

---

Unterschrift

---

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der Technischen Universität Graz und beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung von turbulenten Schwankungsgrößen stromab einer Hochdruckturbinenstufe mittels Hitzdrahtanemometrie. Dabei kann über die konvektive Wärmeabgabe von einem Draht mit stark erhöhter Temperatur an die ihn umgebende Strömung auf die Geschwindigkeit des Fluids geschlossen werden. Durch sogenannte 3-Drahtsonden ist eine Strömungsuntersuchung zeitgleich in alle Raumrichtungen möglich und bietet daher neue Perspektiven im Vergleich mit bestehenden Messeinrichtungen. Der erste Schritt einer Hitzdrahtmessung besteht immer aus einer Kalibrierung, welche für die Qualität der Messergebnisse von höchster Bedeutung ist. Anschließend wurde am institutseigenen Turbinenprüfstand hinter dem Rotor einer Hochdruckturbinenstufe eine Messung durchgeführt. Nach der Auswertung durch Matlab-Routinen erfolgte eine Verifizierung durch Gegenüberstellung mit anderen Messverfahren, welche am Institut bereits etabliert sind. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf einer erstmalig mit dem neu angeschafften Hitzdrahtanemometer durchgeführten Messung im Turbinenprüfstand mit einer bestimmten Konfiguration und der Erstellung geeigneter Auswerteroutinen.

## Abstract

This thesis was written at the Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics at the Graz University of Technology and deals with the experimental investigation of turbulent fluctuations downstream of a high-pressure turbine stage by means of hot-wire anemometry. The velocity of the fluid can be inferred from the convective heat dissipation from a wire with a strongly increased temperature to the surrounding flow. So called 3-wire probes allow a simultaneous flow investigation in all spatial directions and therefore offer new perspectives compared to existing measuring equipment. The first step of a hot-wire measurement always consists of a calibration, which is of utmost importance for the quality of the measurement results. Subsequently, a measurement was carried out on the institute's own turbine test bench behind the rotor of a high-pressure turbine stage. After evaluation by Matlab routines, verification was performed by comparison with other measurement methods, which are already established at the institute. The focus of this work was on a measurement carried out for the first time with the newly purchased hot-wire anemometer in the turbine test bench with a specific configuration and the creation of suitable evaluation routines.

---

## Danksagung

Großer Dank gebührt meinem Betreuer am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik Dipl.-Ing. Patrick Zeno Sterzinger für die sehr gute und prompte Unterstützung in allen Belangen.

Ebenfalls vom Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik ergeht mein Dank an Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Emil Göttlich für das Bereitstellen und Ermöglichen dieser Masterarbeit und für die Unterstützung bei der schriftlichen Verfassung.

Für die Ermöglichung meines Studiums möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Sie haben mich all die Jahre finanziell unterstützt und immer an mich geglaubt.

Meiner Freundin Joya möchte ich für ihre Geduld und mentale Unterstützung danken.

Ein großes Dankeschön möchte ich auch an die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) ausrichten. Die FFG hat diese Arbeit durch das Beyond-Europe-Projekt „Turbulence and Optical Measurements for Duct Surface Optimization in Turbofans – Turandot“ (Projektnummer 707779/855730) ermöglicht und mir eine Forschungsbeihilfe gewährt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation - Warum Turbulenzmessung? . . . . .	1
1.2	TTTF Graz . . . . .	1
1.3	Aufgabenstellung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Turbulente Strömungen . . . . .	4
2.1.1	Beschreibung . . . . .	4
2.1.2	Eigenschaften . . . . .	6
2.2	Strömung durch ein Schaufelgitter . . . . .	7
2.3	Strömungsmesstechnik . . . . .	10
2.3.1	Fünflochsonde . . . . .	10
2.3.2	FRAPP . . . . .	10
2.3.3	Hitzdrahtanemometrie . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Praktischer Teil</b>	<b>19</b>
3.1	Messaufbau . . . . .	19
3.2	Messmodi . . . . .	21
3.3	Kalibrierung . . . . .	22
3.3.1	Geschwindigkeitskalibrierung . . . . .	23
3.3.2	Winkelkalibrierung . . . . .	24
3.3.3	Erkenntnisse aus durchgeführten Kalibrierungen . . . . .	28
3.4	Messung im TTTF . . . . .	34
3.4.1	Sondeneinbau . . . . .	34
3.4.2	Versuchsfahrt . . . . .	37
3.5	Auswertung . . . . .	38
3.5.1	Allgemeines . . . . .	38
3.5.2	Zeitgemittelte Ergebnisse . . . . .	40
3.5.3	Phasengemittelte Ergebnisse . . . . .	45
3.5.4	Time-Space-Plots . . . . .	50
3.6	Verifizierung . . . . .	53
3.6.1	BPF . . . . .	53
3.6.2	Vergleich mit Fünflochsonde . . . . .	53
3.6.3	Vergleich mit FRAPP-Daten . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>62</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>63</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>65</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>67</b>

<b>Anhang</b>	<b>68</b>
A1 Grundgleichungen der Strömungslehre . . . . .	68
A2 Matlab-Code Kalibrierung . . . . .	69
A2.1 Anmerkungen zum Code . . . . .	77
A3 Matlab-Code Auswertung . . . . .	79
A3.1 Anmerkungen zum Code . . . . .	98
A4 Abschließende Bemerkungen des Autors . . . . .	99

## 1 Einleitung

Osborne Reynolds<sup>1</sup> hat im Jahr 1883 durch seinen berühmten Farbfadenversuch den Grundstein der Turbulenzforschung gelegt. Seit diesem Zeitpunkt ist die Erforschung von Strömungsphänomenen, die auf Turbulenz zurückzuführen sind, Gegenstand intensivster Forschungsaktivitäten. Im folgenden wird erklärt, weshalb Turbulenzmessungen auch heute noch notwendig sind und ein kurzer Überblick bezüglich des Prüfstandes gegeben. Abschließend wird auf die Aufgabenstellung der Arbeit näher eingegangen.

### 1.1 Motivation - Warum Turbulenzmessung?

Seit jeher ist es der Drang von Wissenschaftlern und Ingenieuren Naturphänomene zu erkennen, zu beschreiben und die so neu gewonnenen Erkenntnisse gewinnbringend einzusetzen. Besonders im Bereich der Turbomaschinen sind Optimierungen heutzutage nur noch durch eine exakte Kenntnis der Strömung und somit auch der Turbulenz möglich. Am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik waren Turbulenzuntersuchungen bis vor kurzem nur mit sogenannten FRAPP-Messungen (Fast Response Aerodynamic Pressure Probe - mehr dazu in Kapitel 2.3.2) möglich. Durch Einführung eines neuen Hitzdrahtmesssystems soll es in Zukunft möglich sein, mehr Informationen aus der Strömung zu gewinnen. Da aufwendige Messungen immer mit hohen Kosten verbunden sind, ist eine möglichst geringe Anzahl an Versuchsfahrten erstrebenswert. Es stellt sich also die Frage, ob durch Messungen mit einem Hitzdrahtsystem Messungen mit anderen Verfahren, wie eben z.B. FRAPP und Fünflochsonde eingespart werden können.

An dieser Stelle sei kurz darauf hingewiesen, dass auch heute noch in modernen CFD-Programmen Turbulenzmodellierungen verwendet werden. Aus diesem Grund sind Turbulenzmessungen notwendig, da ansonsten keine sicheren Auskünfte über die tatsächliche Entwicklung dieser Strömungsparameter gemacht werden können.

Im experimentellen Bereich liegt es in der Natur der Sache selbst, dass es sehr schwierig ist, im Vorhinein über den Erfolg von Messsystemen Klarheit zu haben. Diese Arbeit soll auch dokumentieren, was bisher mit den FRAPP-Messungen und vor allem was in Zukunft mit dem neuen Hitzdrahtsystem möglich sein wird.

### 1.2 TTTF Graz

Das Herzstück des Labors am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik ist die Transonic Test Turbine Facility (kurz TTTF). Dies ist ein Zwei-Wellen-Turbinenprüfstand, der aus einer Hochdruck- und einer (entgegengesetzt rotierenden) langsam laufenden Niederdruckturbinenstufe besteht, wie es in Abbildung 1.1 zu sehen ist .

Der Versuchsstand wird durch komprimierte Luft, welche von einer elektrischen drei Mega Watt Verdichteranlage zur Verfügung gestellt wird, betrieben. Die Verdichteranlage selbst besteht dabei aus zwei radialen Turboverdichtern und einem Schraubenverdichter

---

<sup>1</sup>Osborne Reynolds (\*23.08.1842;†21.02.1912) - britischer Physiker

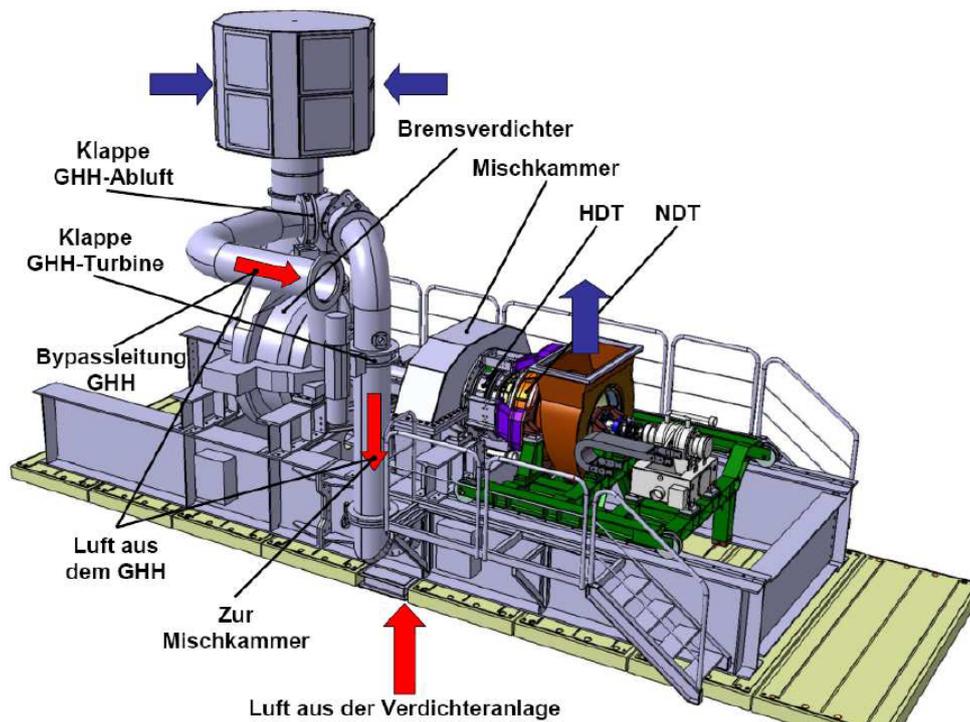


Abbildung 1.1: Darstellung Turbinenprüfstand

und ist in den Untergeschossen der Versuchshalle verbaut. Durch eine unterschiedliche Schaltung der Verdichter ergeben sich mehrere Fahrweisen des Prüfstandes und erlauben einen sehr flexiblen Betrieb [Pirker und Jericha, 1995].

Die Luft strömt aus der Verdichteranlage in die Mischkammer. Durch Kühlen kann die Eintrittstemperatur zwischen 40°C und 185°C eingestellt werden. In der Mischkammer kann bei Bedarf Luft vom Bremsverdichter (GHH), der von der Hochdruckturbinen angetrieben wird, zugeschaltet werden. Nach der Hochdruckturbinen strömt die Luft durch einen Turbinenübergangskanal. Beim Versuchssetup, welches geprüft wurde, war keine Niederdruckturbinen vorhanden. Die Luft strömt anschließend über einen Schalldämpfer nach außen an die Umgebung ab.

Abschließend werden noch einige technische Angaben - siehe Tabelle 1.1 - zum Prüfstand gemacht:

Tabelle 1.1: Technische Angaben Prüfstand

maximaler Eintrittsdruck	4,6 bar
maximale Eintrittstemperatur	185°C
minimaler Austrittsdruck	0,8 bar
maximaler Massenstrom	20 kg/s
maximale Drehzahl HD- Turbinen	11550 U/min

### 1.3 Aufgabenstellung

Im Jahr 2017 wurde am Institut ein komplettes Hitzdrahtsystem inklusive Kalibriereinheit der Firma Dantec Dynamics, ein weltweit führendes Unternehmen im Bereich der Messtechnik, angeschafft. Der erste Schritt bestand in der Adaptierung von Hard- und Software, sodass das System zum Einsatz in thermischen Turbomaschinen überhaupt geeignet ist. Dies geschah durch die Arbeit von Wachter [Wachter, 2018].

Das Ziel dieser Masterthesis war es, eine erste Messung im Prüfstand selbst durchzuführen, die Messdaten aufzubereiten und eine automatisierte Auswerteroutine für zeit- und phasengemittelte Ergebnisse in Matlab zu erstellen. Ein weiterer wichtiger Punkt war der Vergleich mit Ergebnissen von bereits am Institut etablierten Messverfahren. Gerade im experimentellen Bereich sind Erfahrungen mit einem Messsystem ein wertvolles Gut. Daher soll diese Arbeit dem Autor nachfolgenden Personen, die in Zukunft das System weiter anwenden und verbessern werden, eine gute Grundlage sein und ihnen mit Ratschlägen das Arbeiten erleichtern.

Diese Arbeit entstand im Zuge des von der FFG initiierten Beyond-Europe-Programms „Turbulence and Optical Measurements for Duct Surface Optimization in Turbofans – Turandot“ (Projektnummer 707779/855730).

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden in kurzer Form einige theoretische Grundlagen, die für das weitere Verständnis wichtig sind, wiedergegeben. Da diese von allgemeiner Bedeutung sind, erfolgt keine explizite Quellenangabe. Die Inhalte der folgenden Abschnitte sind, wenn nicht anders angegeben, aus [Bräunling, 2015], [Brenn und Meile, 2014], [Herwig und Schmandt, 2015], [Nitsche und Brunn, 2006] und [Oertel, 2016].

### 2.1 Turbulente Strömungen

Strömungen lassen sich nach ihrer Art prinzipiell in laminare und turbulente Strömungen einteilen. Bei der laminaren Strömung handelt es sich um eine sogenannte Schichtenströmung, d.h. Schichten unterschiedlicher Geschwindigkeit strömen ohne einen Austausch von Fluidteilchen nebeneinander. In Natur und Technik sind jedoch fast ausschließlich turbulente Strömungen von Interesse. Das wesentliche Merkmal einer turbulenten Strömung sind die unregelmäßig schwankenden Größen wie Geschwindigkeit, Druck und Temperatur und erfordern daher eine geeignete Beschreibungsweise. Die Beurteilung, ob eine Strömung als laminar oder turbulent behandelt werden muss, erfolgt anhand der dimensionslosen Reynoldszahl  $Re$ .

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu} \quad (1)$$

Dabei stehen  $u$  und  $d$  für eine charakteristische Geschwindigkeit bzw. für ein charakteristisches Längenmaß des betrachteten Systems. Mit der dynamischen Viskosität  $\mu$  ergibt sich aus der Beziehung  $\nu = \mu/\rho$  über die Dichte  $\rho$  die kinematische Viskosität.

Für turbulente Strömungen gilt:

$$Re \geq Re_{krit} \quad (2)$$

Die kritische Reynoldszahl muss dabei für unterschiedliche Strömungsfälle jeweils experimentell bestimmt werden.

#### 2.1.1 Beschreibung

Die Grundidee bei der Beschreibung von turbulenten Strömungen ist eine Aufteilung der Bewegung in eine mittlere Größe  $\bar{\Phi}$  und in eine Schwankungsgröße  $\Phi'$ . In Abbildung 2.1 ist dies beispielsweise für die Geschwindigkeit dargestellt. Die aktuelle Strömungsgröße  $\Phi$  wird also aus einer Summe gebildet (auch bekannt unter Reynolds Ansatz):

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (3)$$

Wobei für den Mittelwert

$$\bar{\Phi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \Phi dt \quad (4)$$

und für die Schwankungsbewegungen im zeitlichen Mittel

$$\bar{\Phi'} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \Phi' dt = 0 \text{ gilt.} \quad (5)$$

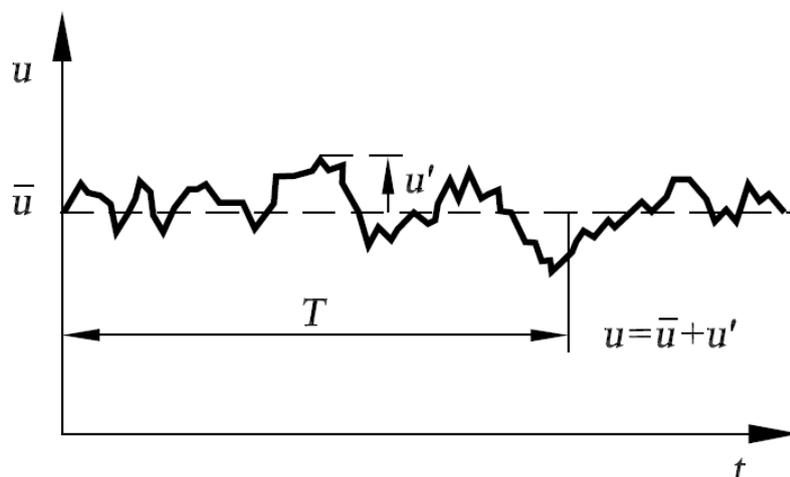


Abbildung 2.1: Reynolds Ansatz für eine turbulente Strömung [Oertel, 2016]

Wird dieser Ansatz nun in die Navier Stokes Gleichungen (siehe Anhang A1) eingesetzt, ergeben sich daraus die sogenannten RANS- Gleichungen (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations). Dabei wird ersichtlich, dass zusätzliche Trägheitsterme auf der rechten Seite der Gleichungen auftauchen. Turbulenz kann also durch zusätzliche Spannungen, den sogenannten Reynoldsspannungen, aufgefasst werden.

$$\tau'_{Rey} = \tau'_{turb} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Die Gleichung Nummer 6 gilt unter der Annahme eines inkompressiblen Fluids. Soll die Kompressibilität berücksichtigt werden ist die sogenannte Favre-Mittelung (auch Massenmittelung) anzuwenden.

$$\overline{\Phi} = \frac{\overline{\rho\Phi}}{\overline{\rho}} \quad (7)$$

Durch die Reynoldsspannungen ergeben sich sechs zusätzliche Unbekannte Größen im Gleichungssystem. Es werden also weitere Gleichungen zur Beschreibung dieser Spannungen benötigt. Dies ist das sogenannte Schließungsproblem der Turbulenz. Durch diverse Turbulenzmodelle ist eine Modellierung der turbulenten Spannungen möglich, worauf hier allerdings nicht näher eingegangen wird.

Geeignete Größen zur Charakterisierung von turbulenten Strömungen sind die turbulente kinetische Energie  $k$  und der Turbulenzgrad  $Tu$ , die sich beide aus den Geschwindigkeitsschwankungen zusammensetzen.

$$k = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2} \quad (8)$$

$$Tu = \frac{1}{U_\infty} \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} \quad (9)$$

### 2.1.2 Eigenschaften

Turbulente Strömungen weisen einige charakteristische Eigenschaften auf, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Turbulente Strömungen liegen oberhalb der kritischen Reynoldszahl.
- Turbulenz ist im Strömungsfeld nicht überall gleich stark.
- Turbulenz verursacht einen erhöhten Impulsaustausch, was sich in erhöhten Reibungswiderständen äußert.
- Bei Ablösegefahr von Strömungen kann Turbulenz durch den erhöhten Impulsaustausch den Ablösepunkt stromabwärts verschieben.
- Turbulenz ist immer dreidimensional.

Der Turbinenübergangskanal zwischen Hochdruck- und Niederdruckturbinenstufe stellt einen Diffusor dar. Da bei verzögerten Strömungen die Ablösegefahr im Allgemeinen groß ist, kommt der Turbulenz in diesem Abschnitt eine ausgeprägte Bedeutung zu, da mit ihrer Hilfe eine Strömungsablösung vermieden bzw. weiter stromabwärts an einen günstigeren Punkt verschoben werden kann.

In Abbildung 2.2 sind die unterschiedlichen Längenskalen der turbulenten Schwankungen ersichtlich. Die Abmessungen der größtmöglichen Wirbel sind durch die geometrischen Grenzen gegeben. Anschließend zerfällt der Wirbel in einer Turbulenzkaskade, verursacht durch die Viskosität, in immer kleinere Dimensionen.

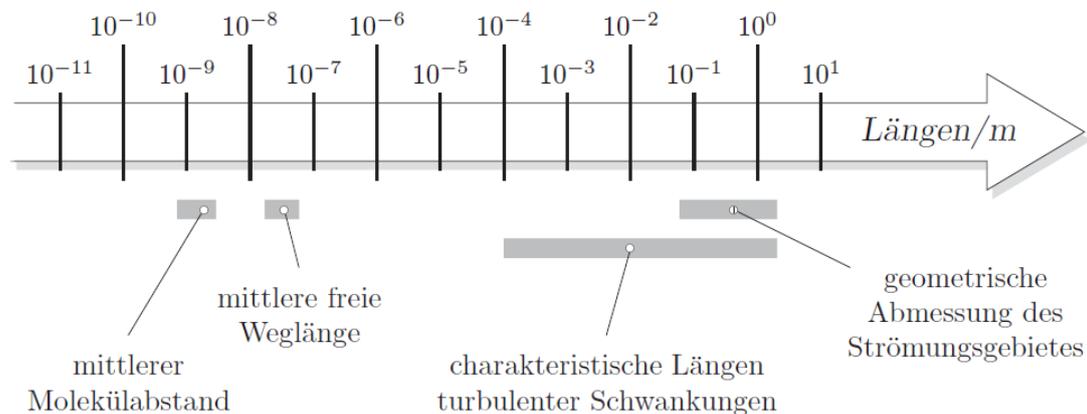


Abbildung 2.2: Typische Längen bei Gasströmungen unter Normbedingungen [Herwig und Schmandt, 2015]

Turbulente Strukturen weisen also ein breites Spektrum an geometrischen Dimensionen auf. Dies hat zur Folge, dass bei Turbulenzmessungen eine örtlich hohe Auflösung gegeben sein muss. Weiters bedeutet dies, dass vor allem bei der Untersuchung kleiner Strukturen, der Messsensor ebenfalls geometrisch kleine Abmessungen besitzen muss.

## 2.2 Strömung durch ein Schaufelgitter

Da die spätere Messung hinter dem Rotor einer Turbinenstufe stattfindet, wird an dieser Stelle kurz auf die Strömungsphänomene durch ein Schaufelgitter eingegangen.

Eine Turbinenstufe, wie in Abbildung 2.3 ersichtlich ist, setzt sich aus einem stillstehenden Leitrad (Stator) und einem drehenden Laufrad (Rotor) zusammen. Die theoretisch umgesetzte Arbeit in einem Laufrad kann durch die Turbomaschinenhauptgleichung (auch Euler-Gleichung) beschrieben werden.

$$Y_{Sch} = u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1} \quad (10)$$

$Y_{Sch}$  stellt die theoretische spezifische Schaufelarbeit dar. Dabei gilt für die Absolutgeschwindigkeit  $c$ , die Umfangsgeschwindigkeit  $u$  und die Relativgeschwindigkeit  $w$  folgender Zusammenhang:

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w} \quad (11)$$

Aufgrund dieser Beziehung eignet sich eine Darstellung in Form von Geschwindigkeitsdreiecken, wie in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt.

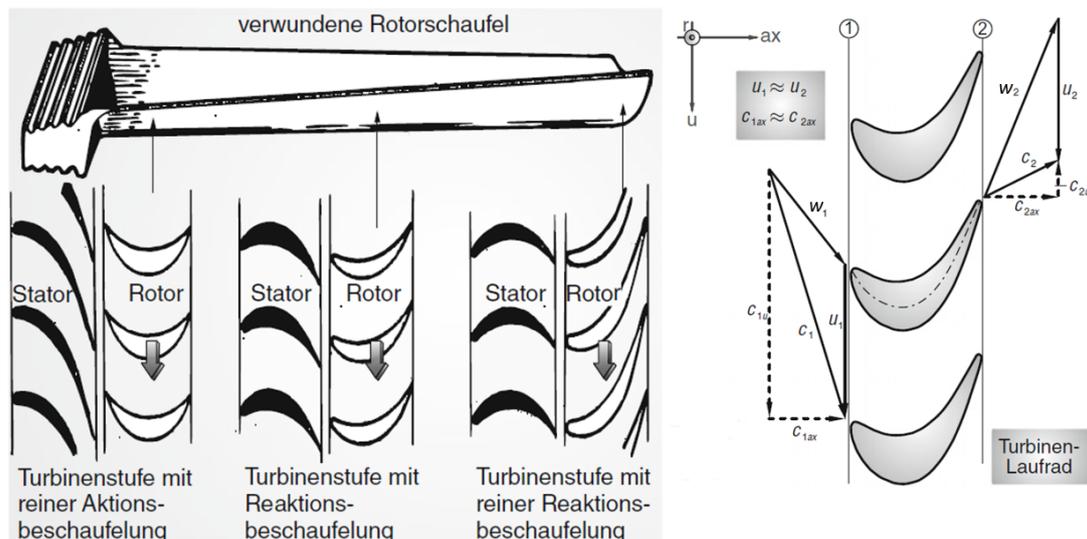


Abbildung 2.3: links: Darstellung einer verwundenen Turbinenschaufel, rechts: An- und Abströmung an einer Turbinenschaufel [Bräunling, 2015]

Aus den obig beschriebenen Umständen und vor allem aus Gleichung 10 ist ersichtlich, dass die umgesetzte Arbeit proportional zum Drallabbau innerhalb der Turbine ist. Bei

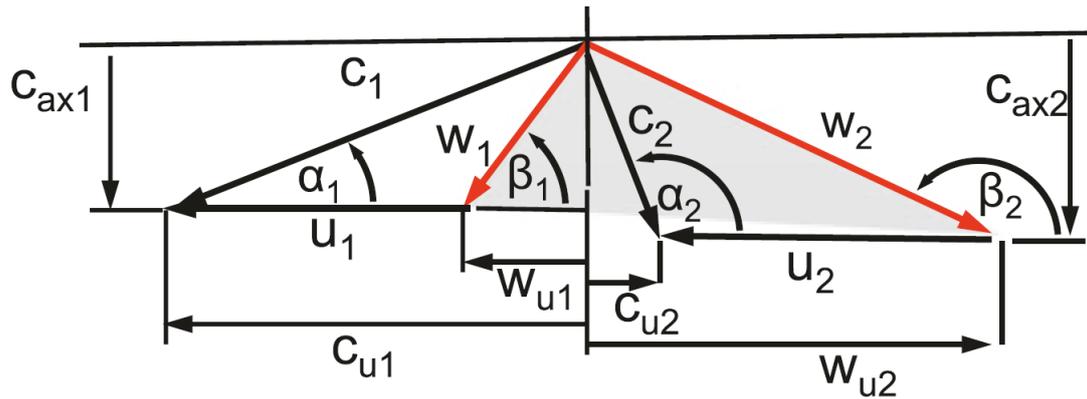


Abbildung 2.4: Geschwindigkeitsplan einer Turbinenstufe [Rick, 2013]

diesen Betrachtungen wurden nur die Ein- und Austrittsbedingungen berücksichtigt, jedoch keine Strömungsphänomene im Schaufelinneren. Diese beeinflussen aber sehr wohl das gesamte Strömungsgeschehen und somit auch das Zu- und Abströmverhalten, weshalb obige Beziehungen nur die Mittelwerte darstellen.

«Die reale Strömung in Turbomaschinen ist instationär, bei stationärem Betrieb zumindest periodisch instationär durch vorauslaufende Schaufelreihen, weiterhin dreidimensional, kompressibel, reibungsbehaftet sowie mit turbulenten Grenzschicht-, Wirbel- und Mischungsbereichen durchsetzt.» [Rick, 2013]

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Strömung in modernen Turbomaschinen generell sehr komplex ist. Durch verwundene Schaufeln (siehe auch Abbildung 2.3), welche heute fast ausschließlich verwendet werden, ändert sich mit dem Radius die Geometrie, Teilung und vor allem die Geschwindigkeitsverhältnisse. In Abbildung 2.5 sind Sekundärströmungsphänomene ersichtlich, deren Zustandekommen nachfolgend kurz erläutert wird.

### Kanalwirbel

Im Schaufelkanal herrscht ein Druckgefälle von der Druck- zur Saugseite hin und verursacht somit den Kanalwirbel.

### Hufeisenwirbel

Durch Reibungseffekte stellen sich im wandnahen Bereich, also an der Nabe und am Gehäuse, Geschwindigkeitsgrenzschichten ein. Direkt an der Wand ist die Geschwindigkeit durch die Haftbedingung mit Null vorgegeben. Der statische Druck entspricht an der Vorderkante (=Staupunkt) in etwa dem Totaldruck. Dies bedeutet, dass sich mit der Grenzschicht nicht nur die Geschwindigkeit zur Wand hin abnimmt, sondern auch der statische Druck. Da Strömungen sich in Richtung des Druckgefälles bewegen, ergibt sich eine Strömung nach unten [Heitmeir, 2015].

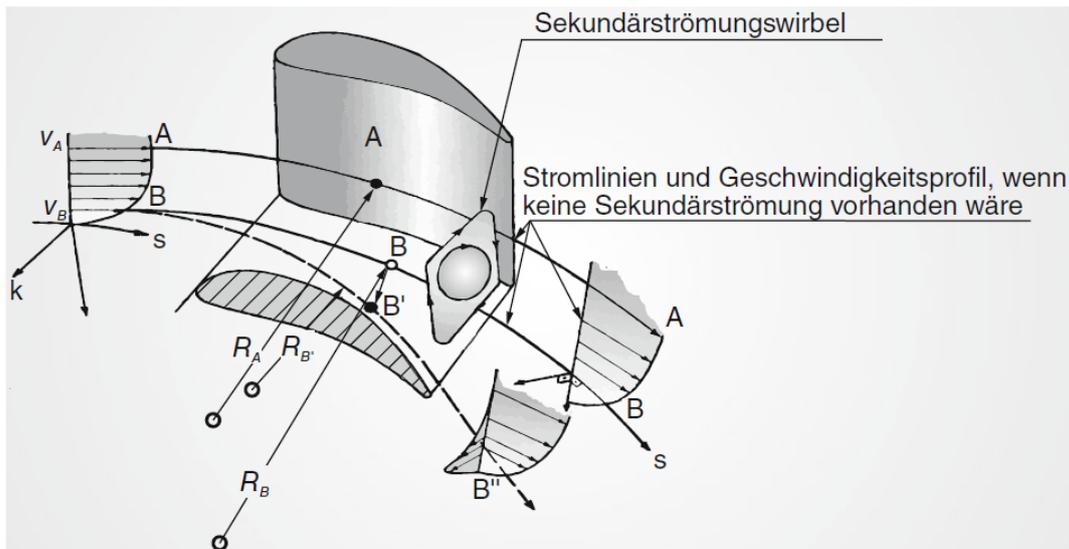


Abbildung 2.5: Entstehung von Sekundärströmungen in Turbomaschinenbeschaufelungen [Bräunling, 2015]

### Spaltwirbel

Da der Rotor als bewegendes Teil nicht am Gehäuse streifen darf, ist ein Spalt notwendig. Hierbei kommt es zur Spitzenüberströmung wiederum von der Druck- auf die Saugseite, siehe Abbildung 2.6, was in späterer Folge zur Ausbildung des Spaltwirbels zwischen Schaufelspitze und Gehäuse führt.

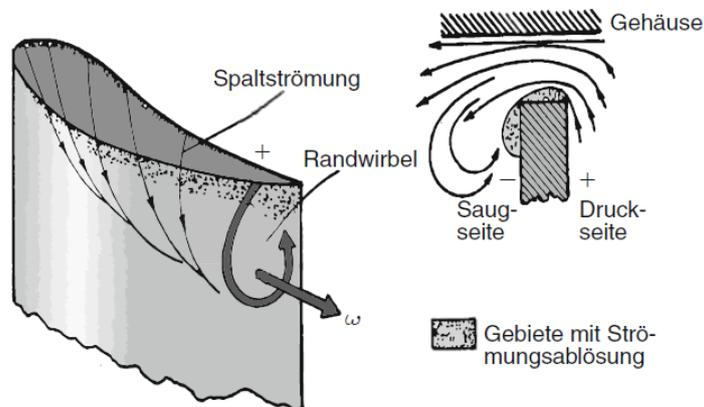


Abbildung 2.6: Entstehung von Spaltverlusten [Bräunling, 2015]

### 2.3 Strömungsmesstechnik

In diesem Abschnitt werden die am Institut vorhandenen Messeinrichtungen erläutert. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Hitzdrahtanemometrie. Die anderen beiden Verfahren (Fünflochsonde und FRAPP) werden lediglich kurz vorgestellt, weil die Vergleichsmessungen zu einem früheren Zeitpunkt damit stattfanden.

#### 2.3.1 Fünflochsonde

Fünflochsonden messen den Gesamtdruck, der sich nach Gleichung 12 aus den folgenden drei Anteilen zusammensetzt: statischer, dynamischer und hydrostatischer Druck, wobei letzter bei thermischen Turbomaschinen vernachlässigbar ist.

$$p + \frac{\rho}{2}u^2 + \rho gh = \text{const.} \quad (12)$$

Der Gesamtdruck ist derjenige Druck, der sich am Staupunkt bzw. in diesem Falle an der Messsonde aufbaut. Es gilt also für den Gesamtdruck bei inkompressibler Strömung

$$p_0 = p + \frac{\rho}{2}u^2 \quad (13)$$

bzw. bei kompressibler Strömung ( $Ma \geq 0,3$ )

$$p_0 = p \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (14)$$

Mit Fünflochsonden, wie in Abbildung 2.7 ersichtlich, können im dreidimensionalen Strömungsfall alle Komponenten des Strömungsvektors und damit auch die räumlichen Strömungswinkel ermittelt werden. Für gute Messergebnisse ist eine sorgfältige Kalibrierung der einzelnen Druckbohrungen unabdingbar. Geschwindigkeitsschwankungen sind mit Fünflochsonden aber nicht ermittelbar, da die langen Druckleitungen eine stark dämpfende Wirkung besitzen.

#### 2.3.2 FRAPP

FRAPP ist die Kurzform für Fast Response Aerodynamic Pressure Probe.

«Eine aerodynamische Sonde besteht aus einem geeignet geformten umströmten Körper (z. B. Zylinder, Keil, cobraförmiger Haken usw.), welcher eine oder mehrere Druckmessbohrungen an seiner Oberfläche aufweist. Diese Bohrungen sind so angeordnet, dass sich an ihnen durch Aufstau der Strömung jeweils ein Druck in Abhängigkeit der momentanen Anströmbedingungen einstellt. Da der Staudruck quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt, ist das Messverfahren vor allem für höhere Geschwindigkeiten geeignet. Rückwirkungen des Sondenkörpers auf die Strömung sind in Kauf zu nehmen, weil selbst eine sehr kleine Sonde die Strömung lokal abbremst und eine Versperrung des Kanals verursacht. Durch Erfassung dieser Drücke und Auswertung anhand von aerodynamischen Kalibrierungsdaten kann der momentan herrschende Strömungszustand berechnet werden. Pro Messbohrung kann mindestens eine unbekannt physikalische

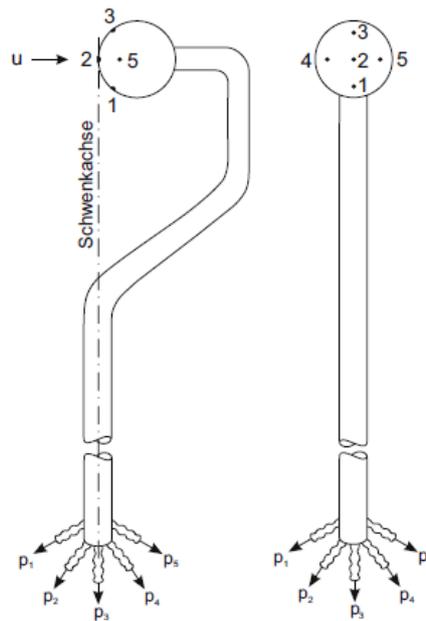


Abbildung 2.7: Fünfloch Kugelsonde [Nitsche und Brunn, 2006]

Größe bestimmt werden. Bei schnell messenden Sonden wird der Druck durch unmittelbar hinter der Bohrung eingebaute Miniaturdrucksensoren praktisch verzögerungsfrei gemessen.» [Kupferschmied, 1998]

In Abbildung 2.8 ist eine Einloch-FRAPP-Sonde ersichtlich, wie sie am Institut für Messungen verwendet wird. Die Probe wird dabei im virtuellen Dreilochbetrieb eingesetzt, was bedeutet, dass die Sonde beispielsweise jeweils  $\pm 20^\circ$  seitlich aus der Hauptsrömungsachse gedreht wird. Nähere Informationen zur Sonde und zur Kalibrierung finden sich in [Persico und Gaetani, 2005].



Abbildung 2.8: FRAPP-Sonde [Zerobin und Bauinger, 2017]

### 2.3.3 Hitzdrahtanemometrie

Die Hitzdrahtanemometrie (=HDA) ist ein etabliertes Geschwindigkeitsmessverfahren für Strömungen. Es eignet sich hervorragend zur Bestimmung von Geschwindigkeitsschwankungen und wird deswegen vor allem in der Turbulenzmessung eingesetzt.

### Aufbau

Prinzipiell gibt es zwei unterschiedliche Varianten der HDA. Zum einen ist dies das Verfahren im CCA-Modus (Constant Current Anemometer) und zum anderen im CTA-Modus (Constant Temperature Anemometer). Das CCA wird vorrangig für Messungen von Temperaturschwankungen, nicht aber für Geschwindigkeitsschwankungen, verwendet. Aus diesem Grund wird nachfolgend nur das Verfahren im CTA-Modus genauer erläutert.

Ein CTA-System besteht aus einer Messsonde, auf welcher die Hitzdrähte zwischen Zinken (Prongs) als Messsensoren aufgespannt sind und einer Brückenschaltung, wie sie in Abbildung 2.9 zu sehen ist. Der dünne Metalldraht wird auf eine deutlich höhere Temperatur als die Strömungstemperatur aufgeheizt und anschließend konstant gehalten. Der konvektive Wärmeübergang vom Draht auf die Strömung ist von der Geschwindigkeit abhängig und beeinflusst so die erforderliche elektrische Heizspannung. Die Übertemperatur des Drahtes (oft mit  $T_S$  für Sensortemperatur oder im englischen mit  $T_w$  für Wire Temperature bezeichnet) wird durch Einstellung des Operationswiderstandes  $R_0$  (oft auch als  $R_{dec}$  für Dekadenwiderstand bezeichnet) festgesetzt.

Durch Vorgabe eines Überhitzungsverhältnisses  $a$  (auch overheat ratio) kann die benötigte Sensortemperatur berechnet werden (nach [Jørgensen, 2005]).

$$a := \frac{R_S(T_S) - R_S(T_{ref})}{R_S(T_{ref})} \quad (15)$$

$$T_S = T_{ref} + \frac{a}{\alpha_{ref}} \quad (16)$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es bei der Definition des Überhitzungsverhältnisses in der Literatur mehrere Varianten gibt. Bei der obigen angeführten Definition nach Jørgensen [Jørgensen, 2005] ist  $a = 0,8$  für Gasströmungen eine sehr gute Empfehlung. Der Sensorwiderstand  $R_S$  (bzw.  $R_w$  - Wire Resistance) besitzt eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit, d.h. es besteht ein Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Sensortemperatur.

$$R_S(T_S) = R_S(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha_{ref} \cdot (T_S - T_{ref})] \quad (17)$$

Der Sensorwiderstand bei einer Sensortemperatur  $T_S$  kann also durch den Sensorwiderstand und dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  bei der Referenztemperatur berechnet werden. Die Referenzwerte bei  $T_{ref} = 20^\circ C$  werden vom Sensorhersteller mitgeliefert und sind auf der Sensorverpackung ersichtlich. Der Gesamtwiderstand vom erhitzten Sensor bis zur Brücke setzt sich wie folgt zusammen:

$$R_{ges} = R_S(T_S) + R_{Zinken} + R_{Support} + R_{Kabel} \quad (18)$$

Mithilfe des Brückenverhältnisses (Bridge Ratio = BR)  $R_2/R_1$ , siehe Abbildung 2.9, kann der Operationswiderstand  $R_0$  berechnet werden. Das Bridge Ratio ist in den meisten Fällen  $20 : 1$ , bei sehr langen Kabeln kann es auch das Verhältnis  $1 : 1$  annehmen.

$$R_0 = BR \cdot R_{ges} \quad (19)$$

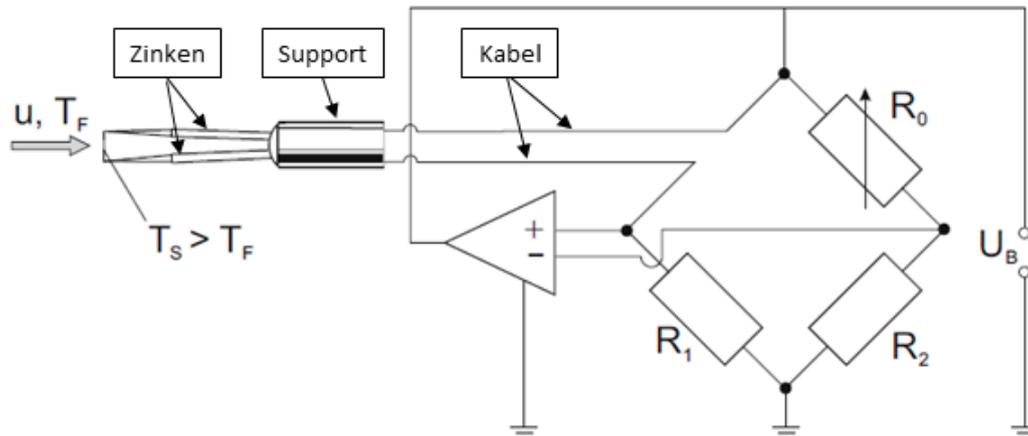


Abbildung 2.9: Brückenschaltung eines CTA [Nitsche und Brunn, 2006] leicht abgewandelt

### Funktionsweise

Anhand Abbildung 2.10 soll die grundlegende Funktionsweise der HDA näher erläutert werden. Wird in einer ersten Näherung die Wärmeabgabe durch Strahlung (bei Heizdrähten meist kleiner als ein Prozent der Konvektion) und die Wärmeverluste durch die Haltezinken vernachlässigt, so ergibt sich für die Wärmebilanz, dass die innere elektrisch erzeugte Wärme gleich der durch Konvektion abgeführten Wärme sein muss.

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_K \quad (20)$$

$$\frac{U^2}{R_0} = F\alpha(T_S - T_F) \quad (21)$$

In Gleichung 21 steht  $\alpha$  für den Wärmeübergangskoeffizienten und  $T_F$  für die Fluidtemperatur (häufig auch  $T_a$  für Ambient Temperature) und  $F$  für die Sensorfläche. Bei Annahme konstanter Fluidtemperatur sind nun nur noch die beiden Größen  $U$  und  $\alpha$  variabel. Beim Wärmeübergang durch Konvektion spielt die dimensionslose Nusselt-Zahl eine wesentliche Rolle.

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \approx \frac{\text{Wärmestrom bei Konvektion}}{\text{Wärmestrom bei reiner Leitung}} \quad (22)$$

Für die erzwungene Konvektion an einem quer angeströmten Kreiszyylinder kann folgende empirische Korrelation angesetzt werden:

$$Nu = A_0 + B_0 Re_d^n \quad (23)$$

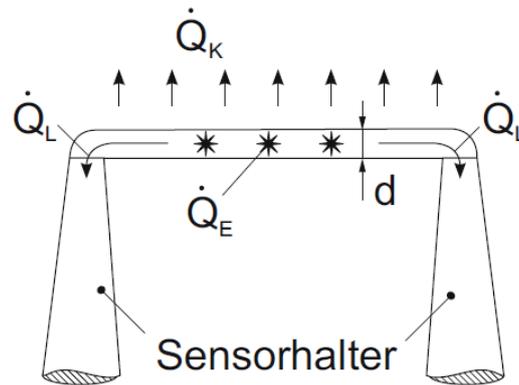


Abbildung 2.10: Wärmebilanz eines Hitzdrahtes [Nitsche und Brunn, 2006]

wobei  $A_0$  und  $B_0$  Konstanten sind. Unter Annahme konstanter Stoffwerte, welche in der Nusselt-, sowie der Reynoldszahl auftauchen, kann ein trivialer Zusammenhang zwischen der Heizspannung  $U$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $u$  angegeben werden.

$$U^2 = A + Bu^n \quad (24)$$

Gleichung 24 ist als das King'sche Gesetz bekannt, wobei  $A$  und  $B$  Kalibrierkonstanten entsprechen. Die Heizspannung  $U$  steht in einem festen Verhältnis zur Brückenspannung  $U_B$ , welche bei einem HDA eigentlich gemessen wird. Nach Abbildung 2.9 ergibt sich der Zusammenhang wie folgt:

$$U = \frac{U_B R_0}{R_0 + R_1} \quad (25)$$

In Abbildung 2.11 ist ein typischer Spannungsverlauf für einen Hitzdraht über der Geschwindigkeit dargestellt. Um die Funktion nach obiger Vorschrift bestimmen zu können, werden an zwei Punkten (hier A und B) Geschwindigkeitsmessungen mit einem Referenzverfahren (z.B. einem Pitot- oder Prandtlrohr) durchgeführt. Das King'sche Gesetz war die erste Kalibriervorschrift in der Geschichte der HDA. Heute werden zur Kalibrierung genauere Polynomapproximationen verwendet. Je nach Anwendungsfall kommen unterschiedliche Sensoren zum Einsatz. Wie in Abbildung 2.12 ersichtlich ist, gibt es Ein-, Zwei- und Dreidrahtsonden. Bei einer Dreidrahtsonde beispielsweise sind die Drähte so angeordnet, dass Geschwindigkeitsmessungen in alle drei Raumrichtungen gleichzeitig durchgeführt werden können. In diesem Fall besitzt jeder Draht eine eigene CTA-Brückenschaltung, welche voneinander unabhängig sind. Dies bedeutet jedoch auch, dass jeder Draht für sich einzeln kalibriert werden muss. Da die klassischen Hitzdrähte mit einer typischen Dicke von nur  $5\mu\text{m}$  im Durchmesser sehr empfindlich sind, werden bei Anwendungsfällen mit hohen Geschwindigkeiten oder verunreinigter Luft robustere Sensoren verwendet. Für die Messungen im Prüfstand wurden sogenannte Fiber-Film-Probes verwendet. Diese bestehen aus einer Quarzfaser, auf welche als Sensor eine Nickelschicht aufgebracht wurde. Es ergibt sich so insgesamt ein Drahtdurchmesser von ca.  $70\mu\text{m}$ .

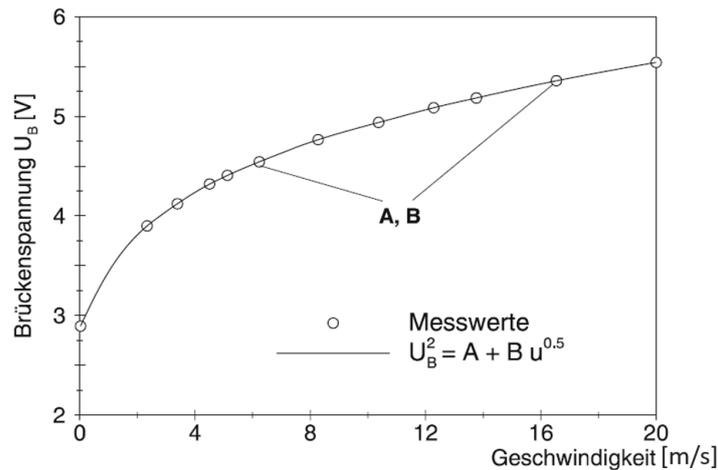


Abbildung 2.11: typischer Spannungsverlauf über der Geschwindigkeit [Nitsche und Brunn, 2006] leicht abgewandelt

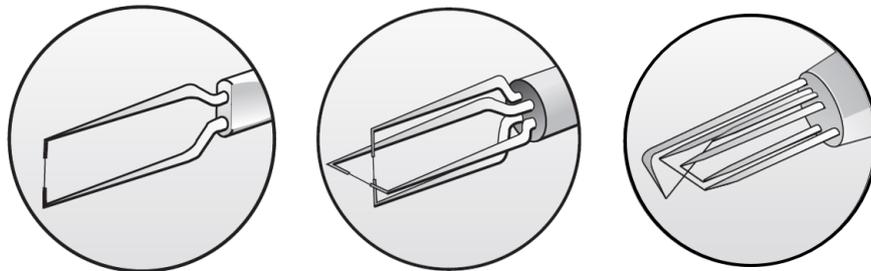


Abbildung 2.12: Ein-, Zwei- und Dreidrahtsonde [Dantec Dynamics, 2018] leicht abgewandelt

### **Einflussgrößen**

Da der Wärmeübergangskoeffizient stark von den Strömungsbedingungen abhängt, sind Hitzdrähte auf Änderung von Strömungsparametern sehr empfindlich.

- Temperatur

Nach Gleichung 21 trägt die Fluidtemperatur wesentlich zur treibenden Temperaturdifferenz und somit zum Wärmeübergang bei. Wird mit einem HDA im Experiment bei einer anderen Fluidtemperatur, als bei der Kalibrierung gemessen, so ist eine Korrektur der Brückenspannung wie folgt vorzunehmen:

$$U_B = U_{B,Kal} \left[ \frac{T_S - T_F}{T_S - T_{F,Kal}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Dies bedeutet, dass bei  $T_F > T_{F,Kal}$  die Spannung absinkt und bei  $T_F < T_{F,Kal}$  die Spannung ansteigt - vergleiche dazu auch Abbildung 2.13. Am Verlauf der

Spannung über der Geschwindigkeit in Abbildung 2.11 lässt sich erkennen, dass der gleiche absolute Fehler in der Spannung bei höheren Geschwindigkeiten viel drastischere Auswirkungen hat und deshalb unbedingt zu vermeiden ist.

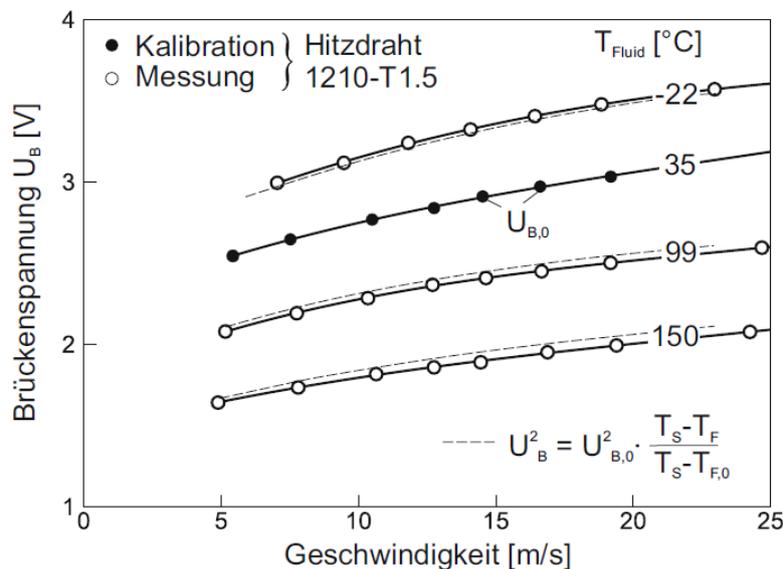


Abbildung 2.13: Spannungen bei unterschiedlichen Temperaturen [Nitsche und Brunn, 2006]

- Druck

Der Wärmeübergang entlang eines Hitzdrahtes ist auch wesentlich von der Dichte des Fluides abhängig. Bei hohen Geschwindigkeiten ( $Ma > 0,3$ ) muss also die Kompressibilität bei gasförmigen Medien berücksichtigt werden. Dies geschieht dadurch, dass zur Kalibrierung nicht nur die Geschwindigkeit, sondern die Massenstromdichte (MSD) herangezogen wird [Poensgen, 1989].

$$MSD = \rho c \quad (27)$$

- Anströmrichtung

Weicht die Anströmrichtung von der Ebene, die Normal auf die Drahtachse steht, ab, so verringert sich die effektive Kühlgeschwindigkeit  $u_{eff}$  und führt somit zu kleineren Heizspannungen. Es gilt für Abbildung 2.14 der einfache Zusammenhang:

$$u_{eff} = u \cdot \cos(\alpha) \quad (28)$$

Die Haltezinken des Hitzdrahtes haben ebenfalls einen Einfluss und werden durch einen zusätzlichen Faktor  $k_T$  (für Korrekturfaktor tangential) berücksichtigt.

$$u_{eff} = u \sqrt{\cos^2(\alpha) + k_T^2 \sin^2(\alpha)} \quad (29)$$

Sollte die Strömung noch eine Abweichung in  $z$ -Richtung besitzen, ist noch zusätzlich eine weitere Korrektur notwendig. Bei Eindrahtsonden ist dies nicht von Relevanz. Eine genauere Beschreibung erfolgt in Kapitel 3.3.2.

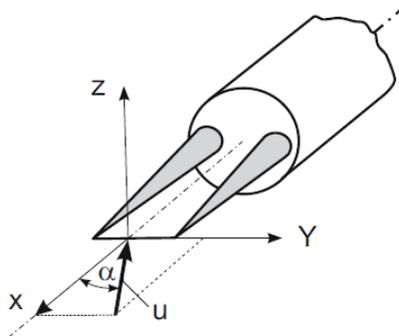


Abbildung 2.14: Schräganströmung eines Hitzdrahtes um den Winkel  $\alpha$  [Nitsche und Brunn, 2006]

- Material

In Tabelle 2.1 sind die physikalischen Eigenschaften typischer Hitzdrahtmaterialien angeführt. Der temperaturabhängige Widerstandskoeffizient sollte möglichst groß sein, da dies zu einer hohen Empfindlichkeit führt. Weiters sollten hohe Drahttemperaturen möglich sein, was jedoch oftmals durch Oxidationsvorgänge begrenzt ist. Umso größer das Längen zu Durchmesser Verhältnis ( $l/d$ ) ist, desto weniger machen sich Endeffekte (an den Halterungen) bemerkbar. In der Praxis werden oftmals Drähte auf Wolframbasis verwendet, weil sie die besten Festigkeitswerte besitzt. Hitzdrähte sind meist zwischen  $5 - 70 \mu m$  im Durchmesser bei einer Länge von meist  $1,25 mm$ .

Tabelle 2.1: Eigenschaften typischer Hitzdrahtmaterialien [Indiger, 2016]

	<b>Einheit</b>	<b>Wolfram</b>	<b>reines Platin</b>	<b>PtRh 10% Rh</b>	<b>PtIr 20% Ir</b>	<b>Nickel</b>
spezifischer Widerstand	$10^8 \Omega\text{m}$	7,0	10,2	18,9	32,0	6,6
Widerstandstemperaturkoeffizient	%/K	0,36	0,38	0,16	0,07	0,64
Dichte	$10^3 \text{ kg/m}^3$	19,3	21,45	19,95	21,61	8,9
spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)	33,0	31,4	35,4	32,0	105,0
Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)	178	69,0	50,1	25,5	90,5
Zugfestigkeit	$10^{10} \text{ N/m}^2$	2,50	0,30	0,60	1,32	0,65
max. Betriebstemperatur	$^{\circ}\text{C}$	300	1200	800	700	400
als Wollaston-Draht verfügbar	–	nein	ja	ja	ja	nein
schweißbar	–	ja (plattiert)	ja	ja	ja	–
lötbar	–	ja (plattiert)	ja	ja	ja	ja
Auswahlkriterium	$10^9 \Omega\text{m/W}$	4,1	5,7	4,4	3,6	4,5

### 3 Praktischer Teil

In diesem Abschnitt wird der gesamte Ablauf einer Hitzdrahtmessung von der Kalibrierung über die Messung bis hin zur Auswertung beschrieben. Dabei wird vor allem auf die Besonderheiten bezüglich der am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik vorhandenen Möglichkeiten eingegangen.

Vorweg soll erwähnt werden, dass der Einsatz von kommerziell erhältlichen CTA- Systemen nicht direkt in thermischen Turbomaschinen möglich ist. Deshalb war es in vielen Bereichen notwendig, selbst eine auf das vorhandene System angepasste Lösung zu finden.

#### 3.1 Messaufbau

Ein vollständiges CTA- System besteht aus den folgenden Komponenten:

- CTA-Frame  
Hier sind die CTA-Module (je Draht ist ein Modul notwendig) untergebracht. Zusätzlich stehen noch drei weitere Anschlüsse (in Abbildung 3.1 links, z.B. für einen Umgebungstemperatursensor, zur Verfügung. Am Institut ist noch ein viertes Modul für die Messung von Temperaturschwankungen verbaut. Dieses Modul benötigt aber einen speziellen Sensor, welcher derzeit nicht vorhanden ist.

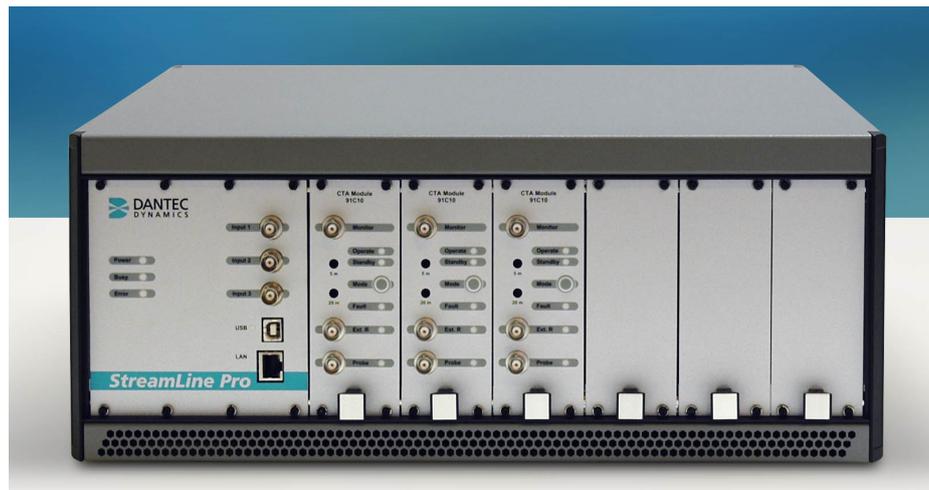


Abbildung 3.1: StreamLine Pro CTA-Frame von DantecDynamics [Dantec Dynamics, 2019]

- Mess-PC  
Der Mess- PC fungiert als zentrale Schnittstelle und übernimmt die Kommunikation zum CTA-Frame, der Kalibriereinheit sowie zur Traversierung (ermöglicht eine automatische Verstellung der Sonde im TTTF).

- Hitzdrahtsensor

Die Messungen wurden mit dem Dreidraht Sensortyp 55R97 von Dantec Dynamics, wie er in Abbildung 3.2 ersichtlich ist, durchgeführt. Dabei wurde aber nicht die serienmäßige Bauform, sondern eine leicht adaptierte Variante (55R97Graz) verwendet. Diese unterscheidet sich durch eine andere Winkelanordnung der Drähte, sodass die Anstellung innerhalb der Strömung optimal erfolgen kann. Weiters steht noch ein Eindrahtsensor (Type 55R03, ebenfalls von Dantec Dynamics) zur Verfügung. Wie bereits erwähnt handelt es sich bei diesen Sensoren um sogenannte Fiber-film probes. Diese sind im Gegensatz zu den herkömmlichen Hitzdrähten robuster ausgeführt. Der Durchmesser des Drahtes beträgt bei den Fiber-film probes in etwa 70 Mikrometer und besteht aus Quarz mit einer überzogenen Nickelschicht als Sensor. Zum Schutz ist noch eine 0,5 Mikrometer dicke Quarzschicht aufgetragen.

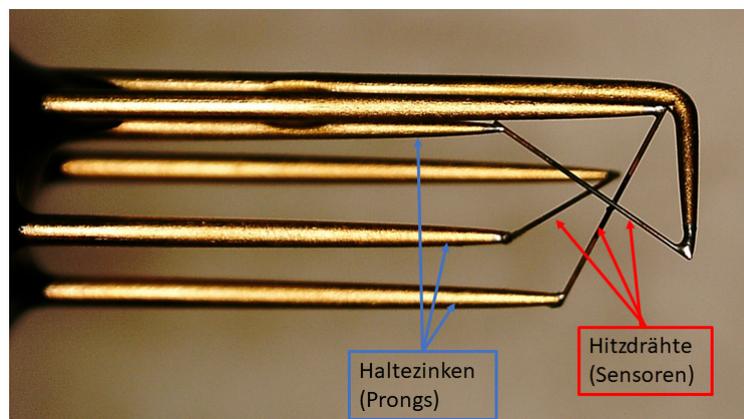


Abbildung 3.2: Mikroskopaufnahme Sensor 55R97Graz von Dantec Dynamics

- Sonde

Die Sonde dient zur sicheren Aufnahme des Sensors und zur Positionierung innerhalb des Prüfstands.

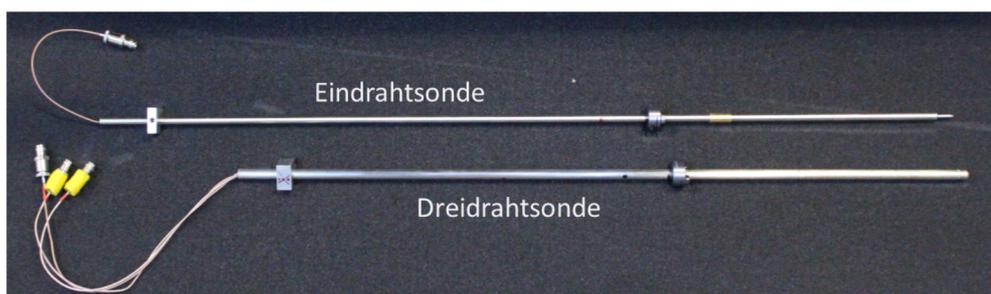


Abbildung 3.3: In der Institutswerkstatt adaptierte Sondenschäfte

- BNC-Kabel  
Mithilfe der sogenannten BNC (Bayonet Neill Concelman)-Kabel erfolgt die elektrische Verbindung von Sensor bzw. Sonde zum CTA-Frame und von dort weiter zu einem Anschlussblock.
- BNC-Anschlussblock  
Dieser ist dem CTA-Frame und dem A/D- Wandler zwischengeschaltet.



Abbildung 3.4: links: BNC-Kabel [Farnell, 2019], rechts: BNC-Anschlussblock [National Instruments, 2019]

- A/D-Wandler  
Der A/D-Wandler PCI-6133 von National Instruments ist direkt im Mess-PC verbaut. Es handelt sich dabei um einen 14 bit Wandler mit simultaner Abtastung der Kanäle.
- Kalibriereinheit  
Mithilfe der Kalibriereinheit, wie in Abbildung 3.5 ersichtlich, kann durch einen Freistrahler eine Geschwindigkeitskalibrierung durchgeführt werden.

In Abbildung 3.6 ist ein Übersichtsschema für eine Zweidrahtsonde dargestellt. Dabei ist gut ersichtlich, dass jegliche Kommunikation vom Mess-PC aus gesteuert wird.

### 3.2 Messmodi

Das Überhitzungsverhältnis  $a$  ist, wie in Abschnitt 2.3.3 gezeigt wurde, stark von der Temperatur abhängig. Die Sensor- bzw. Drahttemperatur  $T_S$  wird ebenfalls unter Zuhilfenahme von  $a$  ermittelt. Deshalb ist es wichtig, sich vor einem Experiment festzulegen, wie verfahren wird. Es gibt folgende Möglichkeiten (nach [Jørgensen, 2005]):

- Fluidtemperatur konstant -  $a$  konstant  
Bleibt die Temperatur zwischen Kalibrierung und Messung (Experiment) konstant ( $\pm 0,5^\circ C$ ) so wird das Überhitzungsverhältnis einmal eingestellt und bleibt anschließend unverändert.



Abbildung 3.5: Kalibriereinheit von Dantec Dynamics mit Pitch-Yaw Manipulator und Sondenhalterung

- Fluidtemperatur variiert - a konstant I  
Der Sensorwiderstand  $R_S(T_{Fluid})$  wird vor jedem Messpunkt neu ermittelt. Durch Vorgabe des konstanten Überhitzungsverhältnisses wird also die Drahttemperatur angepasst. Diese Methode ist aber sehr zeitaufwändig, da das Ausmessen der Sensorwiderstände einige Sekunden dauert.
- Fluidtemperatur variiert - a konstant II  
Das Überhitzungsverhältnis wird einmal eingestellt und dann bei Kalibrierung und Experiment nicht mehr verändert. Der Temperatureinfluss wird anschließend durch eine Korrekturformel, siehe Gleichung 26, minimiert. Diese Vorgangsweise wurde am Institut angewendet.

### 3.3 Kalibrierung

Der Kalibrierung kommt ein immens hoher Stellenwert zu. Ohne eine genaue und zuverlässige Referenzspannung kann nach einer Messung keine zuverlässige Auswertung erfolgen. Am Institut steht dafür eine Kalibriereinheit von Dantec Dynamics zur Verfügung. Diese wird an die hauseigene Druckluftversorgung angeschlossen und stellt einen turbulenzarmen Freistrahл mit bekannter Geschwindigkeit zur Verfügung. Für jeden Sensor muss eine eigene Kalibrierung durchgeführt werden. Dabei ist die Geschwindigkeitskalibrierung, im Gegensatz zur Winkelkalibrierung, immer durchzuführen. Bei Eindrahtsonden kann die Winkelkalibrierung unter Umständen entfallen. Im folgenden wird die Kalibrierung des Sensortyps 55R97Graz anschaulich erläutert.

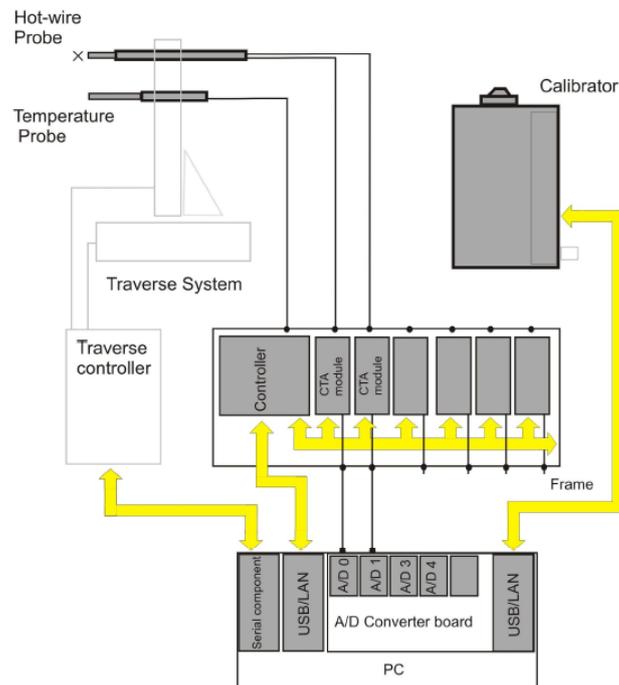


Abbildung 3.6: Übersichtsschema CTA-System [Dantec Dynamics A/S, 2016]

### 3.3.1 Geschwindigkeitskalibrierung

Ziel der Geschwindigkeitskalibrierung ist es, einen Zusammenhang zwischen der Brückenspannung und der Massenstromdichte herzustellen. Da die mitgelieferte Software nicht auf die Massenstromdichte, sondern nur auf die Geschwindigkeit kalibrieren kann, ist dazu eine eigene Software nötig. Die Datenaquisition erfolgt mit einer LabView-Software, siehe dazu auch [Wachter, 2018]. Die Auswertung der Kalibrierkurven erfolgt in Matlab (siehe Anhang A2).

Für eine Kalibrierung von Dreidrahtsonden empfiehlt es sich mindestens zehn Punkte bei unterschiedlicher Geschwindigkeit aufzuzeichnen. Als Richtwert für eine stabile Kalibrierung über den Anwendungsbereich gilt:

$$0,15 \cdot U_{Min,Exp} < U_{Kal} < 1,6 \cdot U_{Max,Exp} \quad (30)$$

$U_{Min,Exp}$  bzw.  $U_{Max,Exp}$  entsprechen der kleinsten bzw. größten im Experiment erwarteten Geschwindigkeit. Je nach Geschwindigkeitsbereich stehen unterschiedliche Düsen, siehe Abbildung 3.7 und Tabelle 3.1, zur Verfügung. Sind die Spannungen ermittelt, werden sie nach Gleichung 26 korrigiert. Anschließend wird durch ein sogenanntes Least-Square-Verfahren eine Polynomapproximation durchgeführt. In Abbildung 3.8 oben ist eine Kalibrierkurve, für einen Draht ersichtlich, wobei Düse III verwendet wurde. Die blauen Kreuze stellen dabei die exakt bekannten Messpunkte dar. Beim Polynomfitting empfiehlt es sich, mehrere Polynome mit unterschiedlichem Grad auszuprobieren. Durch



Abbildung 3.7: Düsen für die Kalibriereinheit von Dantec Dynamics

Tabelle 3.1: Angaben zu den Düsen [Dantec Dynamics A/S, 2016]

Düse	Ø[mm]	$u_{min}$ [m/s]	$u_{max}$ [m/s]
0	42	0,02	5
I	12	0,5	60
II	8,7	5	120
III	5	5	300

einen Fehlerplot, wie in Abbildung 3.8 unten, ist eine leichte Beurteilung und Reihung der unterschiedlichen Ergebnisse möglich. Üblicherweise wird ein gutes Fehlerverhalten mit einem Polynomgrad zwischen 4 und 6 erzielt.

### 3.3.2 Winkelkalibrierung

Bei der Winkelkalibrierung wird ein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit, die effektiv den Draht kühlt, und der Anströmrichtung bestimmt. Bei Dreidrahtsonden erfolgt dies durch die Ermittlung von je zwei Koeffizienten, den sogenannten Pitch- und Yaw-Faktoren, für jeden Draht. Die Geschwindigkeit wird im Kalibrierkanal auf die mittlere zu erwartende Geschwindigkeit im Experiment eingestellt und anschließend nicht mehr verändert.

$$u_{Freistrah} = \frac{1}{2}(U_{Min,Kal} + U_{Max,Kal}) \quad (31)$$

Bei Mehrdrahtsonden wird im allgemeinen zwischen zwei Koordinatensystemen unterschieden. Zum einen gibt es das Sondenkoordinatensystem  $(x,y,z)$  und zum anderen das Sensorkoordinatensystem  $(1,2,3)$ . Es handelt sich dabei jeweils um kartesische, körperfeste Rechtssysteme. Zwischen diesen beiden Systemen besteht eine feste Beziehung. In Tabelle 3.2 ist angegeben, wie die Achsen zueinander verdreht sind. Diese Werte sind für jeden Sensortyp vom Hersteller zu entnehmen. Das Sondenkoordinatensystem bezieht sich auf die Kalibriereinheit. In Abbildung 3.9 ist das Sondenkoordinatensystem in rot eingezeichnet. In blauer Farbe ist das Sensorkoordinatensystem dargestellt (vergleiche hierzu mit Tabelle 3.2) oder besser gesagt, die Linien auf welchen die Koordinatenachsen liegen. Die Geschwindigkeit  $u$  des Freistrahls ist bei neutraler Sondenstellung entlang der  $x$ -Achse. Das heißt die Geschwindigkeiten  $v$  und  $w$  in  $y$ - und  $z$ -Richtung sind also Null. Bei einer reinen Drehung um einen bestimmten Yaw-Winkel (Drehung der Sonde um

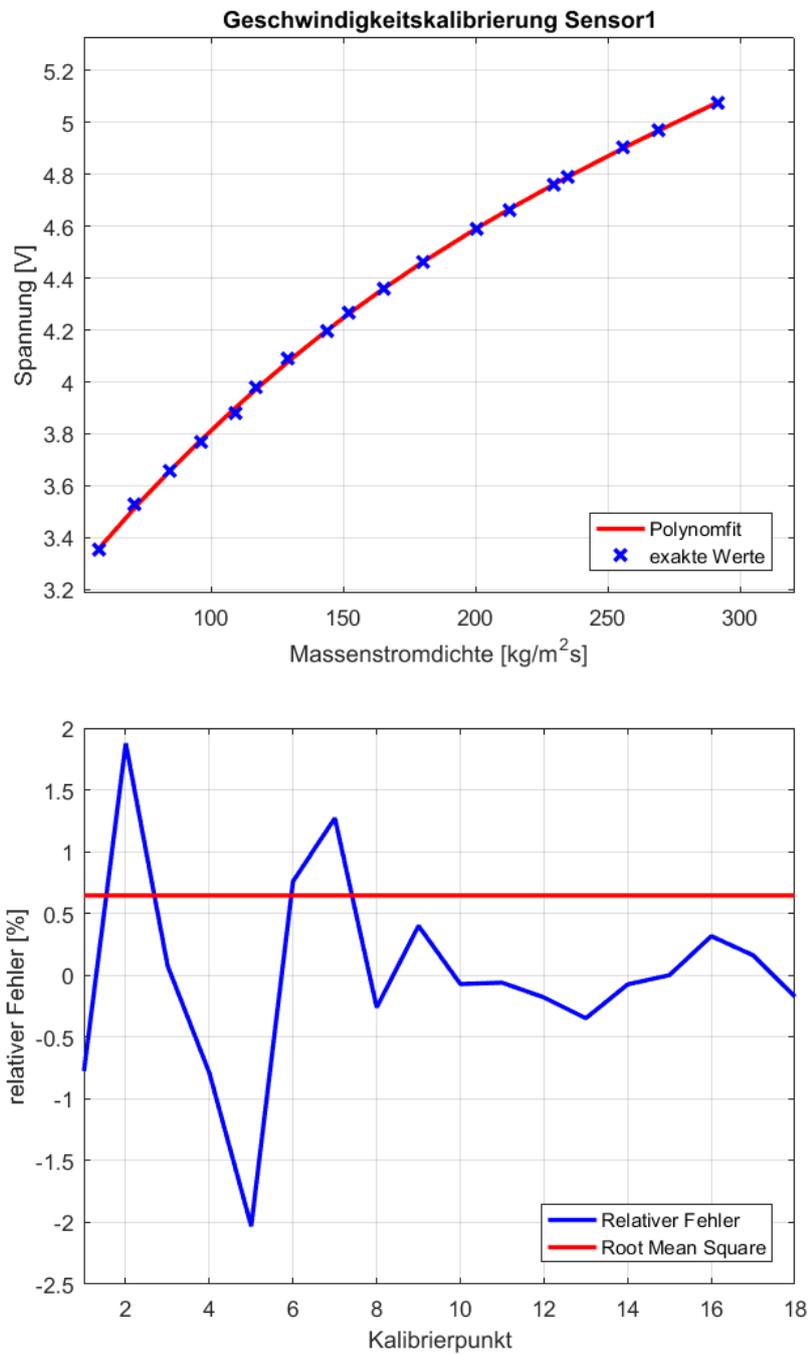


Abbildung 3.8: oben: Kalibrierkurve, unten: Fehlerkurve für einen Draht bei der Geschwindigkeitskalibrierung des Sensors 55R97Graz

die x-Achse) ändern sich die Geschwindigkeitsverhältnisse nicht. Wird jedoch zuerst um einen bestimmten Pitch-Winkel (Drehung der Sonde um die z-Achse) verdreht, so ändern sich im Sondenkoordinatensystem alle Geschwindigkeiten. Die effektiven Kühlgeschwin-

Tabelle 3.2: Winkel zwischen Sensor- und Sondenkoordinatensystem für den Sensortyp 55R97Graz

-	1	2	3
x	54,73°	54,73°	54,73°
y	45°	135°	90°
z	65,9°	65,9°	144,73°

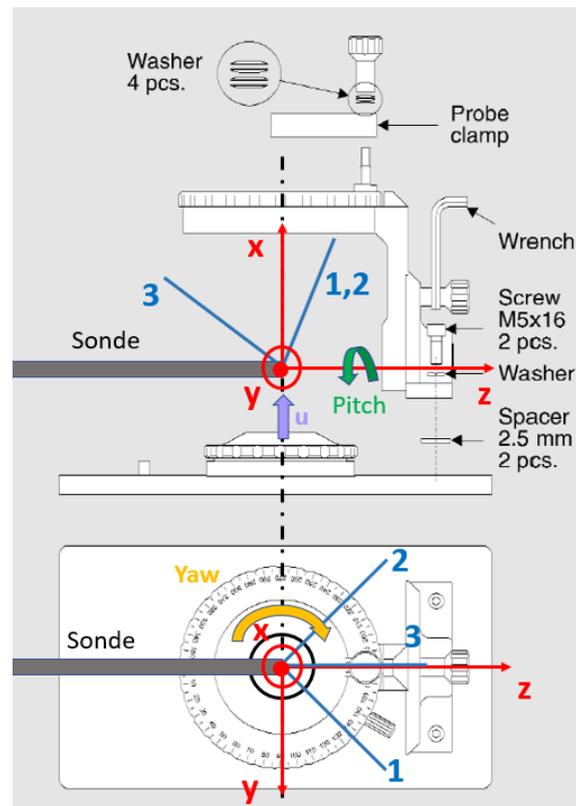


Abbildung 3.9: Sonden- und Sensorkoordinatensystem bei der Kalibrierung [Dantec Dynamics A/S, 2016] abgewandelt

digkeiten  $U_{i,eff}$  (für  $i$  gilt in weiterer Folge immer  $i = 1, 2, 3$ ) für die Drähte setzen sich aus der normal auf den jeweiligen Draht auftreffenden Geschwindigkeit und aus Anteilen der jeweils tangential bzw. binormal auftreffenden Geschwindigkeit zusammen. Es gilt daher folgender Zusammenhang (aus [Dantec Dynamics A/S, 2016]):

$$U_{1,eff}^2 = k_1^2 \cdot U_1^2 + U_2^2 + h_1^2 \cdot U_3^2 \quad (32)$$

$$U_{2,eff}^2 = h_2^2 \cdot U_1^2 + k_2^2 \cdot U_2^2 + U_3^2 \quad (33)$$

$$U_{3,eff}^2 = U_1^2 + h_3^2 \cdot U_2^2 + k_3^2 \cdot U_3^2 \quad (34)$$

Mit  $k^2$  als Yaw-Faktor (Korrektur für tangentialen Anteil) und  $h^2$  als Pitch-Faktor (Korrektur für binormalen Anteil).  $U_{i,eff}^2$  kann durch den Ausdruck  $U_{i,Kal}^2 \cdot (1 + k_i^2 + h_i^2)$  ersetzt werden.

$$U_{1,Kal}^2 \cdot \cos^2(54,736^\circ)(1 + k_1^2 + h_1^2) = k_1^2 \cdot U_1^2 + U_2^2 + h_1^2 \cdot U_3^2 \quad (35)$$

$$U_{2,Kal}^2 \cdot \cos^2(54,736^\circ)(1 + k_2^2 + h_2^2) = h_2^2 \cdot U_1^2 + k_2^2 \cdot U_2^2 + U_3^2 \quad (36)$$

$$U_{3,Kal}^2 \cdot \cos^2(54,736^\circ)(1 + k_3^2 + h_3^2) = U_1^2 + h_3^2 \cdot U_2^2 + k_3^2 \cdot U_3^2 \quad (37)$$

Die drei Geschwindigkeiten im Sensorkoordinatensystem  $U_1, U_2$  und  $U_3$  sind durch die bekannte Geschwindigkeit  $u$  des Freistrahls im Kalibrierkanal, sowie den bekannten Verdrehungen um Yaw( $\beta$ )- und Pitch( $\gamma$ )-Winkel und der Kenntnis der Winkel zwischen Sensor- und Sondenkoordinatensystem (siehe Tabelle 3.2) einfach zu berechnen. Die Definitionen der Drehmatrizen um die beiden Achsen lauten wie folgt:

$$R_x(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$R = R_z(\gamma) \cdot R_x(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma)\cos(\beta) & \sin(\gamma)\sin(\beta) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma)\cos(\beta) & -\sin(\beta)\cos(\gamma) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (40)$$

Die Geschwindigkeiten im gedrehten körperfesten Koordinatensystem(x,y,z) ergeben sich durch Multiplikation mit dem Geschwindigkeitsvektor  $\vec{u}$  (dieser ist raumfest) des Freistrahls [Wikipedia, 2019].

$$U_{x,y,z}^{\vec{}} = R^T \cdot \vec{u} \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma)\cos(\beta) & \cos(\gamma)\cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\gamma)\sin(\beta) & -\sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = u \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \\ -\sin(\gamma)\cos(\beta) \\ \sin(\gamma)\sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (43)$$

Durch Multiplikation mit den Cosinuswerten der Winkel erhält man nun die Geschwindigkeiten in Sensorkoordinatensystem [Dantec Dynamics A/S, 2016].

$$U_{123}^{\vec{}} = A \cdot U_{xyz}^{\vec{}} \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(54,73^\circ) & \cos(45^\circ) & \cos(65,9^\circ) \\ \cos(54,73^\circ) & \cos(135^\circ) & \cos(65,9^\circ) \\ \cos(54,73^\circ) & \cos(90^\circ) & \cos(144,73^\circ) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} \quad (45)$$

Die Geschwindigkeiten im Sensorkoordinatensystem liegen nun auf zweierlei Arten vor. Durch die gemessene Spannung an den Hitzdrähten und der zuvor getätigten Geschwindigkeitskalibrierung sind in den Gleichungen 35 bis 37 die Kalibriergeschwindigkeiten  $U_{i,Kal}$  bekannt. Weiters sind die exakt herrschenden Geschwindigkeiten  $U_i$  durch obige Berechnung im Sensorkoordinatensystem bekannt. Mithilfe eines nichtlinearen Regressionsmodelles kann für eine Punkteschar das Gleichungssystem 35 bis 37 gelöst und somit die Pitch- und Yawkoeffizienten  $h_i$  bzw.  $k_i$  bestimmt werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Pitch- und Yaw-Angle bei der Kalibrierung nicht mit jenen bei der späteren Auswertung (also im Turbinenprüfstand) verwandt sind. Es handelt sich dabei um vollkommen andere Winkel, lediglich die Namensgebung ist ident.

### 3.3.3 Erkenntnisse aus durchgeführten Kalibrierungen

In diesem Abschnitt werden die gemachten Erfahrungen bei der Kalibrierung mit dem am Institut zur Verfügung stehendem Equipment festgehalten. Die Kalibrierung ist für die Qualität der Messergebnisse von allergrößter Bedeutung. Aus diesem Grund muss dieser Vorgang sorgfältig und aufmerksam durchgeführt werden.

#### Sondeneinrichtung bzw. Sensorpositionierung

Die Originalsonden von Dantec Dynamics sind wesentlich kleiner als die am Institut benötigten. Aus diesem Grund wurden diese in größere Sondenschäfte (siehe auch Abbildung 3.3) verbaut. Dies führt insgesamt zu längeren, aber auch deutlich schwereren Sonden für welche die Kalibriereinheit mit Pitch-/Yaw Manipulator nicht ausgelegt ist. Um eine möglichst genaue Positionierung gewährleisten zu können, wurde eine neue Sondenhalterung (dargestellt in Abbildung 3.10 oben), welche im Vergleich zu der bereits vorhandenen wesentlich steifer ist, konstruiert und gefertigt.

Der Sensor wird von der Sonde aufgenommen. Dabei ist die Nut am Sensor respektive die Markierung auf der Sonde zu beachten (siehe auch Abbildung 3.10 mitte). Bei einer Messung im TTTF ist aufgrund von Vibrationen ein O-Ring bzw. ein Stück von einem O-Ring in die Verschlusskappe einzulegen, sodass der Sensor möglichst gut festgeklemmt wird. Die Positionierung der Sonde ist mithilfe der Sondenhalterung so vorzunehmen, dass der Sensor sich mittig über der Düsenöffnung befindet und die Sondenlängsachse mit der Drehachse des Pitch-Winkels deckungsgleich ist. Besonders bei der Düse III ist dies aufgrund der kleinen Öffnung von großer Bedeutung. Eine Lochblende und ein Sonden-dummy, in Abbildung 3.10 mitte ersichtlich, sollten bei der Einrichtung behilflich sein.

Bei CTA-Messsystemen handelt es sich generell um sehr empfindliche Messhardware. Nachdem das StreamLinePro Frame mit dem Sensor durch BNC-Kabel verbunden wurde, sollte umgehend auf eine geeignete Zugentlastung, siehe auch Abbildung 3.10 unten, der BNC-Verbindungen erfolgen, da ansonsten die Gefahr besteht, dass die sensiblen

Krimpverbindungen in Mitleidenschaft gezogen werden.

In Abbildung 3.11 sind Kalibrierkurven der drei unterschiedlichen Düsen ersichtlich. Nach Tabelle 3.1 gibt es gewisse Überlappungsbereiche bei der Geschwindigkeit. Die Kalibrierkurven von Düse I und Düse II sind für jeden Draht (Sensor) des Typs 55R97Graz nahezu ident. Dies bedeutet, dass mit den unterschiedlichen Düsen I bzw. II bei gleicher Geschwindigkeit die gleiche Spannung gemessen wird. Auffallend ist, dass im Überlappungsbereich von Düse II und III eine Diskrepanz besteht. Die Spannung, welche mit Düse III gemessen wurde, ist über alle Sensoren jeweils niedriger. Dieser Sachverhalt ist nur dadurch zu erklären, dass bei Düse III die Annahme einer gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung nicht mehr zutrifft. Gründe dafür sind die kleine Düsenöffnung und dadurch ein kleiner Durchmesser des Freistrahls kombiniert mit dem Fehler des nicht exakt positionierbaren Sensors. Bei der Winkelkalibrierung, bei welcher die Sonde um Pitch- und Yaw-Winkel verstellt wird, vergrößert sich dieser Fehler zusätzlich, da jede Abweichung von den Drehachsen zu einer zusätzlichen Verschiebung des Sensors aus dem Freistrahlführt. Diese Ursachen machen eine vernünftige Winkelkalibrierung mit Düse III, welche aufgrund der hohen Geschwindigkeiten im TTTF verwendet werden muss, nahezu unmöglich. Glücklicherweise ist die Winkelkalibrierung nur bei sehr hoher Genauigkeit erforderlich. In den meisten Fällen kann mit den Defaultwerten für die Pitch- und Yawkoeffizienten vom Sensorhersteller eine ausreichend hohe Qualität erzielt werden. Für das Gleichungssystem 35 bis 37 ergibt sich somit die Koeffizientenmatrix wie folgt: [Dantec Dynamics A/S, 2016]

$$\begin{bmatrix} k_1^2 & 1 & h_1^2 \\ h_2^2 & k_2^2 & 1 \\ 1 & h_3^2 & k_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0225 & 1 & 1,04 \\ 1,04 & 0,0225 & 1 \\ 1 & 1,04 & 0,0225 \end{bmatrix} \quad (46)$$

### Temperatureinfluss

Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 erwähnt, hat die Temperatur einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Spannung. Um eine möglichst genaue Kalibrierung zu erhalten, ist es deshalb unbedingt notwendig, bei der gleichen Fluidtemperatur, wie sie im Experiment erwartet wird, zu kalibrieren. Die mittlere Temperatur im TTTF ist aus vorhergegangenen Versuchsfahrten mit Temperaturreakes<sup>2</sup> bekannt und beträgt bei diesem Setup in etwa 58°C. Da die Kalibriereinheit über keine Möglichkeit zur Lufterwärmung verfügt, wird dieser ein Lufterhitzer (siehe Abbildung 3.12) vorgeschaltet (genauere Informationen zur Funktionsweise dazu finden sich in [Wachter, 2018]). An dieser Stelle sei angemerkt, dass auf der heißen Seite nur mehr mit speziellen Thermodruckluftschläuchen (in Abbildung 3.12 in weiß ersichtlich) verfahren werden darf.

---

<sup>2</sup>Mit einem Temperaturreake ist die gleichzeitige Messung der Temperatur an einer Umfangersposition, aber an mehreren Radialpositionen im TTTF (also über die Kanalhöhe) möglich



Abbildung 3.10: oben: Sondenhalterung, mitte: Sensor, Verschlusskappe, Lochblende und Sondendummy, unten: Zugentlastung

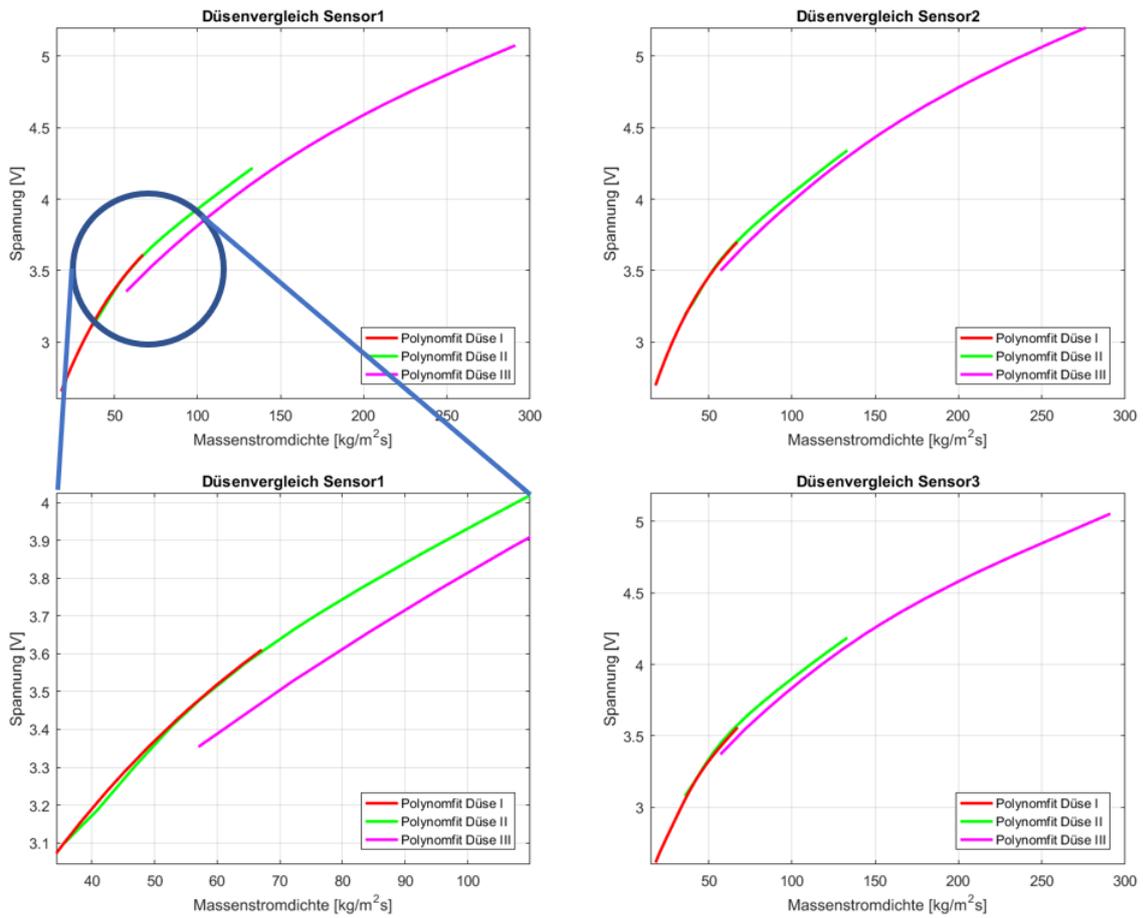


Abbildung 3.11: Vergleich der Düsen

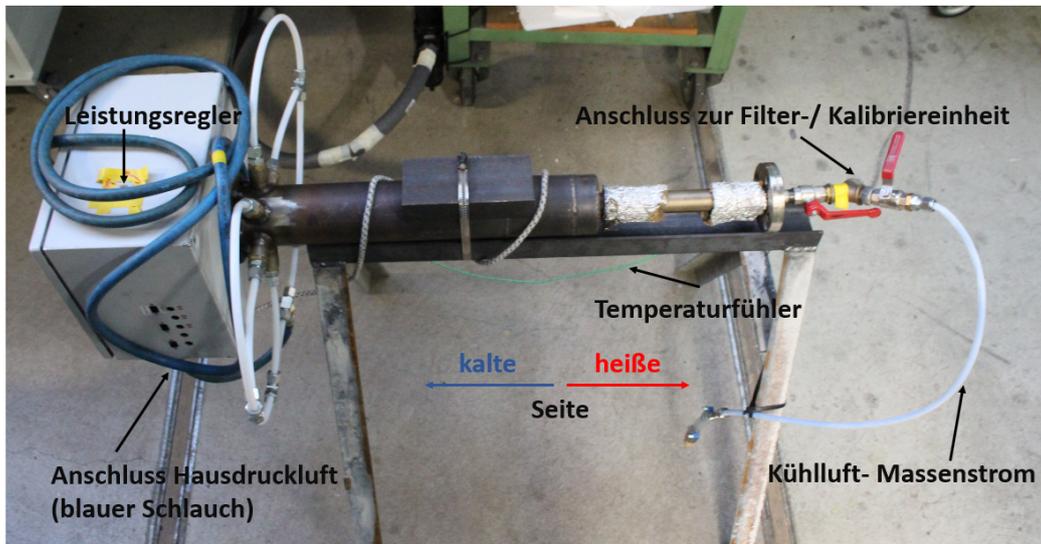


Abbildung 3.12: Luftherhitzer

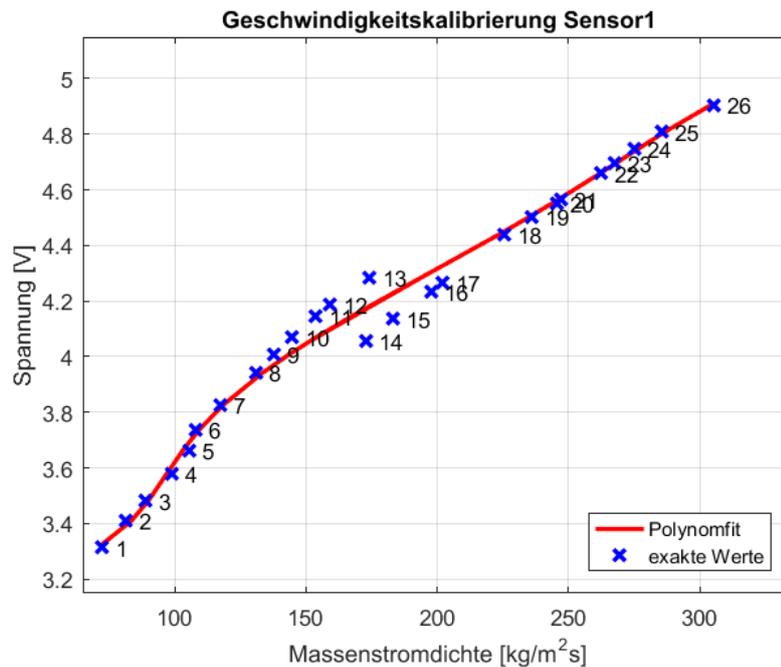


Abbildung 3.13: Kalibrierkurve unter Temperatureinfluss

Um ein schnelles Aufwärmen bzw. Durchwärmen der Kalibriereinheit zu erreichen, empfiehlt es sich, die höchstmögliche Geschwindigkeit des Freistrahls bei maximaler Heizleistung einzustellen. In Abbildung 3.13 ist eine Kalibrierkurve unter dem Temperatureinfluss zu sehen. Zwischen den Kalibrierpunkten Nummer 13 und 14 ist ein großer Spannungsunterschied ersichtlich. Die Punkteschar scheint an dieser Stelle eine Unstetigkeit zu besitzen. Für eine genauere Betrachtung sind in Tabelle 3.3 die zu Abbildung 3.13 erfassten Parameter bei der Kalibrierung angefügt. Dabei wird ersichtlich, dass zwischen Punkt 13 und 14 ein Temperatursprung nach oben und somit ein Spannungssprung nach unten erfolgt. Wird die Kalibrierkurve von Abbildung 3.13 mit jener von Abbildung 3.8 (Kalibrierung bei Umgebungstemperatur) verglichen, so wird der Einfluss der Temperatur deutlich sichtbar und dies obwohl eine Temperaturkorrektur der Spannungen durchgeführt wurde. Weiters fällt auch auf, dass die Temperatur allgemein Schwankungen ausgesetzt ist und scheinbar nur schwer regelbar ist. Dieses Verhalten wird durch die folgenden Umstände verursacht:

- Druckluftherhitzer  
Die Regelung des Druckluftherhitzers kann zum einen durch den Kühlmassenstrom, welcher an die Umgebung abgegeben wird und zum anderen durch ein Leistungspotentiometer geregelt werden. Diese Einstellungen sind per Hand durchzuführen und gegebenenfalls anzupassen.
- Kalibriereinheit  
Die Kalibriereinheit besteht überwiegend aus metallischen und daher sehr wärme-

Tabelle 3.3: Wertetabelle der Kalibrierpunkte für den Sensor 1

Messpunkt	Temperatur [°C]	Geschwindigkeit [m/s]	Spannung - Sensor 1 [V]
1	57,67	70,07	3,29
2	57,80	78,73	3,38
3	57,79	85,84	3,45
4	57,67	95,30	3,53
5	56,81	101,27	3,60
6	56,34	103,35	3,67
7	55,61	111,81	3,74
8	54,85	123,90	3,84
9	54,07	129,71	3,89
10	53,30	135,50	3,94
11	52,60	143,10	3,99
12	51,95	147,59	4,02
13	51,43	160,28	4,10
14	58,62	162,62	3,93
15	58,64	171,45	3,99
16	58,50	183,77	4,07
17	58,34	187,25	4,10
18	56,72	205,58	4,21
19	56,43	213,73	4,25
20	56,29	221,15	4,28
21	55,97	222,19	4,29
22	55,60	233,58	4,35
23	55,25	237,26	4,38
24	54,86	242,59	4,41
25	54,37	249,86	4,44
26	54,10	263,80	4,50

leitfähigen Werkstoffen, was zu einer erheblichen Abgabe an die Umgebung führt. Die Wärme wird mit dem Luftmassenstrom eingebracht. Wird nun mit der Software Automatic Calibrator Tool von Dantec die Geschwindigkeit eines Messpunktes eingestellt, so wird die Luftzufuhr jedesmal kurz unterbrochen und danach startet ein iterativer Prozess bis die gewünschte Geschwindigkeit erreicht ist. Dieses Verfahren kann bis zu einer Minute dauern und währenddessen kann sich die Temperatur durch die Parametervariation schon wieder geändert haben. Es liegt auch in der Natur der Sache, dass sich bei der Geschwindigkeitskalibrierung die Geschwindigkeit und somit natürlich auch der Massenstrom ständig verändert. Es ist also immer ein händisches Nachregeln am Druckluftherhitzer notwendig.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es durch die händische Regelung schier unmöglich ist, die Temperatur konstant zu halten. Als Abhilfe wurde die Kalibriereinheit mit einer Isolierung aus EPS Polystyrol Hartschaumplatten umhüllt. Dies führt zu einer größeren thermischen Trägheit und erleichtert somit das Temperaturmanagement. Der Anwender bekommt aber bei der Durchführung von Kalibrierungen schnell ein Gefühl für das Verhalten der Komponenten und ist schnell in der Lage, vernünftige Ergebnisse zu erzielen.

An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass die Temperatur aus Tabelle 3.3 in einem Druckluftreservoir in der Kalibriereinheit gemessen wird. Für eine exakte Kalibrierung müsste die Temperatur des Freistrahls möglichst nahe am Sensor gemessen werden. Dies ist bei diesem Setup aber nicht möglich. Des Weiteren ist aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit und des kurzen Weges die Annahme einer isothermen Strömung im Freistrahл durchaus zulässig.

### 3.4 Messung im TTTF

Wie bereits erwähnt, fand die eigentliche Messung am Turbinenprüfstand des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik statt. Im nachfolgenden Abschnitt wird der Messablauf mit all seinen notwendigen Schritten näher beschrieben.

#### 3.4.1 Sondeneinbau

Der Einbau einer Sonde mit dem Hitzdrahtsensor ist ein kritischer Prozess und muss daher mit größter Sorgfalt durchgeführt werden. Bei unsachgemäßer Durchführung kann es zur Zerstörung des Sensors und damit bei Ersatz zu hohen Kosten kommen.

Die Sonde wird von einer Traversierung, welche anschließend am Prüfstand befestigt werden kann, aufgenommen. In Abbildung 3.15 sind die Traversierung und eine schematische Skizze in eingebautem Zustand im TTTF zu sehen. An dieser Stelle wird der Einbauprozess schrittweise beschrieben:

1. Die Traversierung wird mittels der Linearachse auf den Nullpunkt eingestellt. Anschließend erfolgt der Einbau am Prüfstand.
2. Die Sonde wird ohne Sensor bis zum Anschlag (=Auftreffen auf der Nabe) eingeschoben. Hierbei gilt es, dies langsam und vorsichtig durchzuführen, sodass die



Abbildung 3.14: Kalibriereinheit mit Wärmedämmplatten isoliert

Sonde nicht beschädigt wird. An der Sonde befindet sich ein Mitnehmer, (vergleiche dazu auch in Abbildung 2.12 die Teile rechts auf der Sonde) wodurch eine feste Verbindung durch Klemmung mit der Traversiereinheit möglich ist. Es erfolgt eine Klemmung der Sonde im eingeschobenen Zustand. Alternativ kann auch nur eine Markierung an der Sonde beim Mitnehmer gemacht werden. Danach werden Traversierung und Sonde wieder ausgebaut.

3. Der Sensor wird in die Sonde eingesteckt und mit der Verschlusskappe festgeklemmt (Achtung: O- Ring nicht vergessen). Die Nullposition muss nach dem Sensoreinbau korrigiert werden. Dazu wird mit dem Messschieber die Distanz zwischen Sondenanfang und Sensormitte (Mittelpunkt der Drähte) gemessen. In Abbildung 3.16 stellt dies dann die Korrektur Sensorlänge dar. Die Größe  $x$  ergibt sich aus der halben Sensorgröße (vom Drahtmittelpunkt zum Ende) plus einem Sicherheitsabstand zur Nabe. Die Abmessungen der Drähte können vom Hersteller entnommen werden. Für den Sensortyp 55R97Graz hat sich  $x$  wie folgt ergeben:

$$x = \frac{3,1}{2} + 1 = 2,55 \text{ mm} \quad (47)$$

Der Sicherheitsabstand ist aufgrund etwaiger Messfehler notwendig. Anschließend kann der Mitnehmer um die Gesamtkorrektur Richtung Sensor verschoben und festgeklemmt werden.

4. Mithilfe der Rotationsmöglichkeit der Traversierung um die Sondenachse, einem digitalen Neigungsmessgerät und einer Positionreferenz auf der Sonde (vergleiche

dazu in Abbildung 2.12 die quaderförmigen Teile auf der linken Seite der Sonde) kann der Sensor genau in Strömungsrichtung positioniert werden.

5. Zum sicheren Einbau am Prüfstand wird der Sensor in das Sondenloch eingefahren und ist somit gut geschützt.
6. Abschließend ist eine Verbindung mittels BNC-Kabel zum CTA-Frame vorzunehmen. Dabei ist zu beachten, dass der Prüfstand im Betrieb bis zu 140°C heiß wird und deshalb Berührungen mit den Kabeln vermieden werden müssen.

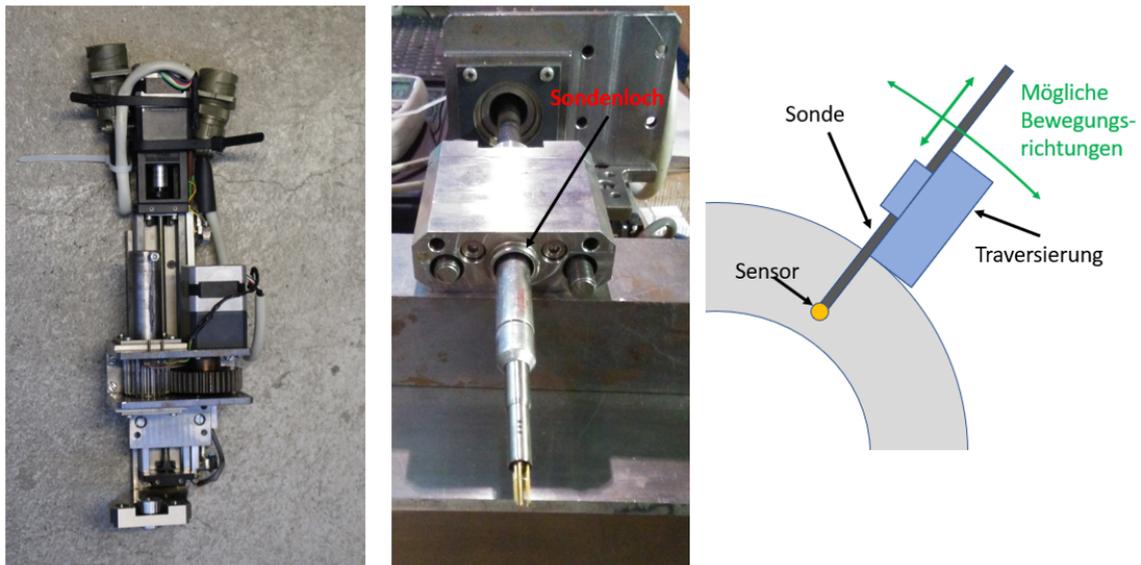


Abbildung 3.15: links: Traversiereinheit, mitte: Sonde mit Sensor in Traversierung, rechts: schematische Darstellung

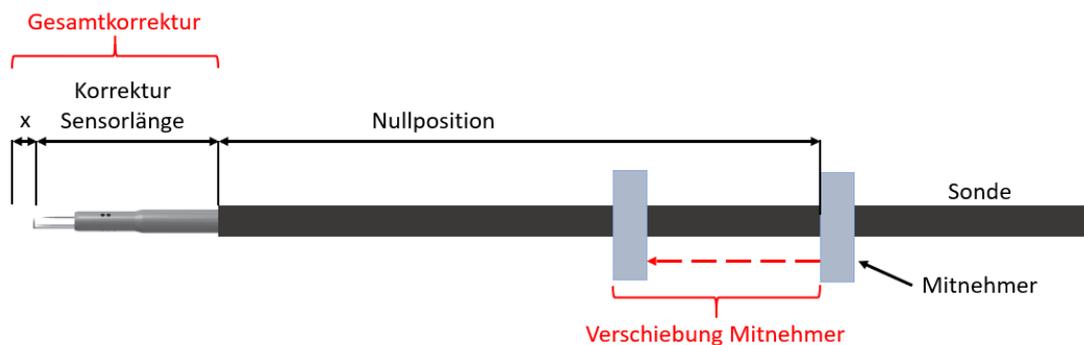


Abbildung 3.16: Skizze zur Längenkorrektur beim Sondeneinbau

#### 3.4.2 Versuchsfahrt

Die Versuchsfahrten am TTTF finden immer spät nachmittags bzw. in der Nacht statt. Grund dafür ist der hohe elektrische Leistungsbedarf der Verdichterstation, welcher tagsüber hohe Stromspitzen verursachen würde. Dies bedeutet aber auch, dass Versuchsfahrten am TTTF zeitlich begrenzt sind, was bei der Versuchsplanung berücksichtigt werden muss. Die Versuchsfahrt wird von der Turbinenwarte aus permanent beobachtet. Im folgenden wird der Ablauf einer typischen Versuchsfahrt beschrieben:

1. Start der Verdichterstation, welche sich im Kellergeschoss der Versuchshalle befindet.
2. Kontrolliertes Hochfahren des Prüfstandes. Die Turbine wird dabei auf ca.  $10000 U/min$  beschleunigt. Dabei ist besondere Vorsicht in den Resonanzbereichen geboten.
3. Einstellen des Betriebspunktes und Warten auf thermisches Gleichgewicht. Dieser Vorgang kann mitunter sehr lange (bis zu 3 Stunden) dauern. Der Prüfstand muss sich vollständig erwärmen, da ein stabiler Betriebspunkt erst dann erreicht ist, wenn sich Temperatur, Druckverhältnisse und Massenstrom nicht mehr ändern. Um die diversen Parameter einzustellen stehen einige Möglichkeiten zur Verfügung, deren Handhabung einiges an Erfahrung benötigt.
4. Ist der gewünschte Betriebspunkt erreicht, kann die Messung starten. Zuerst erfolgt eine Referenzfahrt in Umfangsrichtung, sodass die Traversiereinheit und damit der Hitzdrahtsensor sich an der richtigen Position befinden. Anschließend wird der Sensor aus dem Sondenloch zum ersten Messpunkt hin ausgefahren. In Abbildung 3.17 ist das Messgitter mit allen, insgesamt 480, Messpunkten dargestellt. Für Turbulenzuntersuchungen ist eine feine räumliche Auflösung notwendig. Diese wurde auf die Bereiche in Wandnähe beschränkt, da dort die Sekundärströmungen am stärksten wirken. In der Mitte des Kanals wurde eine große räumliche Schrittweite gewählt. Das abgebildete Messgitter für die Hitzdrahtanemometrie entspricht genau jenem Messgitter, mit welchem zuvor Fünflochsonden- und FRAPP-Messungen durchgeführt wurden. Aus den Fünflochsondenmessungen konnten bereits Strömungswinkel ermittelt werden, sodass es möglich war, den Hitzdrahtsensor optimal in die Hauptströmungsrichtung anzustellen. Das Messgitter wird schlangenförmig abgefahren. An jedem Messpunkt werden für eine Dauer von 4 Sekunden mit einer Frequenz von 250 kHz die Messsignale abgetastet. Es sind dies die drei Brückenspannungen des CTA-Frames und zusätzlich ein Triggersignal, welches pro Rotorumdrehung einen Impuls abgibt. In der Turbinenwarte kann durch eine Fourieranalyse der Spannungssignale festgestellt werden, ob jeder der drei Hitzdrähte noch einwandfrei funktioniert. Zu Kontrollzwecken der Periodizität, wird in Umfangsrichtung ca. 1,2-mal die Schaufelteilung des Leitrades abgefahren.

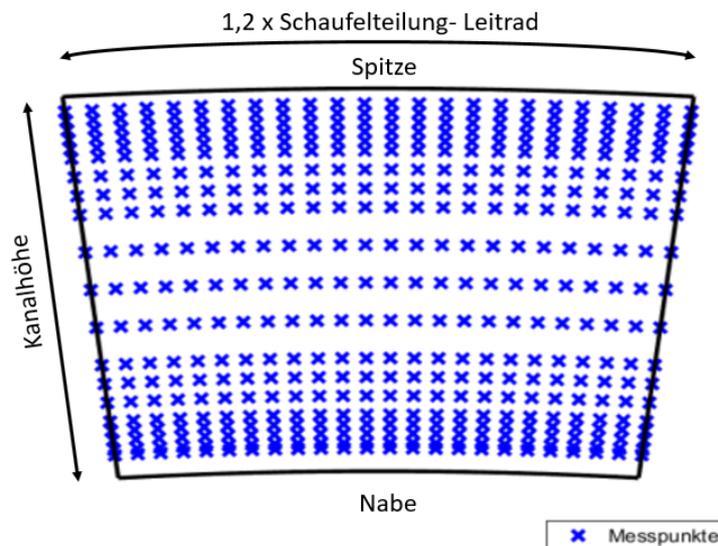


Abbildung 3.17: schematische Darstellung des Messgitters im TTF

5. Nachdem alle Messungen erfolgt sind, wird der Prüfstand kontrolliert heruntergefahren und es kann anschließend die Sonde mit Sensor wieder ausgebaut werden.

Auf dem Messrechner liegen die gesammelten Rohdaten. Mithilfe der Kalibrierdateien steht einer Auswertung der Messergebnisse nichts mehr im Wege.

### 3.5 Auswertung

Die Auswertung erfolgte mittels Matlab (der Programmcode ist in A3 ersichtlich). An dieser Stelle wird lediglich auf einige Besonderheiten, die von allgemeinem Interesse sind, eingegangen. Anschließend erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse.

#### 3.5.1 Allgemeines

Da der Druck und die Temperatur während der Versuchsfahrt mit dem Hitzdrahtanemometer nicht gemessen werden konnte, wurden dafür Berechnungsvorschriften, wie folgt, herangezogen:

$$T_{stat} = \frac{T_{39,CTA}}{T_{39,FLS}} \cdot T_{stat,FLS} \quad (48)$$

$$p_{stat} = \frac{p_{39,CTA}}{p_{39,FLS}} \cdot p_{stat,FLS} \quad (49)$$

Dabei stehen die Indizes FLS für Fünflochsonde, CTA für Constant Temperature Anemometry und 39 für die Mischkammer.

Eine wichtige dimensionslose Kennzahl ist die Machzahl  $Ma$

$$Ma = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{c_x^2 + c_r^2 + c_t^2}}{\sqrt{\kappa RT}} \quad (50)$$

mit  $c_x, c_r$  und  $c_t$  für die Geschwindigkeiten in Axial-, Radial- und Tangentialrichtung und  $a$  für die örtliche Schallgeschwindigkeit von Luft in Abhängigkeit von der Temperatur. In Abbildung 3.18 sind die Definitionen der unterschiedlichen Winkel eingezeichnet. Dabei wird der radiale Strömungswinkel als Pitch-Angle ( $\gamma$ ) und der tangential Strömungswinkel als Yaw-Angle ( $\alpha$ ) bezeichnet. Wie bereits erwähnt, sind diese Winkel nicht mit jenen von der Winkelkalibrierung zu verwechseln.

$$\gamma = \arctan\left(\frac{c_r}{c_x}\right) \quad (51)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{c_t}{c_m}\right) \quad (52)$$

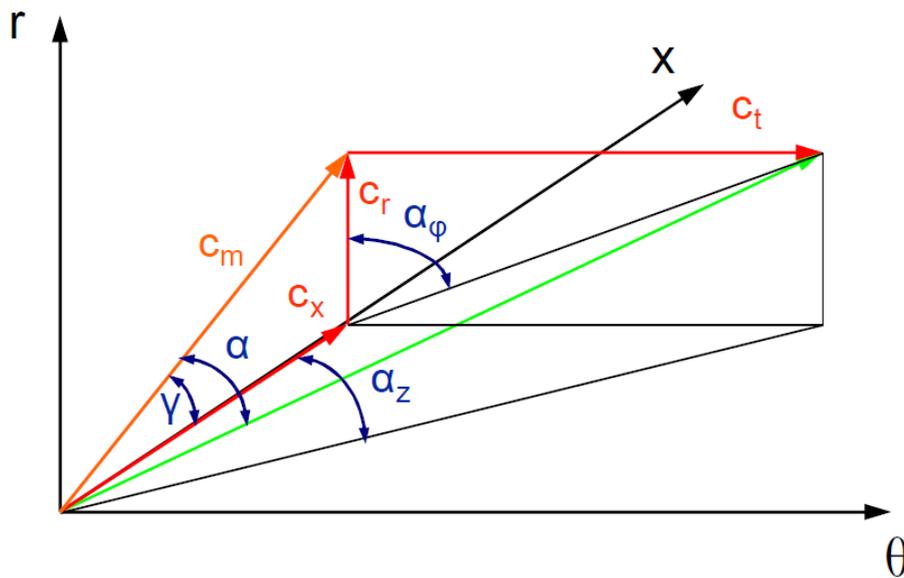


Abbildung 3.18: Darstellung der unterschiedlichen Winkel [Zerobin, 2018]

Wie in Abschnitt 2.1.1 bereits erwähnt wurde, sollte bei Berücksichtigung der Kompressibilität eine Massenmittelung der Strömungsgrößen stattfinden. Da die Dichte an den Messpunkten aber nicht exakt bekannt ist, wurden die Ergebnisse flächengemittelt (AAV - Area Averaged).

$$\overline{\Phi}_{AAV} = \frac{\sum \Phi_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (53)$$

Da das Versuchssetup von einem namhaften Turbinenhersteller zur Verfügung gestellt wurde, werden die anschließenden Ergebnisse aus Datenschutzgründen normiert dargestellt. Des Weiteren sind alle nachfolgenden Abbildungen in ihrer Größe verzerrt.

#### 3.5.2 Zeitgemittelte Ergebnisse

In den Abbildungen 3.19 bis 3.24 sind Matlab Plots verschiedener Größen über die Zeit gemittelt dargestellt. Eine genaue Interpretation der Ergebnisse ist sehr schwierig und bedarf einiges an Erfahrung im Bereich der Strömungen in Turbomaschinen. Weiters wurde bisher nur eine CTA-Messung durchgeführt und somit ist eine Beobachtung der Veränderungen von Strömungsstrukturen bei Parametervariation nicht möglich. Aus diesen Gründen erfolgt lediglich eine grobe Beschreibung dieser Ergebnisse.

In Abbildung 3.19 sind mehrere Phänomene gut ersichtlich. An der Nabe ist die Geschwindigkeit relativ gering und steigt mit der Kanalhöhe bis zu den Blattspitzen hin an. Aufgrund der Spitzenüberströmung ist die absolute Geschwindigkeit im Spitzenbereich am höchsten. Alle Darstellungen zeigen einen Ausschnitt über ca. 1,2 Leitrad-Schaufelteilungen. Der Einfluss des Leitrades in Form von Nachlaufdübeln in der Strömung ist ebenfalls klar sichtbar.

In den Abbildungen 3.20 und 3.21 sind die zeitgemittelten Strömungswinkel dargestellt. Durch den Yaw-Angle wird gut sichtbar, dass sich die Abströmverhältnisse über die Schaufelhöhe verändern, welche durch das Schaufeldesign vorgegeben sind. Der Pitch-Angle steigt mit zunehmender Radialgeschwindigkeit an, was so auch zu erwarten war. Durch die Abbildungen 3.22 und 3.23 lassen sich Erkenntnisse über die Turbulenzstrukturen ableiten. In der Mitte des Kanals sind kaum turbulente Erscheinungen auszumachen. Wie in 2.1.1 bereits erwähnt, sind turbulente Phänomene vor allem auf den Einfluss von Sekundärströmungen zurückzuführen.

In Abbildung 3.24 sind die zeitlich gemittelten Schwankungsgeschwindigkeiten in Axial-, Umfangs- und Radialrichtung dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede in der Größenordnung der Schwankungen zu erkennen. Vor allem in Umfangsrichtung ist eine starke Schwankungsbewegung, verursacht durch den Rotor, erkennbar. Dies bedeutet, dass die Turbulenz ein ausgeprägtes anisotropes Verhalten aufweist.

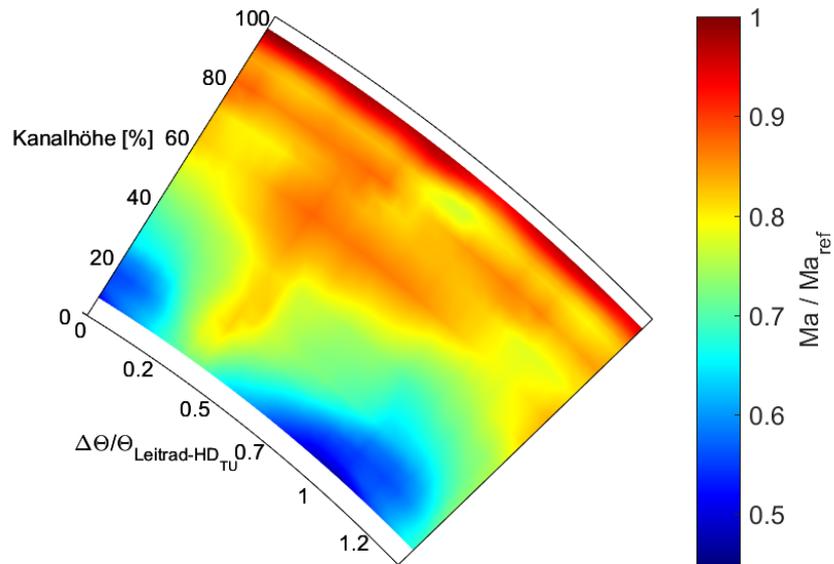


Abbildung 3.19: Plot der zeitlich gemittelten Machzahlverteilung

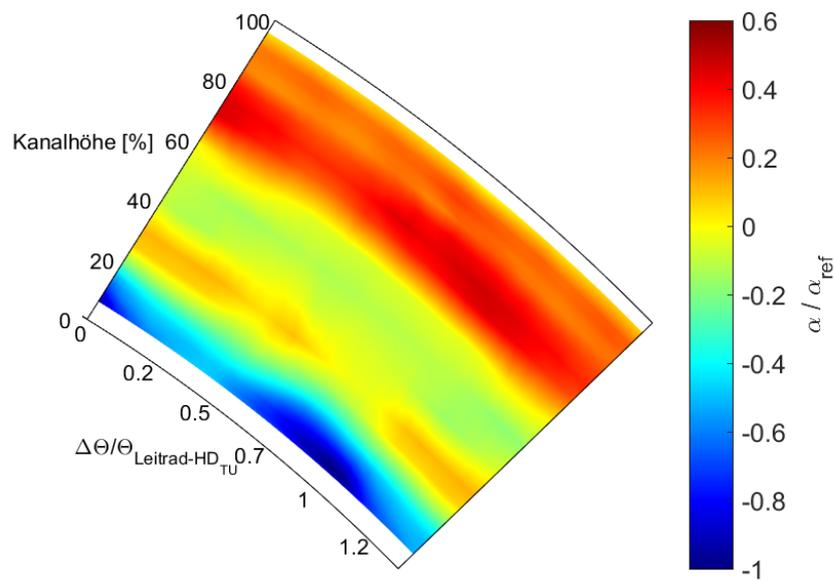


Abbildung 3.20: Plot der zeitlich gemittelten Yaw-Angle Verteilung

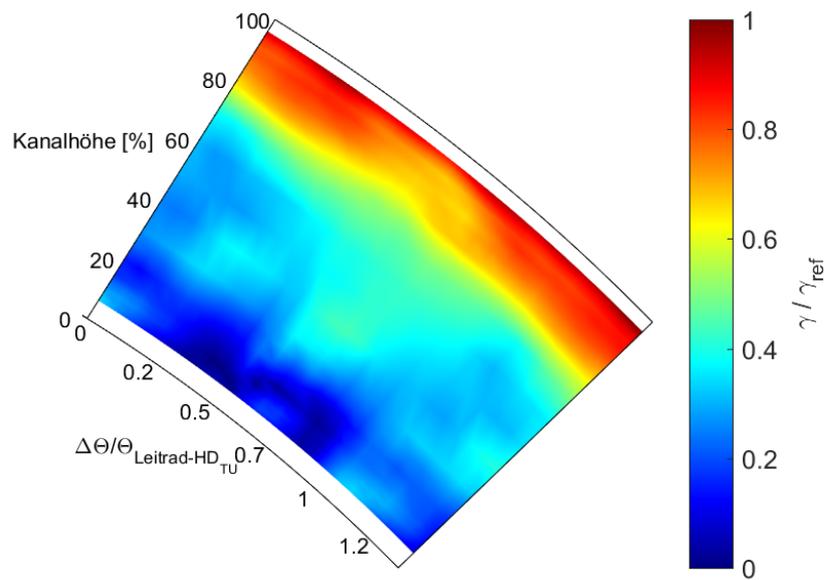


Abbildung 3.21: Plot der zeitlich gemittelten Pitch-Angle Verteilung

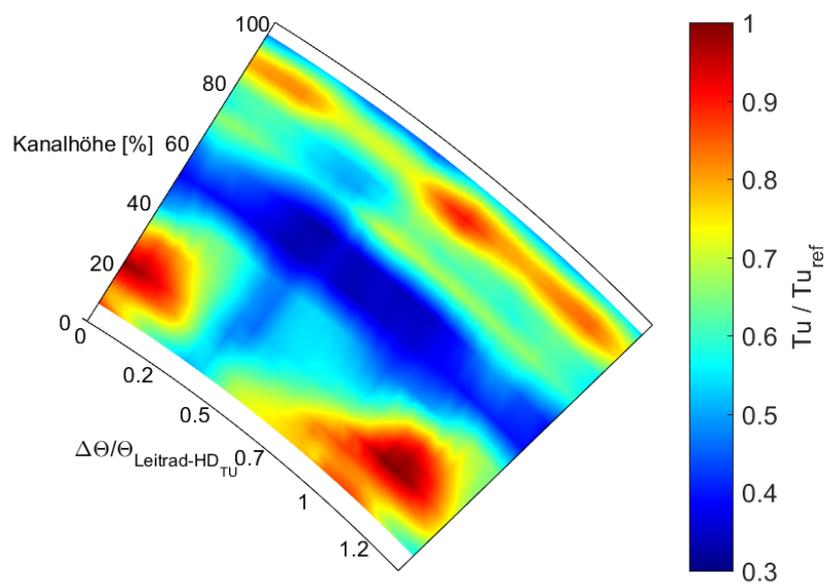


Abbildung 3.22: Plot der zeitlich gemittelten Turbulenzgradverteilung

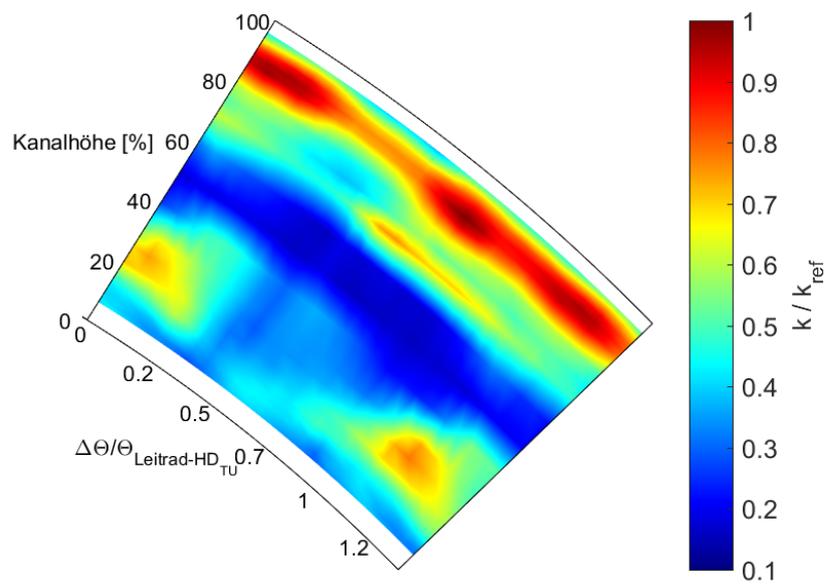


Abbildung 3.23: Plot der zeitlich gemittelten turbulenten kinetischen Energie

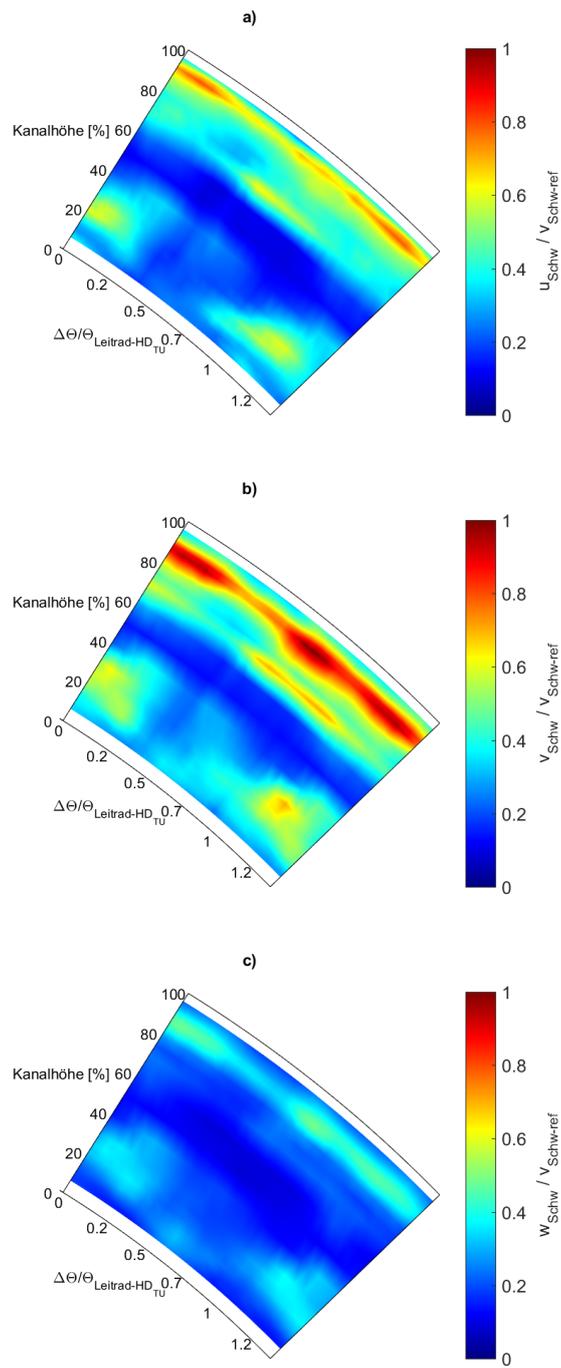


Abbildung 3.24: Darstellung der Turbulenz in a) Axial-, b) Umfangs- und c) Radialrichtung

### 3.5.3 Phasengemittelte Ergebnisse

Mithilfe eines Triggersignals, welches einmal pro Rotorumdrehung einen Impuls abgibt, ist eine phasengemittelte Auswertung möglich. Dies ist insbesondere bei periodischen Vorgängen sehr hilfreich. Dadurch ist es möglich, verschiedenen Strukturen ihre Ursachen zuzuordnen.

Im Abschnitt 2.1.1 wurde erwähnt, dass sich eine Strömungsgröße bei turbulenten Strömungen aus einem Mittelwert und einem stochastischen Anteil zusammensetzt. Beim Auftreten von Periodizitäten, wie das bei Turbomaschinen der Fall ist, müssen diese für eine exakte Beurteilung berücksichtigt werden. Es tritt also ein zusätzlicher Anteil  $\tilde{\Phi}$ , der auf das Vorhandensein eines Rotors zurückzuführen ist, auf. Dieser Anteil stellt keine Turbulenz dar.

$$\Phi = \bar{\Phi} + \tilde{\Phi} + \Phi' \quad (54)$$

Die Auswertung wurde ebenfalls in Matlab durchgeführt. Da sich im Laufe der Messung die Drehzahl ändern kann, muss dieser Einfluss berücksichtigt werden. Eine gute Möglichkeit stellt in Matlab dabei die Funktion Resample dar. Dabei wird ein bestehendes Signal (Original) mit einer neuen Abtastrate (Resample) adaptiert. Dadurch ist sichergestellt, dass für jede Umdrehung gleich viele Werte zur Verfügung stehen. Um eine feine Auflösung garantieren zu können, ist ein entsprechender hoher Wert an Stützstellen (eine Rotorumdrehung wird dann durch diese Anzahl an Werten beschrieben - für die folgende Auswertung wurden 2048 Stützstellen verwendet) für das Resampling zu wählen. In Abbildung 3.25 ist dies für ein Signal beispielhaft dargestellt.

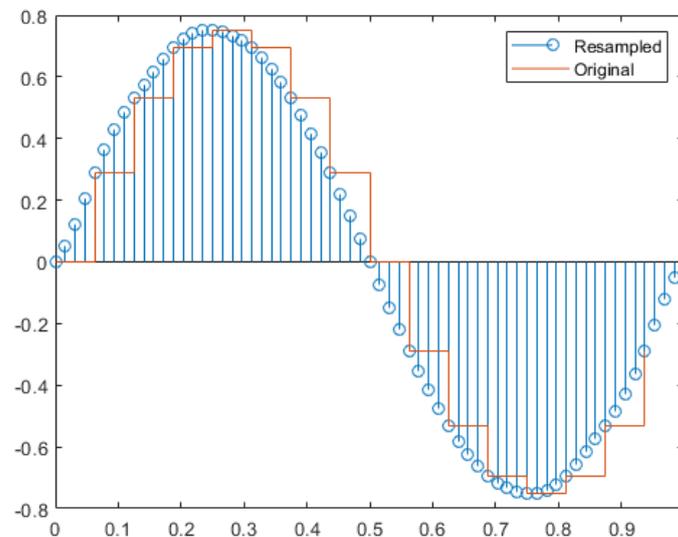


Abbildung 3.25: Resampling eines Signals [Mathworks, 2019]

Da im Prüfstand nicht die Hitzdrahtsonde sondern der Stator in seiner Umfangsposition verdreht wird, ist eine Korrektur des Triggersignals erforderlich. In Abbildung 3.26 ist die Statorschaufel vor (Position 1) und nach (Position 2) der Verdrehung um einen

Winkel in Umfangsrichtung dargestellt. Eine phasengemittelte Auswertung ist nur dann möglich, wenn das Triggersignal bei der immer gleichen Stellung von Stator zu Rotor aufgenommen wird. In der Statorposition 1 ist diese Stellung gegeben bzw. stellt dies der Referenzzustand dar. Bei Position 2 würde das Triggersignal immer um die eingezeichnete Zeitdifferenz zu spät kommen, weshalb eine Triggerkorrektur vorzunehmen ist.

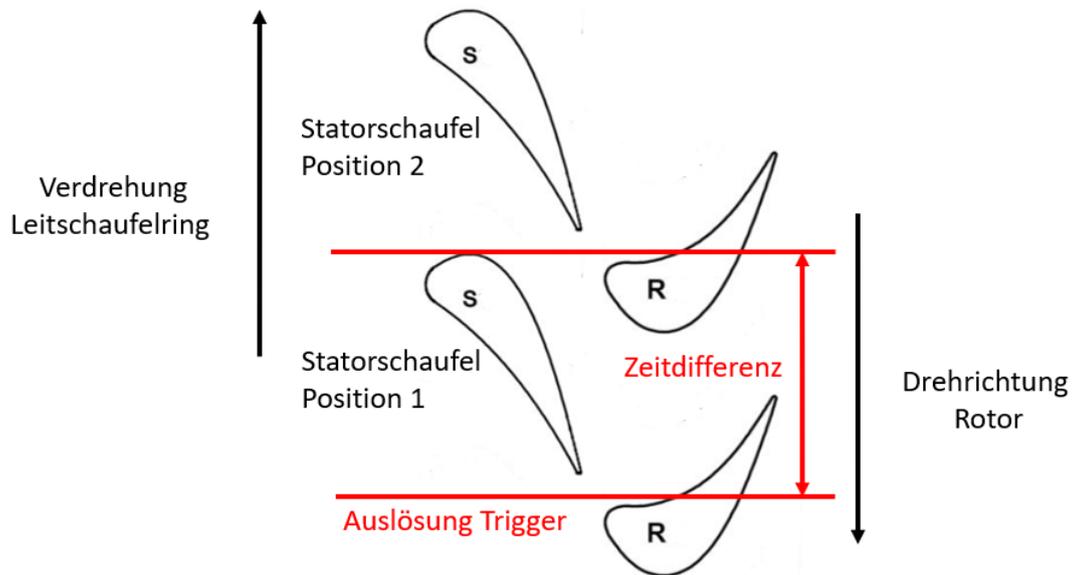


Abbildung 3.26: Schematische Darstellung zur Triggerkorrektur

Die bevorzugte Darstellungsform von phasengemittelten Ergebnissen ist das Videofor-  
 mat bzw. das Weg-Zeit Diagramm (Time-Space-Plots). In den Abbildungen 3.27 bis 3.29  
 sind die Ergebnisse zu jeweils 8 Zeitpunkten dargestellt. Die schwarzen Linien bewegen  
 sich mit der Rotorgeschwindigkeit mit und sind als Hilfe für eine bessere Lesbarkeit der  
 Diagramme gedacht. In Richtung Gehäuse werden die Bewegungen der Strukturen immer  
 ausgeprägter. Dies ist auf den Tip Leakage (Spitzenüberströmung), der bei diesem  
 Setup durch die große Spaltweite sehr ausgeprägt ist, zurückzuführen.

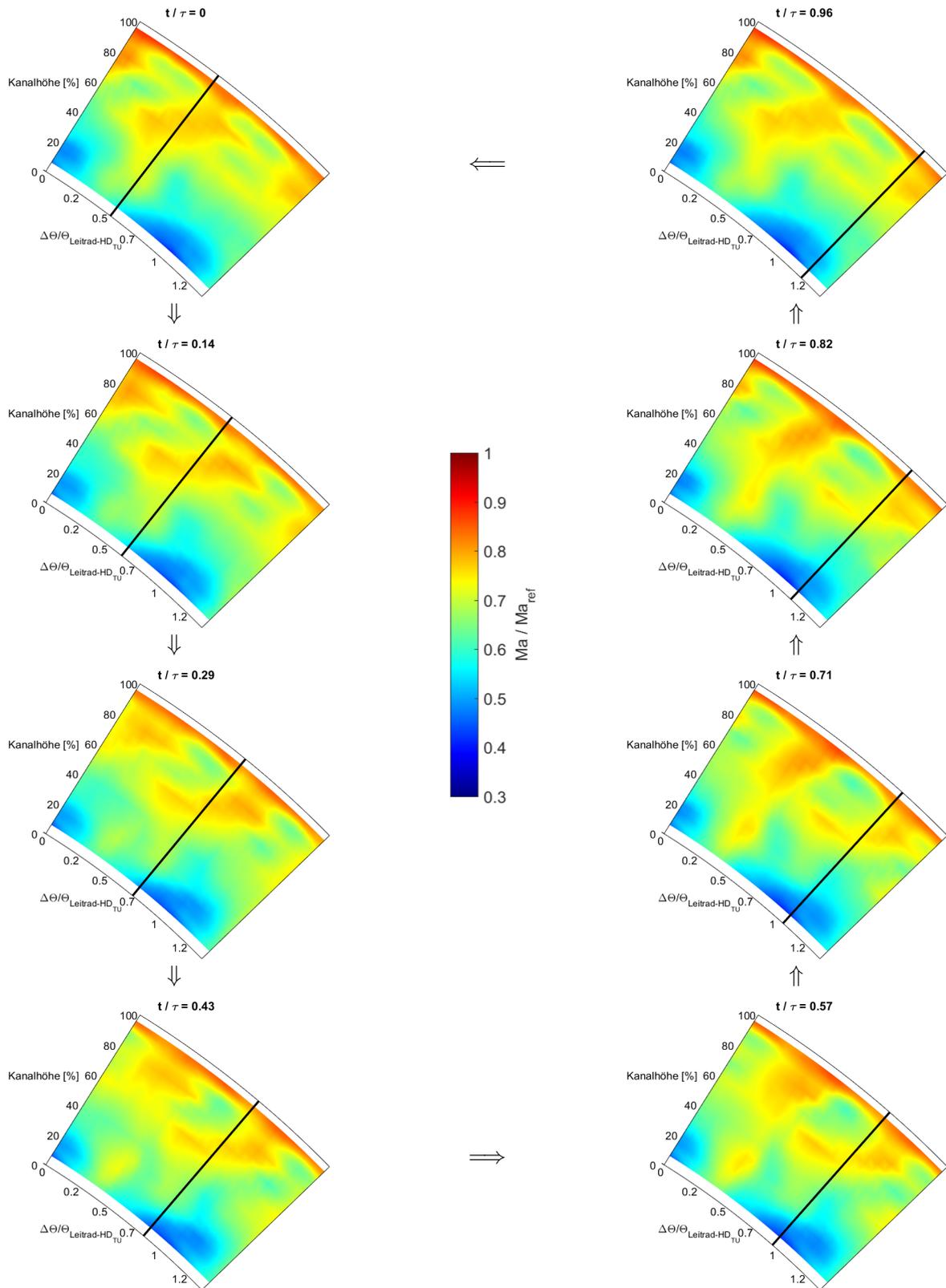


Abbildung 3.27: Phasengemittelte Darstellung der Machzahlverteilung

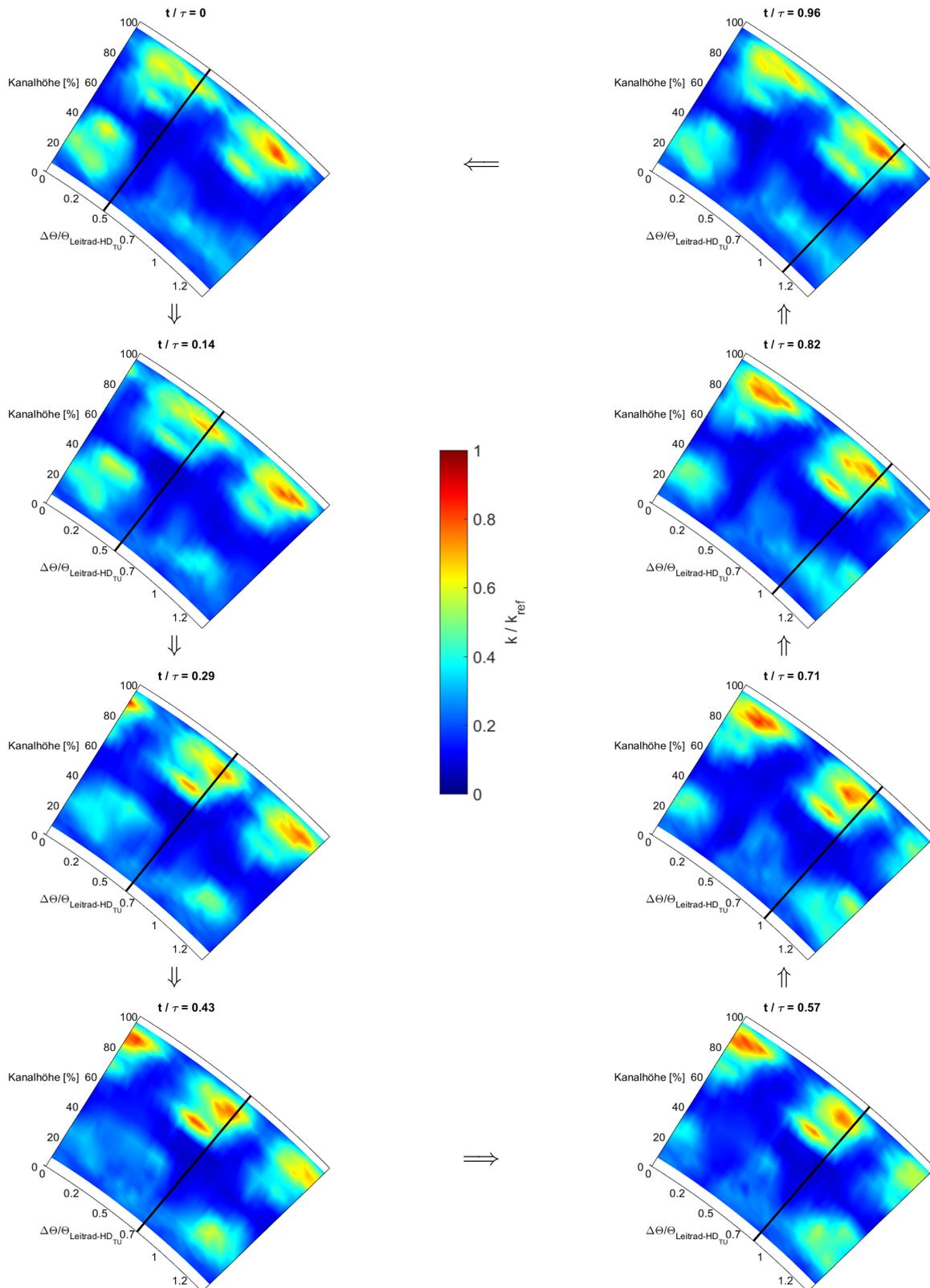


Abbildung 3.28: Phasengemittelte Darstellung der turbulenten kinetischen Energie

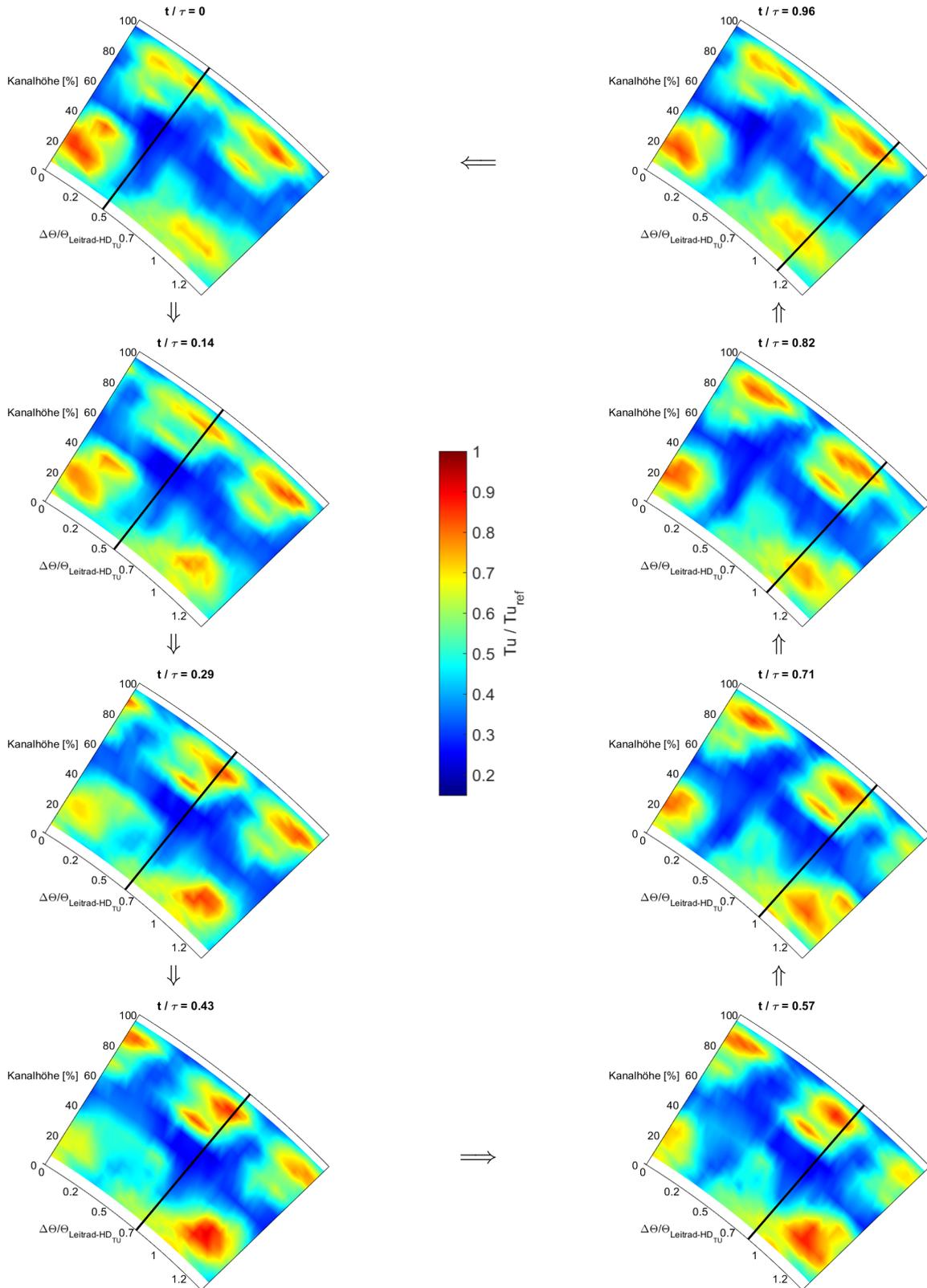


Abbildung 3.29: Phasengemittelte Darstellung des Turbulenzgrades

#### 3.5.4 Time-Space-Plots

Time-Space-Plots werden ebenfalls aus einer Phasenmittelung erhalten, werden hier aber separat behandelt. Dabei werden die Parameter einer Radiusposition (Span = Kanalhöhe) über der Zeit aufgetragen. In den Abbildungen 3.30 und 3.31 sind die Time-Space-Plots an ausgewählten Positionen im Kanal dargestellt. Aus solchen Weg-Zeit-Diagrammen können einige Erkenntnisse gewonnen werden.

Im Bereich der Nabe (geringer Span) verhalten sich die Strukturen nahezu statisch. Die Steigung der eingezeichneten, strichlierten schwarzen Linie entspricht der Geschwindigkeit des Rotors. Flachere Linien bedeuten also eine geringere und steilere Linien entsprechend eine höhere Geschwindigkeit als die des Rotors. Die Steigung der magentafarbenen Linie stellt die Fortbewegungsgeschwindigkeit von Stator-Rotor Interaktionen dar. Mit steigender Kanalhöhe wird das Verhalten zusehends dynamischer. Weiters ist auffallend, dass zum gleichen Zeitpunkt bei den vermeintlich gleichen Statorstellungen nicht das gleiche passiert, es liegt also eine Phasendifferenz vor. Hätten Stator und Rotor die selbe Anzahl an Schaufeln, wäre die Phasendifferenz Null.

In Abbildung 3.30 bei Span 94 Prozent ist eine Abschwächung in Umfangsrichtung erkennbar. Dies kann durch einen Drift im Betriebspunkt (die Werte im oberen Diagrammbereich sind ca. 2 Stunden später gemessen worden) erklärt werden.

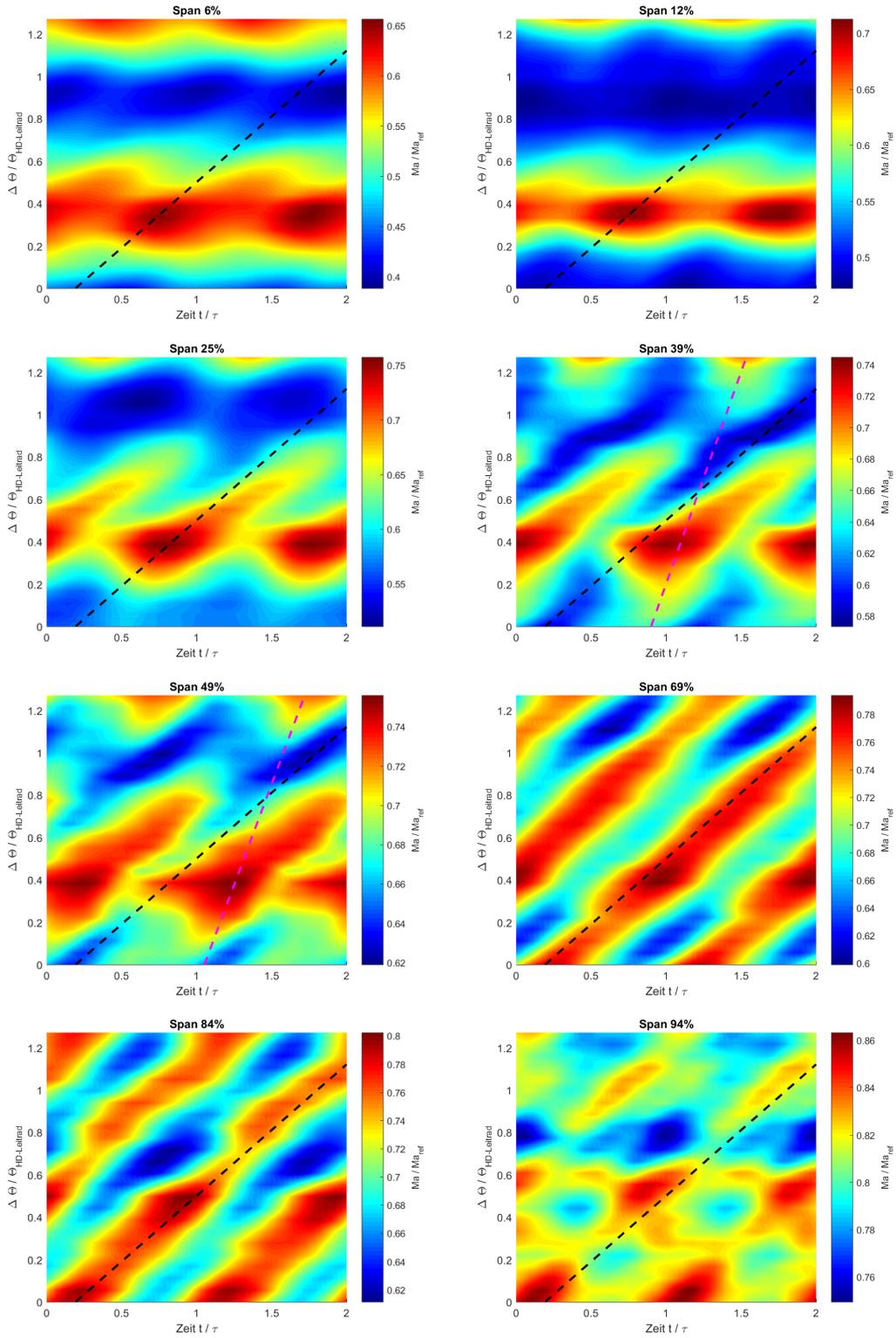


Abbildung 3.30: Time-Space-Plot Machzahl

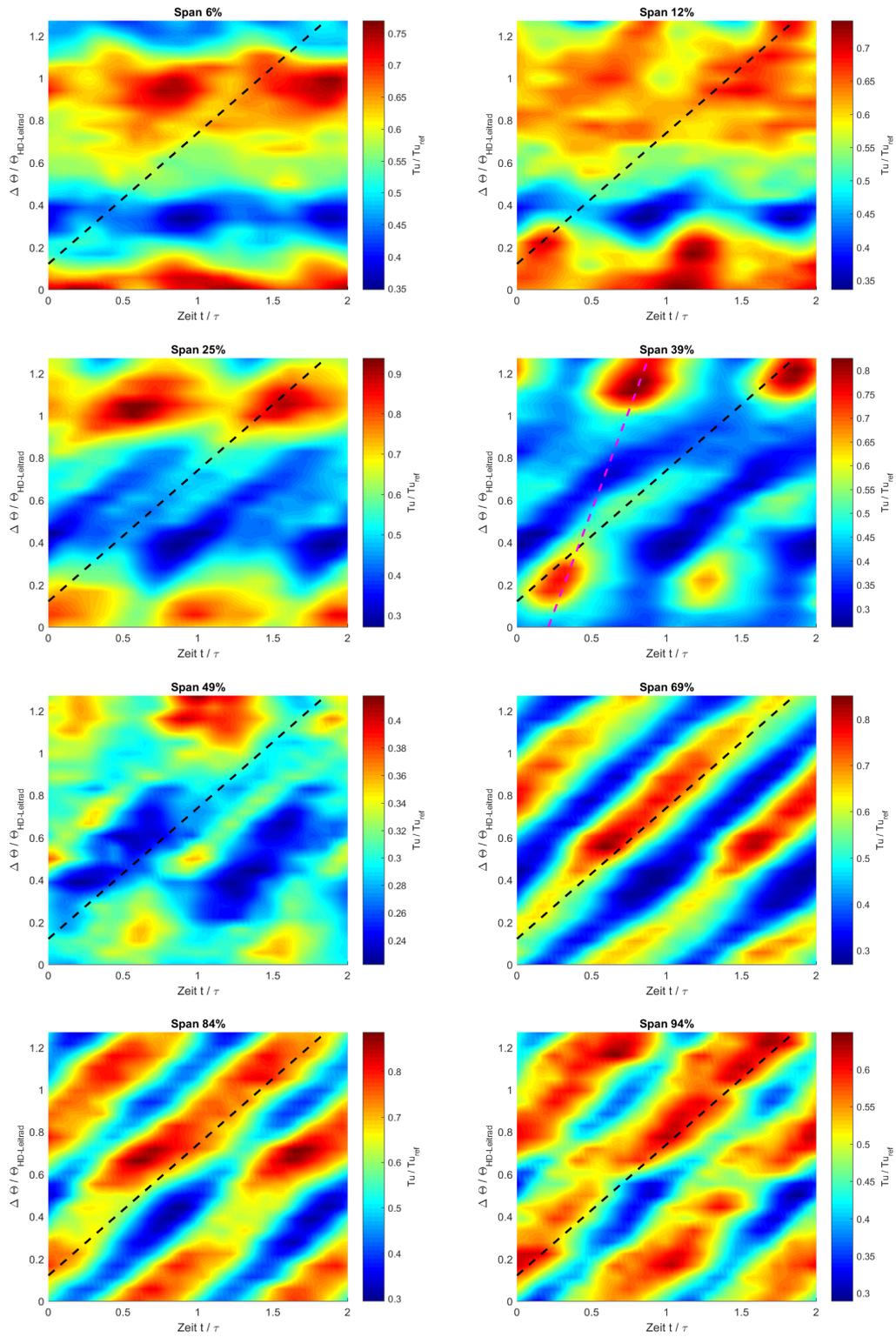


Abbildung 3.31: Time-Space-Plot Turbulenzgrad

### 3.6 Verifizierung

Die Verifizierung der erhaltenen Ergebnisse wird durch einen Vergleich durchgeführt. Es stehen Daten aus Vergleichsmessungen zur Verfügung, die sich jedoch entweder im Setup oder im Messverfahren unterscheiden.

#### 3.6.1 BPF

Eine erste Plausibilitätskontrolle kann mit einer Fourier- Analyse und dem daraus erhaltenem Amplitudenspektrum durchgeführt werden. Eine charakteristische Größe ist hierbei die sogenannte Blade Passing Frequency (BPF).

$$BPF_i = i \cdot n_{Rotor} \cdot z_{Rotor} \text{ mit } i = 1, 2, 3, \dots \quad (55)$$

Wobei  $z_{Rotor}$  die Schaufelanzahl des Rotors darstellt. Die 1. BPF ist also jene Frequenz, mit der die Rotorschaukeln an der Hitzdrahtsonde vorbeifahren. In Abbildung 3.32 ist beispielhaft das Amplitudenspektrum der Geschwindigkeiten in Axial-, Umfangs- und Radialrichtung an drei unterschiedlichen Positionen bezüglich der Kanalhöhe, ersichtlich. Die hier erhaltenen BPF's stimmen mit jenen von der Versuchsfahrt, die durch Aufzeichnung der Drehzahl ermittelt wurden, überein. In Abbildung 3.32 sind noch zusätzliche Peaks zu sehen. Diese können eine ganzzahlige Linearkombination von Stator- und Rotorschaukelzahl sein.

#### 3.6.2 Vergleich mit Fünflochsonde

Da mit der Fünflochsonde keine Schwankungsgrößen untersucht werden können, erfolgt ein Vergleich der zeitgemittelten Ergebnisse. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, umfangsgemittelte Werte über radiale Linien aufzutragen und direkt gegenüberzustellen. Dies ist in den Abbildungen 3.33, 3.37 und 3.38 für die Machzahl, den Yaw- und den Pitch-Angle dargestellt. Die Fünflochsondenmessung fand mit einem Setup mit einer etwas geringeren Spaltweite zwischen Rotor und Gehäuse statt.

Bei der Machzahl kann festgestellt werden, dass der Verlauf von CTA- und Fünflochsonde in der Kanalmitte eine größere Abweichung aufweist. Ein Grund hierfür könnte sein, dass in Kanalmitte ungefähr jene Geschwindigkeiten herrschen, bei denen die Kalibrierung (vergleiche Abbildung 3.13) durch Temperatureinfluss nicht exakt war. Aus diesem Grund wurde noch eine Kalibrierung nach King, siehe Abbildung 3.34 bzw. Abschnitt 2.3.3, durchgeführt. Hierbei werden nur zwei Kalibrierpunkte benötigt. Die Form der radialen Linie der Machzahl nach King ist ident zu jener der Polynomapproximation, jedoch mit größeren Absolutwerten. Dies spricht gegen eine fehlerhafte Kalibrierung. Die Abweichung könnte auch durch einen großen Gradienten von statischer Temperatur bzw. statischem Druck in diesem Bereich verursacht werden (siehe Abbildungen 3.35 und 3.36). Der stärkere Anstieg der Machzahl gehäuseseitig ist durch den größeren Spalt erklärbar.

Beim Pitch-Angle sind vor allem nabenseitig teilweise größere Abweichungen feststellbar. Der Verlauf des Yaw-Angles von CTA und Fünflochsonde stimmt bis auf einen Offset

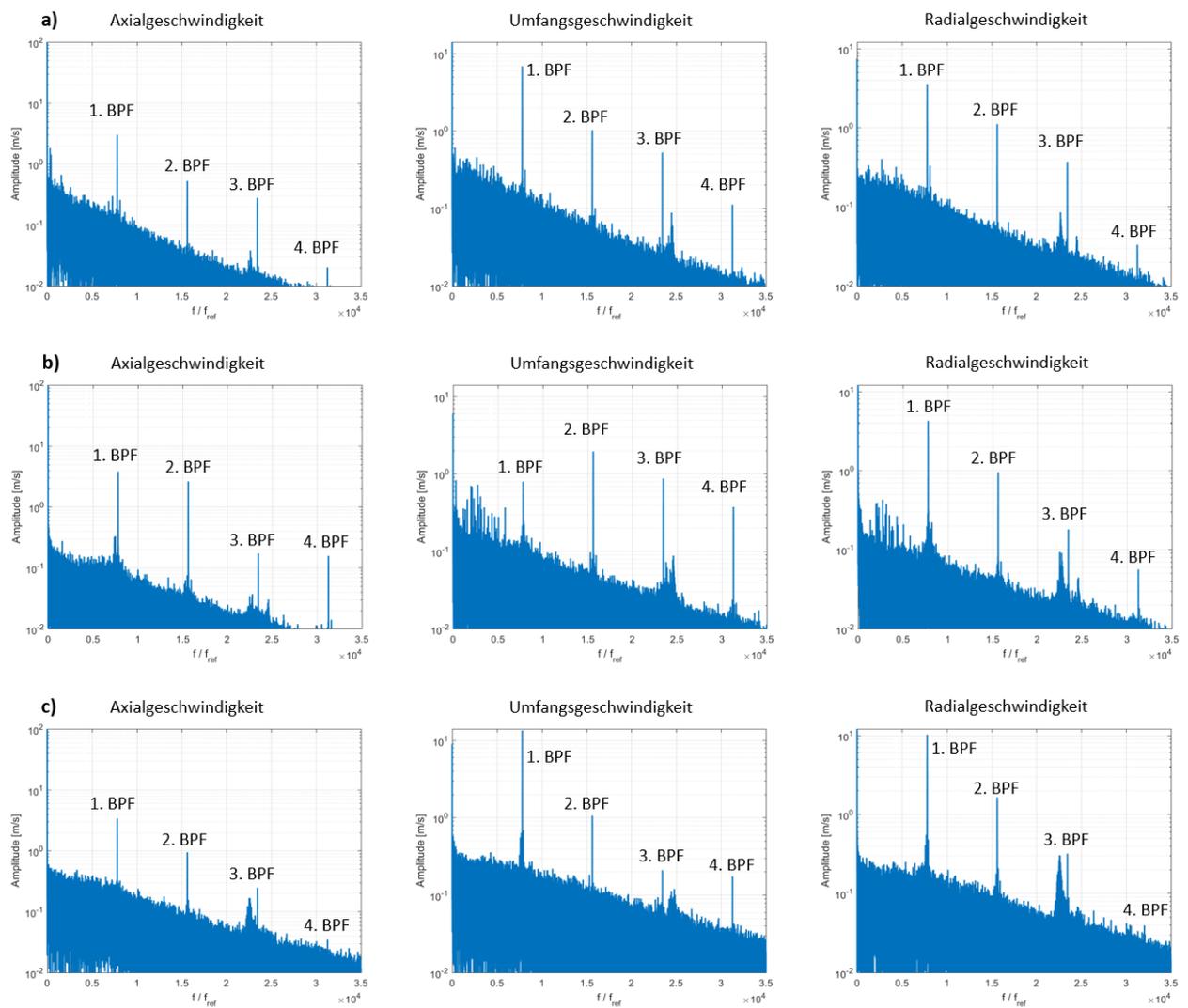


Abbildung 3.32: Fourier-Analysen der Geschwindigkeiten bei a) 6%, b) 50% und c) 93% Span

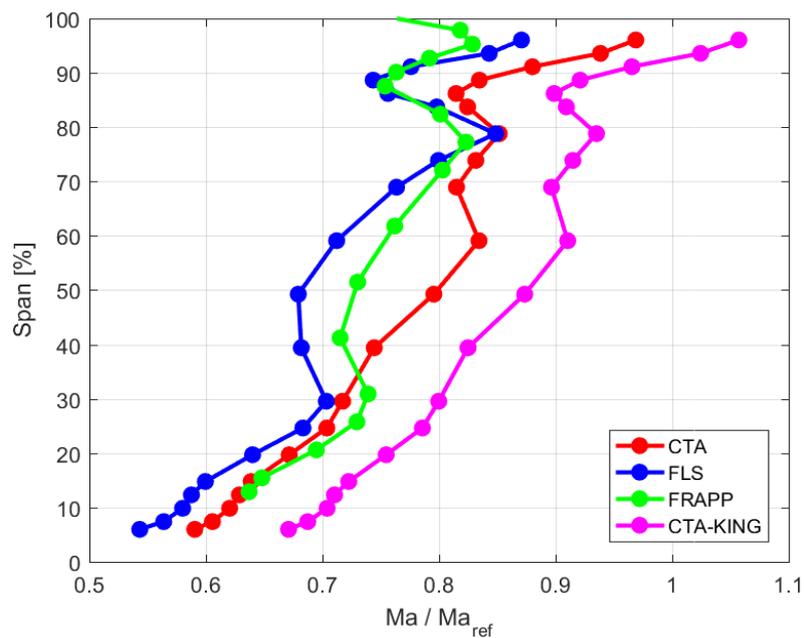


Abbildung 3.33: Radiale Linien Machzahl

gut überein. Für die Abweichungen im Nebenbereich kann folgender Effekt eine Ursache haben: Da der Einbau der Messgeräte von Hand erfolgt und gerade bei den Hitzdrahtsensoren mit größter Sorgfalt vorgegangen werden muss, ist ein exakter Einbau nicht möglich. Die Messpunkte von CTA und Fünflochsonde sind also nicht deckungsgleich. Allgemein kann festgehalten werden, dass die größten Unterschiede zwischen CTA- und Fünflochsondenmessung in der Kanalmitte auftreten.

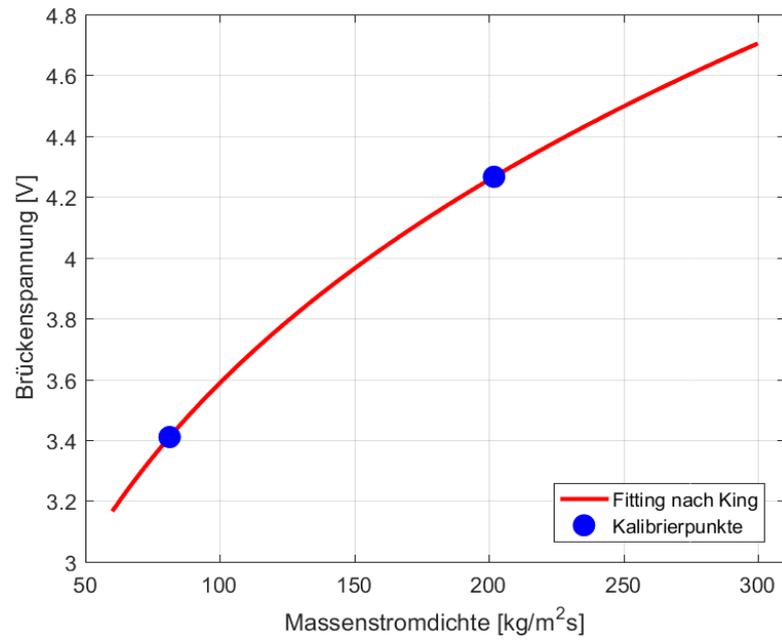


Abbildung 3.34: Kalibrierkurve für Sensor 1 nach King

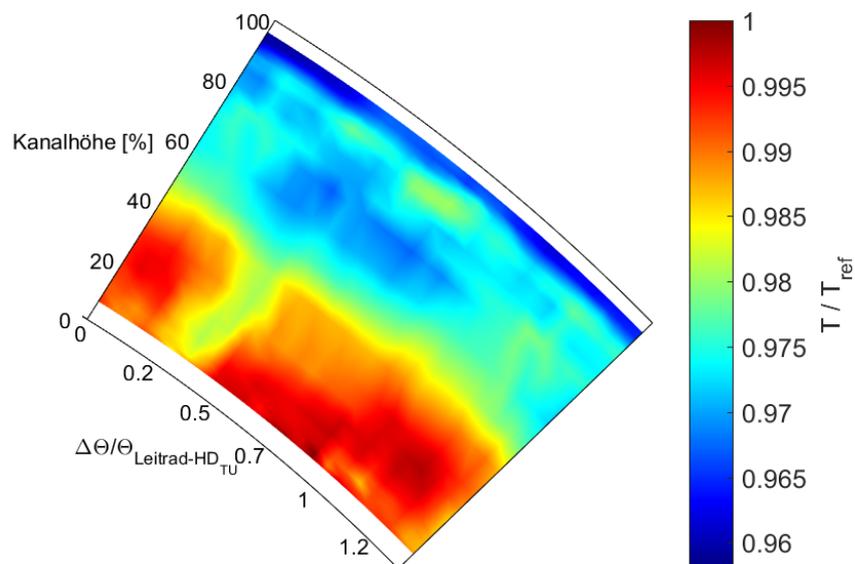


Abbildung 3.35: statische Temperaturverteilung

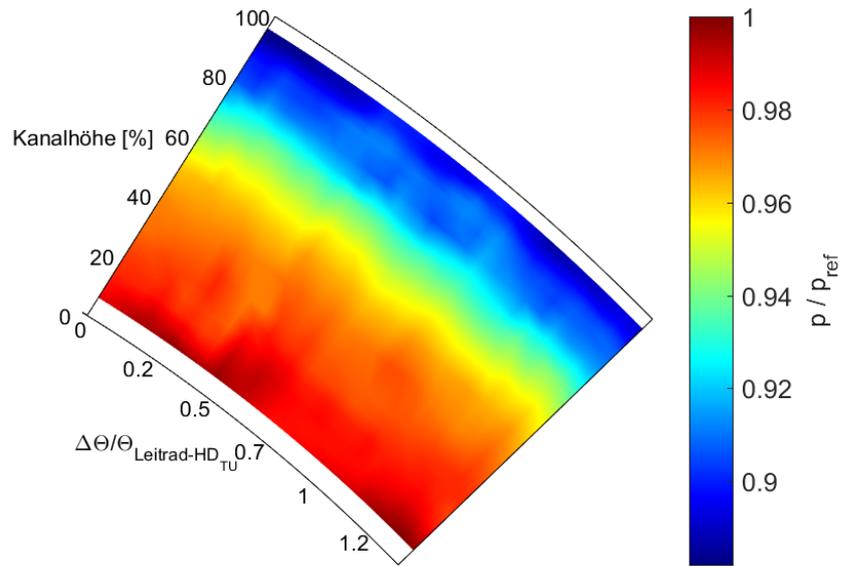


Abbildung 3.36: statische Druckverteilung

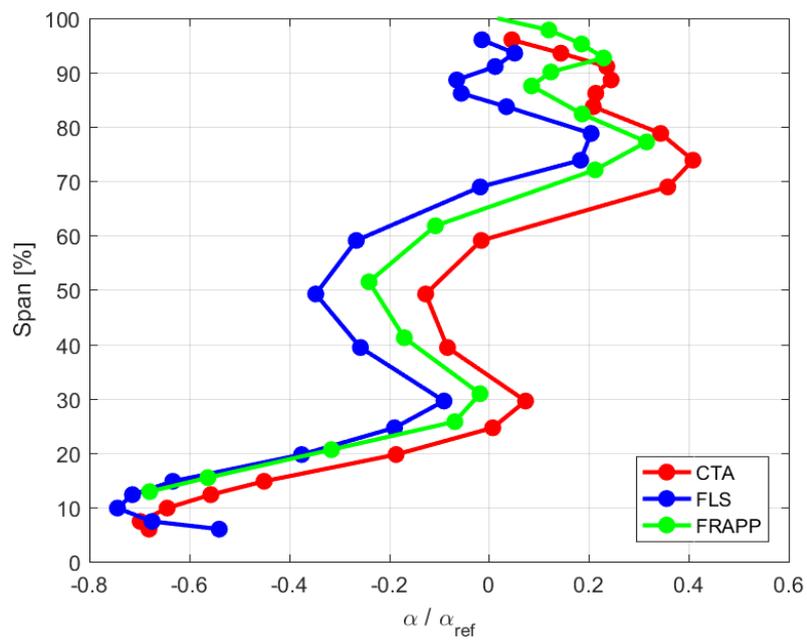


Abbildung 3.37: Radiale Linien Yaw-Angle

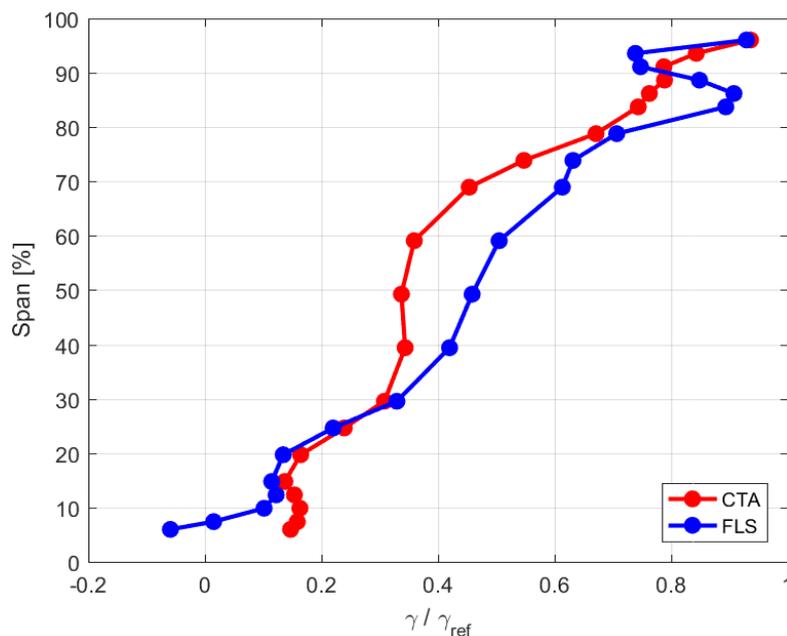


Abbildung 3.38: Radiale Linien Pitch-Angle

### 3.6.3 Vergleich mit FRAPP-Daten

Aus früheren am Institut durchgeführten FRAPP-Messungen liegen ebenfalls Vergleichsdaten vor. In den Abbildungen 3.39 und 3.40 sind phasengemittelt die Machzahlverteilung sowie der eindimensionale Turbulenzgrad ersichtlich. Aufgrund des Aufbaus der FRAPP-Sonde (vergleiche auch Abbildung 2.8) ist eine Messung im wandnahen Bereich der Nabe nicht möglich. Dies ist der Grund, weshalb eine Auswertung erst bei einer Kanalhöhe von etwa 12 Prozent stattfindet. Weiters wurde die Einlochsonde im virtuellen Dreilochsondenbetrieb verwendet. Dies bedeutet, dass die Sonde jeweils um einen bestimmten Winkel seitlich aus der Strömung gedreht wird. Die Messdaten an einem Punkt werden somit nicht zeitgleich aufgenommen. Die FRAPP-Messungen wurden ebenfalls an einem Setup mit etwas geringerer Spaltweite zwischen Rotor und Gehäuse als bei der Hitzdrahtmessung durchgeführt. In den Abbildungen 3.41 und 3.42 sind die radialen Linien von Turbulenzgrad und kinetisch turbulenter Energie dargestellt. Die großen Abweichungen kommen dadurch zustande, dass bei der FRAPP-Methode Druckschwankungen gemessen und für die anschließende Berechnung von Geschwindigkeitsschwankungen einige Annahmen getroffen werden müssen (vergleiche dazu Gleichung 56, welche dies illustrieren soll - für eine genaue Erklärung sei auf [Persico und Gaetani, 2008] verwiesen).

$$\overline{Pt_R^2} = 0,49\rho_{det}^2(1 - 0,175M_{det}^4)^2 \cdot \overline{u_R^2} + \rho_{det}^2 V_{det}^2(1 + 0,5M_{det}^2)^2 \cdot \overline{u_R^2} \quad (56)$$

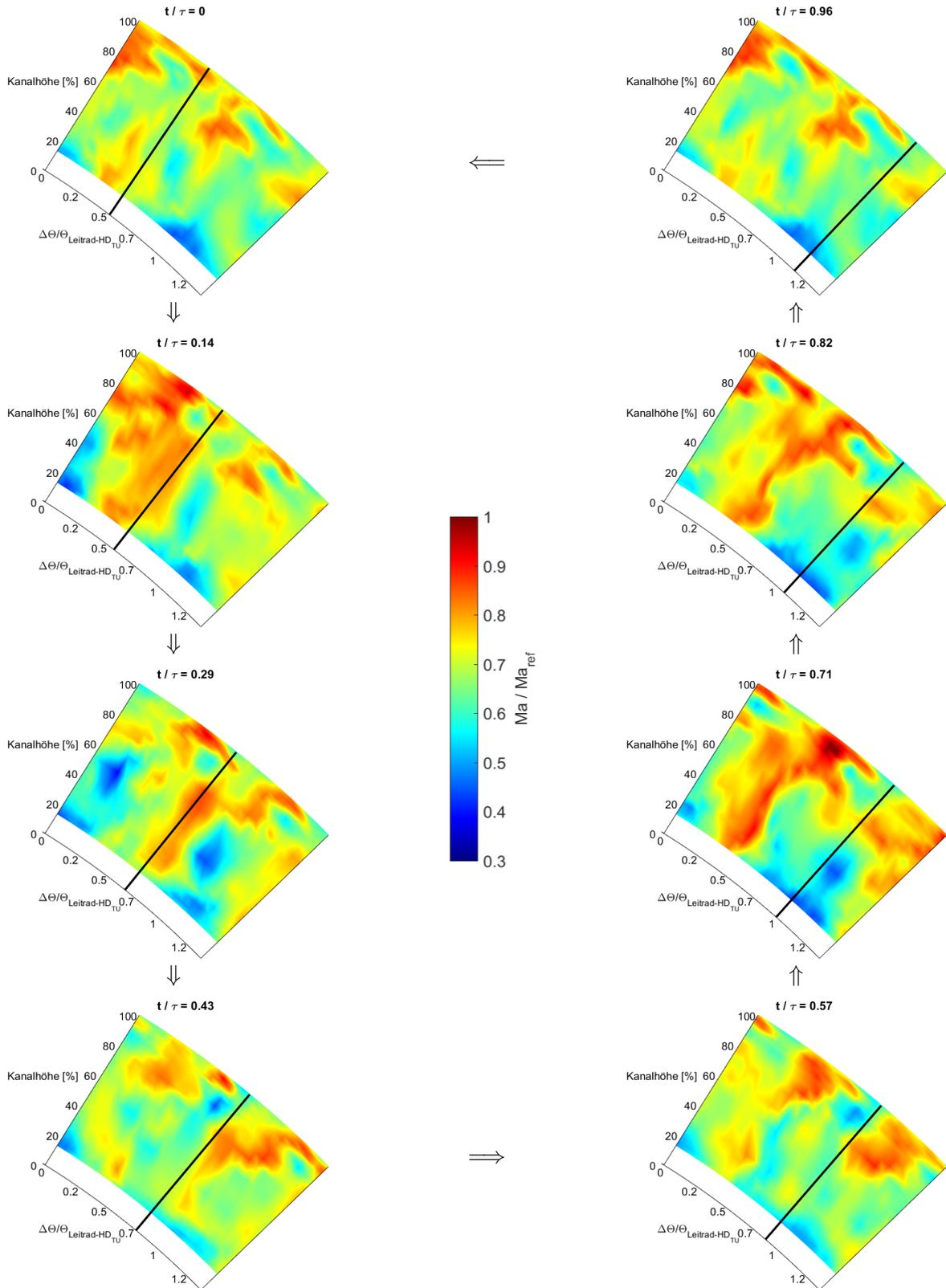


Abbildung 3.39: Phasengemittelte Darstellung der Machzahl aus FRAPP-Daten

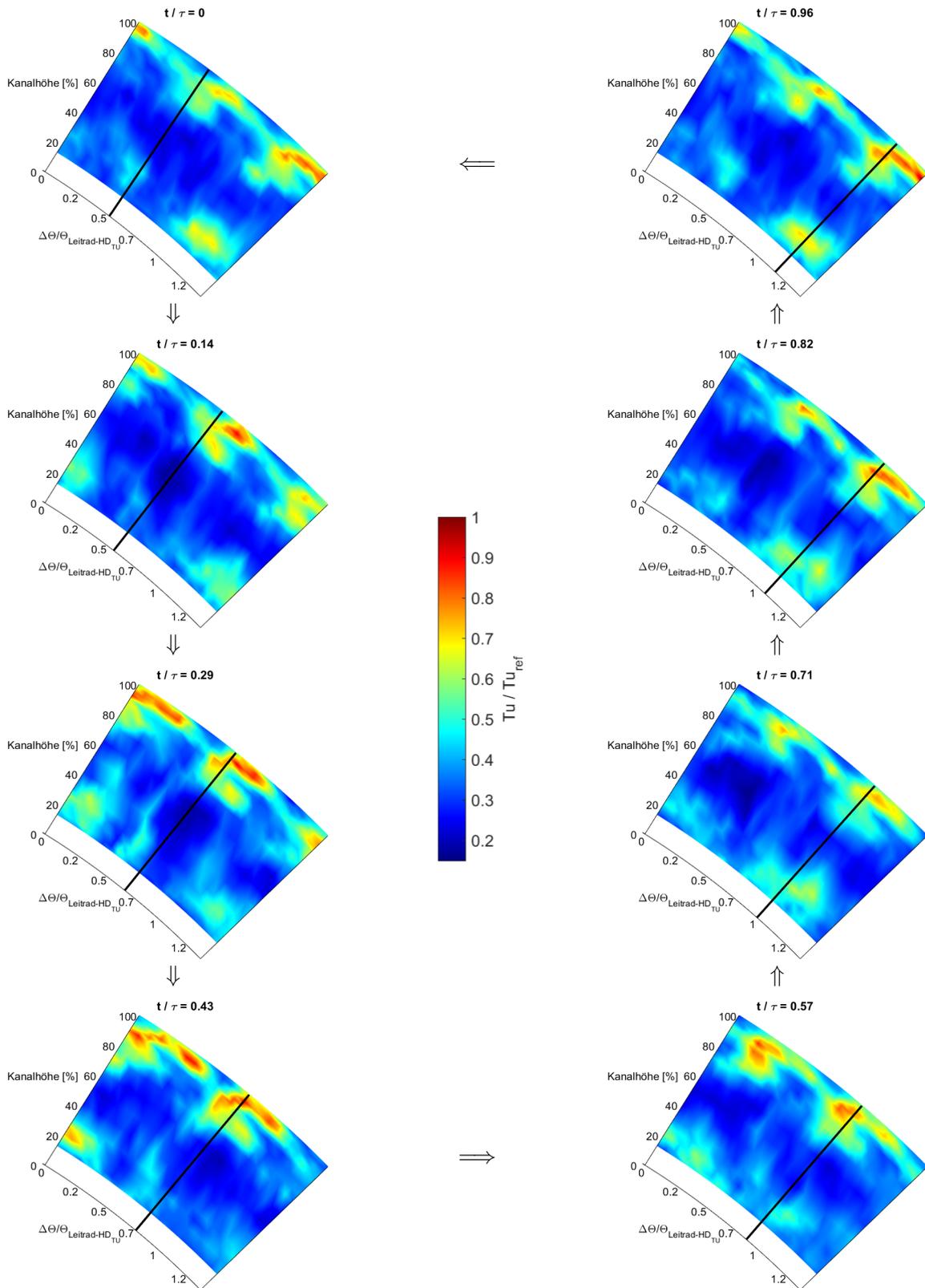


Abbildung 3.40: Phasengemittelte Darstellung des Turbulenzgrades (1D) aus FRAPP-Daten

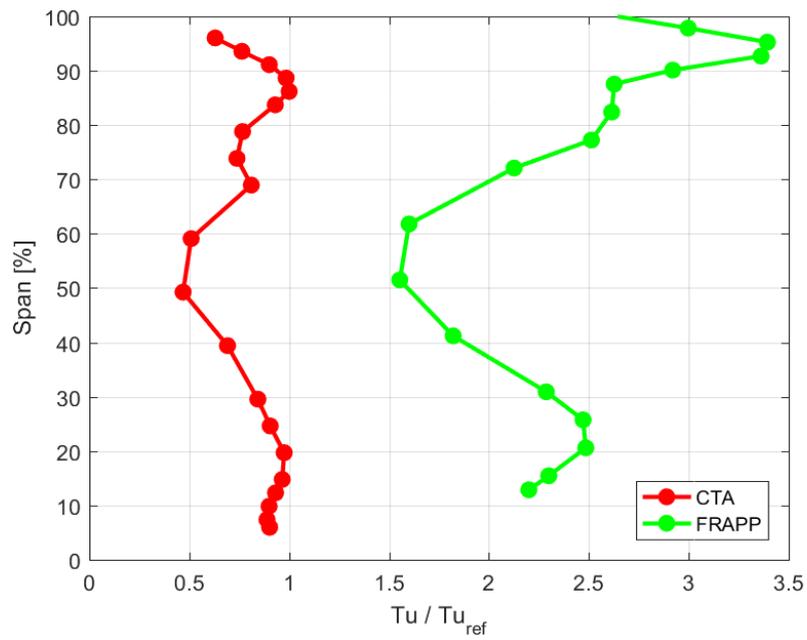


Abbildung 3.41: Radiale Linien Turbulenzgrad

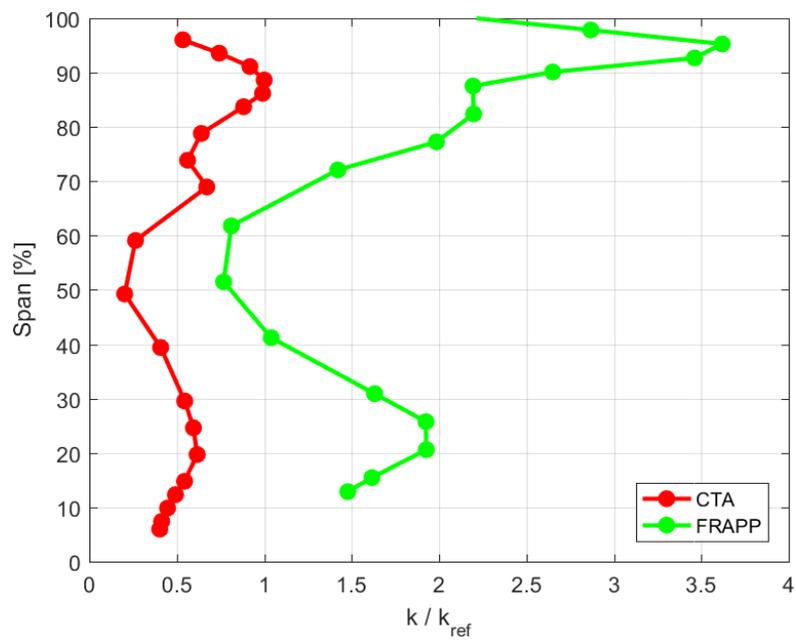


Abbildung 3.42: Radiale Linien turbulent kinetische Energie

## 4 Fazit und Ausblick

Durch eine CTA-Messung mit einer 3-Drahtsonde stehen sehr wertvolle und aussagekräftige Daten zur Verfügung. Der größte Vorteil ist wohl, dass mit einem Verfahren zeitgemittelte Größen und Schwankungsgrößen in alle drei Raumrichtungen ermittelt werden können. Da die Messung mit drei Drähten zeitgleich erfolgt, dauert der Messvorgang eines Punktes im Gegensatz zur FRAPP-Einlochsonde im virtuellen 3-Loch Betrieb wesentlich kürzer. Durch diese Zeitersparnis ist es möglich, das Messgitter feiner auszuliegen und somit dichtere Ergebnisse zu erhalten. Weiters ist die Strömungsbeeinflussung der Messsonde der FRAPP größer als an den geometrisch sehr kleinen Hitzdrähten. Im Vergleich mit der Fünflochsonde können mit dem CTA-System zusätzlich Schwankungsgrößen untersucht werden.

Ein Nachteil bei der CTA-Messung besteht im Einfluss der Temperatur und des Druckes. Für exakte Ergebnisse müssten diese Größen in unmittelbarer Nähe des Hitzdrahtensensors mitgemessen werden, was derzeit allerdings nicht möglich ist. Dies bedeutet, dass die absoluten Werte von Strömungsgrößen mit der Fünflochsonde genauer ermittelt werden können. Oftmals sind die absoluten Werte jedoch gar nicht so sehr von Bedeutung, da es mehr um eine genaue Kenntnis des Strömungsverhaltens geht. Für diesen Zweck eignen sich die CTA-Messungen hervorragend. Es ist durchaus denkbar, dass in naher Zukunft auf FRAPP-Messungen verzichtet werden kann, da mit nur einer Hitzdrahtmessung dieselbe bzw. eine größere Menge an Informationen gewonnen werden können. Vor allem bei der Turbulenzuntersuchung wurde ersichtlich, dass das CTA-System dem FRAPP-System überlegen ist und deutlich bessere Ergebnisse liefert. Fünflochsondenmessungen werden weiterhin notwendig sein, da der Druckverlust nicht über eine Hitzdrahtmessung ermittelt werden kann.

Diese Arbeit hat lediglich eine erste Messung mit dem neu angeschafften CTA-System in einer Turbomaschine und rudimentäre Auswertungen zum Ziel gehabt. Es gilt in Zukunft weitere Erfahrungen mit dem CTA-System zu machen um noch mehr Informationen aus den Daten lukrieren zu können. Dabei geht es vor allem darum, welche Parameter wie viel Einfluss auf die Ergebnisse haben und einer Optimierung der Kalibrierung. In Anbetracht der Umstände ist sich der Autor sicher, dass die Messgenauigkeit und somit die Qualität der Ergebnisse in Zukunft noch gesteigert werden können und CTA-Messungen einen großen Gewinn darstellen werden.

## Literaturverzeichnis

- [Bräunling, 2015] Bräunling, W. J. G. (2015). *Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, 4. Aufl.. Auflage.
- [Brenn und Meile, 2014] Brenn, G. und Meile, W. (2014). *Strömungslehre und Wärmeübertragung I: Vorlesungsskriptum*. TU-Graz.
- [Dantec Dynamics, 2018] Dantec Dynamics (2018). Probes for Hot-wire Anemometry.
- [Dantec Dynamics, 2019] Dantec Dynamics (2019). *Dantec Dynamics*: <https://www.dantecdynamics.com/news-events-category/trade-in-trade-up-cta>.
- [Dantec Dynamics A/S, 2016] Dantec Dynamics A/S (2016). StreamWare Pro Installation and User Guide.
- [Farnell, 2019] Farnell (2019). *BNC- Kabel*: <https://de.farnell.com/pro-signal/bnc-plug-plug-rg59/kabel-rg59-bnc-stecker-stecker/dp/4257340>.
- [Heitmeir, 2015] Heitmeir, F. (2015). *Thermische Turbomaschinen Grundlagen: Vorlesungsskriptum*. TU-Graz.
- [Herwig und Schmandt, 2015] Herwig, H. und Schmandt, B. (2015). *Strömungsmechanik: Physik - mathematische Modelle - thermodynamische Aspekte*. Springer Vieweg, Berlin, 3., erg. Aufl.. Auflage.
- [Indiger, 2016] Indiger, T. (2016). *Grundlagen der experimentellen Strömungsmechanik: Vorlesungsunterlagen*. TU-München.
- [Jørgensen, 2005] Jørgensen, F. E. (2005). *How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide*.
- [Kupferschmied, 1998] Kupferschmied, P. (1998). *Zur Methodik zeitaufgelöster Messungen mit Strömungssonden in Verdichtern und Turbinen: Dissertation*. ETH-Zürich.
- [Mathworks, 2019] Mathworks (2019). *Matlab- Hilfeseite*: <https://de.mathworks.com/help/signal/ref/resample.html>.
- [National Instruments, 2019] National Instruments (2019). *BNC-Anschlussboard*: <https://picclick.com/National-Instruments-BNC-2110-Shielded-Connector-Block-Breakout-301239280542.html>.
- [Nitsche und Brunn, 2006] Nitsche, W. und Brunn, A. (2006). *Strömungsmesstechnik*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2., aktualisierte und bearbeitete auflage. Auflage.

- [Oertel, 2016] Oertel, H. (2016). *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [Persico und Gaetani, 2005] Persico, G. und Gaetani, P. (2005). Design and analysis of new concept fast-response pressure probes. *Measurement Science and Technology*, 16(9):1741–1750.
- [Persico und Gaetani, 2008] Persico, G. und Gaetani, P. (2008). Estimation of turbulence by single-sensor pressure probes.
- [Pirker und Jericha, 1995] Pirker, H.-P. und Jericha, H. (1995). *Thermische Strömungsmaschinen: Turbokompressoren im industriellen Einsatz: 3. Tagung Hannover, 28. und 29. September 1995*, Band 1208 in *VDI-Berichte*. VDI-Verl., Düsseldorf.
- [Poensgen, 1989] Poensgen, C. A. (1989). *Ein Verfahren zur Vermessung der instationären dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektoren in Turbomaschinen: Internal Technical Report No. 89-01*.
- [Rick, 2013] Rick, H. (2013). *Gasturbinen und Flugantriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten und Simulation*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Wachter, 2018] Wachter, P. (2018). *Adaption von Hard- und Software eines Dreikomponenten-Hitzdrahtanemometers zum Gebrauch in thermischen Turbomaschinen: Masterarbeit*. TU Graz.
- [Wikipedia, 2019] Wikipedia (2019). *Euler Winkel*: [https://de.wikipedia.org/wiki/Eulersche\\_Winkel](https://de.wikipedia.org/wiki/Eulersche_Winkel).
- [Zerobin, 2018] Zerobin, S. (2018). *Aerodynamic Performance of Turbine Center Frames under the Presence of High-Pressure Turbine Rotor Purge Flows: Dissertation*. TU-Graz.
- [Zerobin und Bauinger, 2017] Zerobin, S. und Bauinger, S. (2017). The Unsteady Flow Field of a Purged High Pressure Turbine based on Mode Detection. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2017*.

**Abbildungsverzeichnis**

1.1	Darstellung Turbinenprüfstand . . . . .	2
2.1	Reynolds Ansatz für eine turbulente Strömung [Oertel, 2016] . . . . .	5
2.2	Typische Längen bei Gasströmungen unter Normbedingungen [Herwig und Schmandt, 2015] . . . . .	6
2.3	links: Darstellung einer verwundenen Turbinenschaufel, rechts: An- und Abströmung an einer Turbinenschaufel [Bräunling, 2015] . . . . .	7
2.4	Geschwindigkeitsplan einer Turbinenstufe [Rick, 2013] . . . . .	8
2.5	Entstehung von Sekundärströmungen in Turbomaschinenbe-schaufelungen [Bräunling, 2015] . . . . .	9
2.6	Entstehung von Spaltverlusten [Bräunling, 2015] . . . . .	9
2.7	Fünfloch Kugelsonde [Nitsche und Brunn, 2006] . . . . .	11
2.8	FRAPP-Sonde [Zerobin und Bauinger, 2017] . . . . .	11
2.9	Brückenschaltung eines CTA [Nitsche und Brunn, 2006] leicht ab-gewandelt	13
2.10	Wärmebilanz eines Hitzdrahtes [Nitsche und Brunn, 2006] . . . . .	14
2.11	typischer Spannungsverlauf über der Geschwindigkeit [Nitsche und Brunn, 2006] leicht abgewandelt . . . . .	15
2.12	Ein-, Zwei- und Dreidrahtsonde [Dantec Dynamics, 2018] leicht abgewandelt	15
2.13	Spannungen bei unterschiedlichen Temperaturen [Nitsche und Brunn, 2006]	16
2.14	Schräganströmung eines Hitzdrahtes um den Winkel $\alpha$ [Nitsche und Brunn, 2006] . . . . .	17
3.1	StreamLine Pro CTA-Frame von DantecDynamics [Dantec Dynamics, 2019]	19
3.2	Mikroskopaufnahme Sensor 55R97Graz von Dantec Dynamics . . . . .	20
3.3	In der Institutswerkstatt adaptierte Sondenschäfte . . . . .	20
3.4	links: BNC-Kabel [Farnell, 2019], rechts: BNC-Anschlussblock [National Instruments, 2019] . . . . .	21
3.5	Kalibriereinheit von Dantec Dynamics mit Pitch-Yaw Manipulator und Sondenhalterung . . . . .	22
3.6	Übersichtschema CTA-System [Dantec Dynamics A/S, 2016] . . . . .	23
3.7	Düsen für die Kalibriereinheit von Dantec Dynamics . . . . .	24
3.8	oben: Kalibrierkurve, unten: Fehlerkurve für einen Draht bei der Ge-schwindigkeitskalibrierung des Sensors 55R97Graz . . . . .	25
3.9	Sonden- und Sensorkoordinatensystem bei der Kalibrierung [Dantec Dy-namics A/S, 2016] abgewandelt . . . . .	26
3.10	oben: Sondenhalterung, mitte: Sensor, Verschlusskappe, Lochblende und Sondendummy, unten: Zugentlastung . . . . .	30
3.11	Vergleich der Düsen . . . . .	31
3.12	Lufterhitzer . . . . .	31
3.13	Kalibrierkurve unter Temperatureinfluss . . . . .	32
3.14	Kalibriereinheit mit Wärmedämmplatten isoliert . . . . .	35
3.15	links: Traversiereinheit, mitte: Sonde mit Sensor in Traversierung, rechts: schematische Darstellung . . . . .	36
3.16	Skizze zur Längenkorrektur beim Sondeneinbau . . . . .	36

3.17	schematische Darstellung des Messgitters im TTTF . . . . .	38
3.18	Darstellung der unterschiedlichen Winkel [Zerobin, 2018] . . . . .	39
3.19	Plot der zeitlich gemittelten Machzahlverteilung . . . . .	41
3.20	Plot der zeitlich gemittelten Yaw-Angle Verteilung . . . . .	41
3.21	Plot der zeitlich gemittelten Pitch-Angle Verteilung . . . . .	42
3.22	Plot der zeitlich gemittelten Turbulenzgradverteilung . . . . .	42
3.23	Plot der zeitlich gemittelten turbulenten kinetischen Energie . . . . .	43
3.24	Darstellung der Turbulenz in a) Axial-, b) Umfangs- und c) Radial-richtung	44
3.25	Resampling eines Signals [Mathworks, 2019] . . . . .	45
3.26	Schematische Darstellung zur Triggerkorrektur . . . . .	46
3.27	Phasengemittelte Darstellung der Machzahlverteilung . . . . .	47
3.28	Phasengemittelte Darstellung der turbulenten kinetischen Energie . . . . .	48
3.29	Phasengemittelte Darstellung des Turbulenzgrades . . . . .	49
3.30	Time-Space-Plot Machzahl . . . . .	51
3.31	Time-Space-Plot Turbulenzgrad . . . . .	52
3.32	Fourier-Analysen der Geschwindigkeiten bei a) 6%, b) 50% und c) 93% Span . . . . .	54
3.33	Radiale Linien Machzahl . . . . .	55
3.34	Kalibrierkurve für Sensor 1 nach King . . . . .	56
3.35	statische Temperaturverteilung . . . . .	56
3.36	statische Druckverteilung . . . . .	57
3.37	Radiale Linien Yaw-Angle . . . . .	57
3.38	Radiale Linien Pitch-Angle . . . . .	58
3.39	Phasengemittelte Darstellung der Machzahl aus FRAPP-Daten . . . . .	59
3.40	Phasengemittelte Darstellung des Turbulenzgrades (1D) aus FRAPP-Daten	60
3.41	Radiale Linien Turbulenzgrad . . . . .	61
3.42	Radiale Linien turbulent kinetische Energie . . . . .	61

## Tabellenverzeichnis

1.1	Technische Angaben Prüfstand . . . . .	2
2.1	Eigenschaften typischer Hitzdrahtmaterialien [Indiger, 2016] . . . . .	18
3.1	Angaben zu den Düsen [Dantec Dynamics A/S, 2016] . . . . .	24
3.2	Winkel zwischen Sensor- und Sondenkoordinatensystem für den Sensortyp 55R97Graz . . . . .	26
3.3	Wertetabelle der Kalibrierpunkte für den Sensor 1 . . . . .	33

## Anhang

### A1 Grundgleichungen der Strömungslehre

#### Navier-Stokes Gleichungen

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (57)$$

x- Impulsgleichung

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho u \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x^B \quad (58)$$

y- Impulsgleichung

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho v \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y^B \quad (59)$$

z- Impulsgleichung

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho w \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z^B \quad (60)$$

Wobei sich die Spannungen nach dem Stokesschen Reibungsgesetz ergeben zu:

$$\tau_{xx} = \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{v} \right) \quad (61)$$

$$\tau_{yy} = \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{v} \right) \quad (62)$$

$$\tau_{zz} = \mu \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{v} \right) \quad (63)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (64)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (65)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (66)$$

**A2 Matlab-Code Kalibrierung**

```
1 %% CTA- Kalibrierung für 3-Draht Sonden
2   %{
3       Mit diesem Programm ist eine Geschwindigkeits- und
4       Winkelkalibrierung für 3-Draht Sonden möglich. Dabei
5       ist zu
6       beachten, dass die Winkelkalibrierung ohne
7       Programmänderung
8       (Winkelmatrizen) nur für den Sensortyp 55R97 von Dantec
9       Dynamics
10      funktioniert.
11   %}
12 clear all
13 %% HÄNDISCH EINZUGEBENDE PARAMETER START
14 Cal_data = 'C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
15            Graphiken_FINAL\Kalibrierung_3D_16_11_18.txt'; % Name
16            der Kalibrierdatei (wird mit LabView erstellt)
17 a = 0.8; % Festlegen des
18            overhear adjustment
19 T_ref = 58.3 + 273.15; %
20            Referenztemperatur: entspricht der mittleren zu
21            erwartenden Temperatur während der Messung;
22            %% Achtung:
23            Spannungen
24            werden auf
25            diese
26            Referenztemperatur
27            korrigiert
28            – von großer
29            Bedeutung
30 alpha_20 = [0.46; 0.47; 0.45] ./ 100; % Widerstands-
31            Temperaturkoeffizient der drei Drähte(=Sensoren) bei 20°
32            Celsius (Herstellerangabe)
33 p_atm = 96310; %
34            Atmosphärendruck in Pascal; bei Kalibrierung durch
35            Screenshot festhalten (Programm – StreamLine Automatic
36            Calibrator)
37 %% HÄNDISCH EINZUGEBENDEN PARAMETER ENDE
38
39
40
41 %% IMPORTIEREN UND AUFSPALTEN (GESCHWINDIGKEIT- BZW.
42            WINKELKALIBR.) DER DATEN START
```

```
22 myData = importfile_CTA_Kalibrierung(Cal_data); %
    importfile_Kalibrierung: function, which handles the
    import of data (e.g. coma point translation)
23 n = length(myData); % Anzahl der Kalibrierpunkte
24 counter_vc = 0;
25 counter_dc = 0;
26
27 % Index ref – als Referenz werden immer Daten von der
    Kalibrierung
28 % verwendet
29 % Index cal – calibration = aus Kalibriervorgang
30 % Index vc – velocity calibration =
    Geschwindigkeitskalibrierung
31 % Index dc – directional calibration = Winkelkalibrierung
32
33 for i = 1:n
34     if (myData(i,1) == 0) && (myData(i,2) == 0)
35         counter_vc = counter_vc + 1;
36         T_cal_vc(counter_vc,1) = myData(i,3) + 273.15;
37         U_calc_vc(counter_vc,1) = myData(i,5);
38         V_cal_vc(counter_vc,1) = myData(i,6);
39         V_cal_vc(counter_vc,2) = myData(i,7);
40         V_cal_vc(counter_vc,3) = myData(i,8);
41     else
42         counter_dc = counter_dc + 1;
43         T_cal_dc(counter_dc,1) = myData(i,3) + 273.15;
44         U_calc_dc(counter_dc,1) = myData(i,5);
45         V_cal_dc(counter_dc,1) = myData(i,6);
46         V_cal_dc(counter_dc,2) = myData(i,7);
47         V_cal_dc(counter_dc,3) = myData(i,8);
48         pitch_dc(counter_dc,1) = myData(i,1);
49         yaw_dc(counter_dc,1) = myData(i,2);
50     end
51 end
52 %% IMPORTIEREN UND AUFSPALTEN (GESCHWINDIGKEIT- BZW.
    WINKELKALIBR.) DER DATEN ENDE
53
54
55 %% GESCHWINDIGKEITSKALIBRIERUNG START
56 R = 287.058; %
    Gaskonstante Luft
57 cp_vc = ones(counter_vc,1) .* 1005;
```

```
58 K_cp = [1.02251, -1.75903e-4, 4.02136e-7, -4.86946e-11];
      % Koeffizienten spezifische Wärmekapazität (Quelle:
      https://www.unternehmensberatung-babel.de/industriegase-
      lexikon/industriegase-lexikon-n-bis-z/spezifische-
      waermekapazitaet-von-gasen/index.html
59 Ma_03 = 0.3 * 343;
      % wenn Geschw.
      > Ma 0.3 ist Kompressibilität der Luft zu
      berücksichtigen
60 for i = 1:counter_vc
61     % Inkompressible Berechnung
62     if U_calc_vc(i) <= Ma_03
63         delta_cp = 1;
64
65         % iterative Bestimmung von statischer
        Temperatur
66         % (Abhängigkeit von Wärmekapazität)
67         while delta_cp > 0.001
68             T_stat_vc(i,1) = T_cal_vc(i) - (
69                 U_calc_vc(i).^2 ./ (2 .* cp_vc(i));
70             cp_new = (K_cp(1) + K_cp(2) * T_stat_vc
71                 (i) + K_cp(3) * T_stat_vc(i)^2 +
72                 K_cp(4) * T_stat_vc(i)^3) * 10^3;
73             delta_cp = abs(cp_vc(i) - cp_new);
74             cp_vc(i) = cp_new;
75         end
76
77         % Kompressible Berechnung
78         else
79             delta_Ma = 1;
80             Ma = U_calc_vc(i) ./ 343;
81             kappa = 1.4;
82
83             % iterative Bestimmung von statischer
            Temperatur
84             % (Abhängigkeit von Machzahl bzw.
            Schallgeschwindigkeit)
85             while delta_Ma > 0.001
86                 T_stat_vc(i) = T_cal_vc(i) / (1 + (kappa -
87                     1) / 2 * Ma^2);
88                 c_new = sqrt(R * kappa * T_stat_vc(i,1));
89                 Ma_new = U_calc_vc(i) / c_new;
90                 delta_Ma = Ma - Ma_new;
91                 Ma = Ma_new;
```

```
88         end
89     end
90 end
91
92 rho_vc = p_atm ./ (R * T_stat_vc);      % Dichteberechnung
93     mittels Gasgleichung
94
95 % MFD – Mass Flow Density = Massenstromdichte
96 % Auf MFD wird kalibriert
97     MFD_vc = rho_vc .* U_calc_vc;
98
99 % Berechnung des Widerstandstemperaturkoeffizients bei
100 % Basistemperatur
101     alpha_Tab = alpha_20 ./ (1 + alpha_20 * (T_ref -
102     293.15));
103
104 % Berechnung der Drahttemperaturen (T_wire)
105     T_S = a ./ alpha_Tab + T_ref;
106
107 for i =1:3
108     % Temperaturkorrektur der Spannungen
109     V_corr_vc(:,i) = V_cal_vc(:,i) .* ((T_S(i) -
110     T_stat_vc) ./ (T_S(i) - T_ref)) .^(0.5);
111
112     % Polynomfit auf Massenstromdichte
113     % Durch variieren des Polynomgrades kann beste Lösung
114     % gefunden
115     % werden
116     Cal_Const_vc(:,i) = transpose(polyfit(V_corr_vc(:,i)
117     ),MFD_vc,5));
118
119     % Berechnen von Massenstromdichte und Geschwindigkeit
120     % mittels Polynom
121     % Index calc – calculated
122     MFD_calc_vc(:,i) = polyval(Cal_Const_vc(:,i),
123     V_corr_vc(:,i));
124     U_calc_vc(:,i) = MFD_calc_vc(:,i) ./ rho_vc;
125 end
126
127 Error_vc_abs = MFD_calc_vc - [MFD_vc, MFD_vc, MFD_vc];
128 Error_vc_rel = (Error_vc_abs ./ [MFD_vc, MFD_vc, MFD_vc])
129     .* 100;
130 Error_vc_max = max(abs(Error_vc_rel));
131
132
```

```
123     for i=1:3
124         figure(i)
125         plot(MFD_calc_vc(:,i),V_corr_vc(:,i),'r','LineWidth',2)
126         hold on
127         grid on
128         plot(MFD_vc,V_corr_vc(:,i),'bx','LineWidth',2)
129         legend('Polynomfit','exakte Werte','location','
            southeast')
130         xlabel('Massenstromdichte [kg/m^2s]')
131         ylabel('Spannung [V]')
132         x_min = min(MFD_vc) * 0.9;
133         x_max = max(MFD_vc) * 1.1;
134         y_min = min(V_corr_vc(:,i)) * 0.95;
135         y_max = max(V_corr_vc(:,i)) * 1.05;
136         xlim([x_min x_max])
137         ylim([y_min y_max])
138         name = ['Geschwindigkeitskalibrierung Sensor'];
139         number = ['1';'2';'3'];
140         name_diagramm = [name number(i)];
141         title(name_diagramm)
142     end
143 %% GESCHWINDIGKEITSKALIBRIERUNG ENDE
144
145
146 %% WINKELKALIBRIERUNG START
147
148 % Winkelmatrix zwischen Sensor und Sondenkoordinatensystem
149 % (Herstellerangabe)
150     T = [54.7356, 54.7356, 54.7356;
151         45,      135,      90;
152         65.9052, 65.9052, 144.7356];
153     T_rad = cosd(T)';
154 % zuerst Drehung um Pitch- Angle und dann Drehung um Yaw-
    Angle; D wird
155 % durch Multiplikation zweier Drehmatrizen erhalten
156     D = [cosd(pitch_dc), -sind(pitch_dc) .* cosd(yaw_dc) ,
            sind(yaw_dc) .* sind(pitch_dc)];
157
158     cp_dc = ones(counter_dc,1) .* 1005;
159
160     for i=1:counter_dc
161
162         % exakte Geschwindigkeiten im
            Sondenkoordinatensystem (x,y,z)
```

```
163     % dieses KO-System ist auf dem Kalibriergerät
      rechts oben
164     % ersichtlich
165     %
166     U_sonde_dc(i,:) = [D(i,1), D(i,2), D(i,3)] .*
      (U_calc_dc(i) .* ones(1,3));
167
168     % exakte Geschwindigkeiten im
      Sensorkoordinatensystem (Drähte)
169     U_sensor_dc(i,:) = transpose(T_rad * (
      U_sonde_dc(i,:))');
170
171     if U_calc_dc(i) <= Ma_03;
172         delta_cp = 1;
173
174         % Inkompressible Berechnung (wie oben bei
      Geschwindigkeitskalibrierung)
175         while delta_cp > 0.001
176             T_stat_dc(i,1) = T_cal_dc(i) - (
      U_calc_dc(i).^2) ./ (2 .* cp_dc(i));
177             cp_new = (K_cp(1) + K_cp(2) * T_stat_dc
      (i) + K_cp(3) * T_stat_dc(i)^2 +
      K_cp(4) * T_stat_dc(i)^3) * 10^3;
178             delta_cp = abs(cp_dc(i) - cp_new);
179             cp_dc(i) = cp_new;
180         end
181
182         % kompressible Berechnung
183         else
184             delta_Ma = 1;
185             Ma = U_calc_dc(i) ./ 343;
186             kappa = 1.4;
187             while delta_Ma > 0.001
188                 T_stat_dc(i,1) = T_cal_dc(i) / (1 + (
      kappa - 1) / 2 * Ma^2);
189                 c_new = sqrt(R * kappa * T_stat_dc(i,1)
      );
190                 Ma_new = U_calc_dc(i) / c_new;
191                 delta_Ma = Ma - Ma_new;
192                 Ma = Ma_new;
193             end
194         end
195     end
196
```

```
197
198 rho_dc = p_atm ./ (R * T_stat_dc);
199 MFD_dc = rho_dc .* U_calc_dc;
200
201 for i =1:3
202     V_corr_dc(:,i) = V_cal_dc(:,i) .* ((T_S(i) - T_stat_dc
203         ) ./ (T_S(i) - T_ref)) .^0.5;
204     MFD_calc_dc(:,i) = polyval(Cal_Const_vc(:,i),V_corr_dc
205         (:,i));
206     U_calc_dc(:,i) = MFD_calc_dc(:,i) ./ rho_dc;
207 end
208
209 %% NICHT-LINEARES REGRESSIONSMODELL START
210 Velocities = U_sensor_dc .^2;
211 y_1 = U_calc_dc(:,1) .^2;
212 y_2 = U_calc_dc(:,2) .^2;
213 y_3 = U_calc_dc(:,3) .^2;
214
215 % Winkel zwischen der Geschwindigkeit und den
216 % Normalen auf die Drähte
217 angle_vw = 54.7356;
218
219 % Startwerte für pitch- und yaw- Koeffizient
220 beta0 = [0.02, 1.4];
221
222 % für die Modellfunktionen siehe Seite 298 im
223 % Streamware pro
224 % installation and user guide v6.00
225 modelfun_1 = @(b,x)(1 / ((cosd(angle_vw))^2 *
226     (1 + b(1)^2 + b(2)^2)) * (b(1)^2 * x(:,1) +
227     x(:,2) + b(2)^2 * x(:,3)));
228 mdl_1 = fitnlm(Velocities, y_1, modelfun_1,
229     beta0);
230
231 modelfun_2 = @(b,x)(1 / ((cosd(angle_vw))^2 *
232     (1 + b(1)^2 + b(2)^2)) * (b(2)^2 * x(:,1) +
233     b(1)^2 * x(:,2) + x(:,3)));
234 mdl_2 = fitnlm(Velocities, y_2, modelfun_2,
235     beta0);
236
237 modelfun_3 = @(b,x)(1 / ((cosd(angle_vw))^2 *
238     (1 + b(1)^2 + b(2)^2)) * (x(:,1) + b(2)^2 *
239     x(:,2) + b(1)^2 * x(:,3)));
```

```

228         mdl_3 = fitnlm(Velocities , y_3, modelfun_3,
229                       beta0);
230
231         Coeff = [table2array(mdl_1.Coefficients(:,1)),
232                 table2array(mdl_2.Coefficients(:,1)),
233                 table2array(mdl_3.Coefficients(:,1))];
234
235         C = [Coeff(1,1), 1, Coeff(2,1);
236             Coeff(2,2), Coeff(1,2), 1;
237             1, Coeff(2,3), Coeff(1,3)];
238         C_sq = (C .^2);
239         %% NICHT-LINEARES REGRESSIONSMODELL ENDE
240
241     for i=1:counter_dc
242         U_eff(i,:) = sum(C_sq') .^0.5 .* (U_calc_dc(i,:) .*
243         cosd(angle_vw));
244         U_wire_test(i,:) = transpose(sqrt(C_sq \ (U_eff(i,:)
245         .^2)'));
246         %U_eff_fak(i,:) = sqrt(transpose(C_sq * (
247         U_sensor_dc(i,:) .^2)'));
248         %U_wire_test(i,:) = sqrt(transpose(inv(C_sq) * (
249         U_eff(i,:) .^2)'));
250         %U_probe_test(i,:) = transpose(T_rad \ (U_wire_test
251         (i,:)'));
252     end
253
254     deviation = U_sensor_dc - U_wire_test;
255     Error_rel = (deviation ./ U_sensor_dc) .* 100;
256     Error_dc_max = max(abs(Error_rel));
257     %% WINKELKALIBRIERUNG ENDE
258
259     %% Daten in Textfile ausschreiben
260     heading = ['Const. Wire 1\t', 'Const. Wire 2\t', 'Const. Wire 3\t',
261               'Pitch Coeff.\t', 'Yaw Coeff.\r\n'];
262     no_rows = length(Cal_Const_vc);
263     appendix = zeros(no_rows-3,1);
264     pitch_coeff = [C_sq(1,3); C_sq(2,1); C_sq(3,2)];
265     pitch_coeff = [pitch_coeff; appendix];
266     yaw_coeff = [C_sq(1,1); C_sq(2,2); C_sq(3,3)];
267     yaw_coeff = [yaw_coeff; appendix];
268     data_angles = [pitch_coeff, yaw_coeff];
269     fileID = fopen('Calibration_results.txt', 'w');

```

```
263 fprintf(fileID , heading) ;
264 for i=1:no_rows
265 fprintf(fileID , '%f\t %f\t %f\t %f\t %f\t \r\n' , Cal_Const_vc(i
    ,1) , Cal_Const_vc(i ,2) , Cal_Const_vc(i ,3) , pitch_coeff(i) ,
    yaw_coeff(i)) ;
266 end
267 fclose = fileID ;
```

### A2.1 Anmerkungen zum Code

Nachfolgend werden einige Anmerkungen zum Code angeführt.

- Zeile 12: Hier ist der Name der Kalibrierdatei bzw. der Dateipfad anzugeben.
- Zeile 14: Die erste Zahl stellt die Referenztemperatur in °C dar. Diese ist an dieser Stelle anzugeben und soll der Temperatur, welche bei der Messung erwartet wird, entsprechen.
- Zeile 16: Dies sind die Koeffizienten für die Temperaturabhängigkeit der drei Drahtwiderstände - sind auf der Sensoverpackung zu finden.
- Zeile 17: p-atm ist der Atmosphärendruck. Dieser wird beim Kalibriervorgang nicht ausgeschrieben. Bei der Ansteuerung der Kalibriereinheit mit dem Automatic Calibrator Tool von Dantec ist dieser aber ersichtlich. Es empfiehlt sich während der Kalibrierung einen Screenshot zu machen.
- Zeile 57: Zur Berechnung der statischen Temperatur ist die spezifische Wärmekapazität notwendig. Diese wird hier mit einem Startwert initialisiert.
- Zeile 58: Die Wärmekapazitäten in Abhängigkeit von der Temperatur können mithilfe dieses Polynomansatzes berechnet werden.
- Zeilen 60 - 90: Die Berechnung der statischen Temperatur erfolgt durch einen iterativen Prozess. Für den inkompressiblen Fall gilt für die Total- bzw. Gesamttemperatur  $T_0$  folgenden Zusammenhang:

$$T_0 = T_{stat} + \frac{u^2}{2c_p} \quad (67)$$

Ab einer Geschwindigkeit von  $Ma \geq 0,3$  muss zudem die Kompressibilität von Luft berücksichtigt werden.

$$T_0 = T_{stat} \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right) \quad (68)$$

- Zeile 92: Die Dichte des Mediums im Kalibrierkanal kann mithilfe der idealen Gasgleichung, in welche die statischen Werte einzusetzen sind, berechnet werden.
- Zeile 99: alpha-Tab ist der korrigierte Temperaturkoeffizient der Widerstände bei der Referenztemperatur

- Zeile 150: Winkel zwischen Sensor- und Probenkoordinatensystem. Sind aus der StreamWare Pro Software ersichtlich.
- Zeile 156: Die Matrix D kommt wie in Abschnitt 3.3.2 erklärt wird, zustande.
- Zeilen 206 - 235: Hier werden mithilfe eines nichtlinearen Regressionsmodelles die Pitch- und Yaw- Koeffizienten ermittelt. Die Routine ermittelt nach dem Least-Square- Verfahren die am besten passenden Koeffizienten. Dabei sind in Velocities die exakten Geschwindigkeiten im Sensorkoordinatensystem und in den y- Vektoren die Geschwindigkeiten aus der Kalibriervorschrift.

### A3 Matlab-Code Auswertung

```
1 %% CTA- Auswertung für 3-Draht Messungen
2   %{
3       Mit diesem Programm ist eine zeit- und phasengemittelte
4       Auswertung einer
5       3- Hitzdrahtmessung möglich. Wichtig ist , dass die
6       Messdaten als Dezimaltrennzeichen
7       einen Punkt und kein Komma besitzen. Im ersten Teil
8       sind einige
9       händische Eingaben zu erledigen. Es empfiehlt sich für
10      die
11      Auswertung einen eigenen Ordner zu erstellen und alle
12      Dateien darin
13      abzuspeichern.
14   %}
15 %
16 %% HÄNDISCH EINZUGEBENDE DATEN START
17     numFiles = 480;                                % Anzahl
18         der Messpunkte
19     T_w = [266.71, 270.75, 266.71] + 273.15;      %
20         Drahttemperatur der 3 Drähte eingeben (aus Labview
21         bekannt)
22     T_ref = 58.3 + 273.15;                          %
23         Referenztemperatur: aus Kalibrierung bekannt
24     num_rad_line = 20;                              % Anzahl
25         der Messpunkte einer Radiallinie
26     % Textdatei aus Kalibrierung mit Koeffizienten für
27         Geschwindigkeit, Pitch und Yaw
28     Cal_data = dlmread('C:\Users\Balthasar\Documents\
29         Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\
30         Calibration_results_default_T_c.txt', '\t', 1, 0);
31
32     % Durch rad und circ_pos wird Messgitter festgelegt;
33     % rot_probe: Verdrehwinkel der Sonde, damit sie optimal
34         angeströmt wird
35     rad_pos = dlmread('C:\Users\Balthasar\Documents\
36         Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\RadialLinePlaneB_20points
37         .txt');
38     circ_pos = dlmread('C:\Users\Balthasar\Documents\
39         Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\CircLinePlaneB_24points.
40         txt');
41     rot_probe = dlmread('C:\Users\Balthasar\Documents\
42         Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\Rotation_B_20points.txt')
```

```
24 ;
25 % 5HP = Fünflochsonde; Index 39 – in Mischkammer
26 % Durch Daten aus Messung mit Fünflochsonde und aus CTA-
    Messung erfolgt Mittelung
27 T_stat_5HP = dload('C:\Users\Balthasar\Documents\
    Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\T_stat.mat');
28 T_39_5HP = dload('C:\Users\Balthasar\Documents\
    Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\TT39XX.mat');
29 T_39_CTA = dload('C:\Users\Balthasar\Documents\
    Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\TT39XX_C.mat');
30
31 p_stat_5HP = dload('C:\Users\Balthasar\Documents\
    Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\P_stat.mat');
32 p_39_5HP = dload('C:\Users\Balthasar\Documents\
    Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\PT39XX.mat');
33 p_39_CTA = dload('C:\Users\Balthasar\Documents\
    Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\PT39XX_C.mat');
34
35 FA = 0; % auf 1 setzen wenn Fourier- Analyse der
    Geschwindigkeiten gewünscht ist.
36 %% HÄNDISCH EINZUGEBENDE DATEN ENDE
37
38
39 %% MESSDATEN IMPORTIEREN START
40 startRow = 25; % Einlesen der Daten beginnt bei Zeile
    25
41 endRow = inf; % Zeile bis zu der eingelesen werden
    soll (inf = bis zur letzten Zeile)
42 myData = cell(1,numFiles);
43 Zeit = 0;
44 for fileNum = 1:numFiles
45     tic
46     c = num2str(fileNum);
47     fileName = cat(2,'C:\Users\Balthasar\Documents\
        Masterarbeit\MP_',c);
48     myData{fileNum} = import_CTA_Data(fileName ,startRow
        ,endRow);
49     clc
50     import_time = toc;
51     Zeit = (Zeit + import_time);
52     calc_time = ceil((Zeit / fileNum) * (numFiles -
        fileNum) / 60);
53     message_1 = 'Die Zeit für den Datenimport beträgt
```

```

54         ca. noch ' ;
55         message_2 = ' Minute(n) ' ;
56         message = cat(2, message_1, num2str(calc_time),
57         message_2);
58         disp(message);
59     end
60 %% MESSDATEN IMPORTIEREN ENDE
61 %% BERECHNUNG STOFFWERTE, ZUWEISUNGEN & DEFINITIONENEN START
62     % Berechnung statsiche(r) Temperatur bzw. Druck
63     T_stat_5HP = T_stat_5HP(:,1:24);
64     T_39_5HP = T_39_5HP(:,1:24);
65     T_stat = (T_stat_5HP ./ T_39_5HP) .* T_39_CTA;
66
67     p_stat_5HP = p_stat_5HP(:,1:24);
68     p_39_5HP = p_39_5HP(:,1:24);
69     p_stat = (p_stat_5HP ./ p_39_5HP) .* p_39_CTA;
70
71     % Zuweisung Kalibrierkonstanten
72     Cal_Const = [Cal_data(:,1), Cal_data(:,2), Cal_data
73     (:,3)]; % Koeffizienten Geschwindigkeitspolynom
74     C_sq = [Cal_data(1,5), 1, Cal_data(1,4);
75     % Pitch und Yaw-
76     Koeffizienten (zum Quadrat)
77     Cal_data(2,4), Cal_data(2,5), 1;
78     1, Cal_data(3,4), Cal_data(3,5)];
79
80     % Definition Transformationsmatrix
81     T = [54.7356, 54.7356, 54.7356; % Winkel zwischen
82     Sensor und Sondenkoordinatensystem in Grad (
83     Herstellerangaben)
84     45, 135, 90;
85     65.9052, 65.9052, 144.7356];
86     T_rad = cosd(T)';
87     alpha_cal = 54.7356; % Herstellerangabe
88     - zur anschließenden Berechnung notwendig
89
90     % Variablendefinition zur Performancesteigerung
91     U_acr_ta = zeros(numFiles,3); % a-axial, c-
92     circumference, r-radial Geschwindigkeit
93     U_abs_ta = zeros(numFiles,1);
94     Tu_ta = zeros(numFiles,1);
95 %% BERECHNUNG STOFFWERTE, ZUWEISUNGEN & DEFINITIONENEN ENDE

```

```
89
90
91 %% START AUSWERTUNG
92     sort_var_k = 0;      % Sortiervariable
93     Zeit = 0;
94
95     for j = 1 : numFiles
96         tic
97         data = myData{j};
98         Time = data(:,1);
99         Voltage = [data(:,2), data(:,3), data(:,4)];
100        Trigger = data(:,5);
101        number_points = length(Time);
102
103        %% SORTIERUNG START
104        % Da einmal von der Nabe Richtung Spitze und
105        % anschließend von
106        % der Spitze Richtung Nabe gemessen wird, ist
107        % sicherzustellen,
108        % dass die jeweils richtigen Werte verwendet werden
109        % . Dies ist
110        % mit den Hilfs- und Sortiervariablen möglich.
111        % Achtung!
112        % Algorithmus ist auf 20 radiale Positionen
113        % eingestellt.
114        help_var_up = 0;      % Hilfsvariable
115        help_var_down = 0;    % Hilfsvariable
116        sort_var_a = ceil(j/num_rad_line); % 20
117        % radiale Positionen —> ceil: rundet auf
118        % nächstgrößeren Integer
119
120        if mod(sort_var_a,2) == 1
121            sort_var_k = sort_var_k + 1;
122        else
123            sort_var_k = sort_var_k - 1;
124        end
125
126        if (mod(j,num_rad_line) == 0) && (mod(
127            sort_var_a,2) == 1)
128            help_var_up = 1;
129        end
130
131        if mod(j,num_rad_line) == 0 && mod(
132            sort_var_a,2) == 0
```

```

124         help_var_down = 1;
125     end
126
127     T_measure = T_stat(sort_var_k, sort_var_a);
128     p_measure = p_stat(sort_var_k, sort_var_a);
129     rho = (p_measure * 10^5) / (287 * T_measure);
130
131     roll = rot_probe(sort_var_k); % an jeder
        radialen Position wird die Sonde anders
        angestellt
132     D_roll = [cosd(roll), sind(roll), 0;
133              -sind(roll), cosd(roll), 0;
134              0, 0, 1]; %
        entspricht der Drehmatrix der
        Sonde in Haupströmungsrichtung
        %% SORTIERUNG ENDE
135
136
137 %% BERECHNUNG DER GESCHWINDIGKEITEN START
138     % Definiere von Matrizen (Performancesteigerung)
139     Voltage_corr = zeros(size(Voltage));
140     MFD_cal = zeros(size(Voltage));
141     U_cal = zeros(size(Voltage));
142     U_eff = zeros(size(Voltage));
143     U_wire = zeros(size(Voltage));
144     U_probe = zeros(size(Voltage));
145     U_acr = zeros(size(Voltage));
146
147
148     for i=1:3
149         Voltage_corr(:, i) = Voltage(:, i) .* ((T_w(
            i) - T_measure) ./ (T_w(i) - T_ref))
            .^(0.5); % Temperaturkorrektur der
            Spannungen
150         MFD_cal(:, i) = polyval(Cal_Const(:, i),
            Voltage_corr(:, i));
151         U_cal(:, i) = MFD_cal(:, i) ./ rho;
152     end
153
154     for i=1:number_points
155         U_eff(i, :) = sum(C_sq') .^0.5 .* U_cal(i, :)
            .* cosd(alpha_cal); % effektive
            Kühlgeschwindigkeit
156         U_wire(i, :) = sqrt(abs(transpose(C_sq \ (

```

```

    U_eff(i, :).^2 ')); %
    Geschwindigkeit im
    Sensorkoordinatnsystem
157 U_probe(i, :) = transpose(T_rad \ (U_wire(i
    ,:)) '); %
    Geschwindigkeit im
    Probenkoordinatensystem
158 U_acr(i, :) = (D_roll * U_probe(i, :))';
    %
    Berücksichtigung der Sondenverdrehung
    —> wahre Geschwindigkeit
159 end
160
161 % Indizess: ta = time averaged (zeitgemittelt);
162 %           pa = phase averaged (
    phasengemittelt)
163 U_acr_ta(j, :) = mean(U_acr);
    % zeitlich gemittelte Geschwindigkeiten
    in axial-, umfangs- und radial Richtung
164 U_abs_ta(j) = sqrt(U_acr_ta(j,1).^2 +
    U_acr_ta(j,2).^2 + U_acr_ta(j,3).^2);
    % zeitlich gemittelte
    Absolutgeschwindigkeit
165
166 % Berechnung der Winkel
167 pitch_angle_ta(j,1) = atand(abs(U_acr_ta(j
    ,3)) / U_acr_ta(j,1));
168 yaw_angle_ta(j,1) = atand((U_acr_ta(j,2).*
    (-1)) / sqrt(U_acr_ta(j,1)^2 + U_acr_ta(
    j,3)^2));
169
170 %% BERECHNUNG DER GESCHWINDIGKEITEN ENDE
171
172 % Berechnung des Turbulenzgrades
173 for k=1:3
174     U_rms_ta(j,k) = 1 / (number_points - 1)
        * sum((U_acr(:,k) - U_acr_ta(j,k))
        .^2); % rms - root mean sqaure
175 end
176
177 Tu_ta(j) = 1 / U_abs_ta(j) * sqrt(1 / 3 *
    sum(U_rms_ta(j, :), 2));
178

```

```
179         % Berechnung turbulent kinetische Energie
180         E_kin_turb_ta(j,1) = sum(U_rms_ta(j,:),2) /
181         2;
182
183 %% PHASENSGEMITTELTE AUSWERTUNG START
184 Trigger_Level = 0.85; %
185     willkürlich gewählt
186 Trigger_max = 2.85; % maximale
187     Spannung des Triggersignals
188 Start_r = Trigger_Level * Trigger_max; % Startwert
189     Triggersignal für eine Rotorumdrehung
190 l = 0;
191 clearvars lines % muss immer gelöscht werden, da
192     Anzahl durch Drehzahlschwankungen
193     unterschiedlich sein kann
194
195 % Berechnung der Zeilen, an denen Triggersignal
196     anliegt
197 for i=1:length(Trigger)-1
198     if ((Trigger(i) > Start_r) && (Trigger(i+1)
199         < Start_r)) || Trigger(i) == Start_r
200         l = l + 1;
201         lines(l) = i;
202     end
203 end
204
205 % Adaption Korrektur Phasenauswertung Start
206 Umf_pkte = 0:1:23;
207 delta_phi_rad = .. * pi / 180;
208 rad_innen = ..;
209 Bogenlaenge = rad_innen * (delta_phi_rad .*
210     Umf_pkte);
211
212 % Adaption Korrektur Phasenauswertung Ende
213
214 for k=1:length(lines)-1 % Schleife geht durch alle
215     Umdrehungen
216     Zahl_punkte = lines(k+1) - lines(k);
217
218     % Berechnung der Triggerkorrektur
219     time_rot = Time(lines(k+1)) - Time(lines(k));
220         % Zeit für eine Rotorumdrehung
221     n_aktuell = 1 / time_rot;
222         % aktuelle
223     Rotordrehzahl
```

```
210     v_akt_innen = rad_innen * 2 * pi * n_aktuell;  
           % aktuelle Geschwindigkeit an der  
           Nabe  
211     delta_t_korr = Bogenlaenge(sort_var_a) /  
           v_akt_innen; % Korrekturzeit Triggersignal  
212     Korr_Schritte_min = floor(delta_t_korr /  
           0.000004); % korrektes Signal liegt  
           zwischen den Schritten min und max  
213     Korr_Schritte_max = ceil(delta_t_korr /  
           0.000004);  
214     Korr_Schritte_exakt = delta_t_korr / 0.000004;  
215     delta_interp = Korr_Schritte_max -  
           Korr_Schritte_exakt; % Interpolationsweite  
216     lines_korr_anf = lines(k) - Korr_Schritte_min;  
217     lines_korr_end = lines(k+1) - 1; %-1 weil  
           Signal an Stelle (k+1) gehört schon zur  
           nächsten Umdrehung  
218     Anzahl_korr = lines_korr_end - lines_korr_anf;  
219  
220     kor_var_lines = 0;  
221  
222     if lines_korr_anf <= 0  
223         kor_var_lines = 1; % falls Korrektur zu  
           groß, muss auf die erste Umdrehung  
           verzichtet werden  
224         continue  
225     end  
226  
227     clearvars U_rms_pa && U_acr_korr;  
228  
229     U_acr_korr(1,:) = U_acr((lines(k)-  
           Korr_Schritte_max),:) + delta_interp .* (  
           U_acr((lines(k)-Korr_Schritte_min),:)-U_acr(  
           ((lines(k)-Korr_Schritte_max),:)));  
230     if Korr_Schritte_max == 0 % bei der ersten  
           radialen Linie ist keine Interpolation  
           notwendig  
231         U_acr_korr(1:Anzahl_korr+1,:) = U_acr(  
           lines_korr_anf:lines_korr_end,:);  
232  
233     else if Korr_Schritte_max ~= 0  
234         U_acr_korr(2:Anzahl_korr+2,:) = U_acr(  
           lines_korr_anf:lines_korr_end,:);  
235     end
```

```

236
237         end
238
239         U_acr_corr_res(:,1,k) = resample(U_acr_korr(:,1),
240             ,2048,length(U_acr_korr(:,1)));
241         U_acr_corr_res(:,2,k) = resample(U_acr_korr(:,2),
242             ,2048,length(U_acr_korr(:,2)));
243         U_acr_corr_res(:,3,k) = resample(U_acr_korr(:,3),
244             ,2048,length(U_acr_korr(:,3)));
245     end
246
247     U_mean_3 = mean(U_acr_corr_res,3);
248     U_mean_acr = mean(U_mean_3);
249     for l=1:3
250         for jj = 1:size(U_acr_corr_res,3)
251             U_rms_pa(:,l,jj) = (U_acr_corr_res(:,l,jj)
252                 - U_mean_3(:,l)).^2;
253         end
254     end
255     U_rms_pa = mean(U_rms_pa,3);
256     U_rms_pa_ca{j} = U_rms_pa;
257     Tu_rot {j} = 1 / sqrt(U_mean_acr(1)^2 + U_mean_acr
258         (2)^2 + U_mean_acr(3)^2) * sqrt(1 / 3 * sum(
259         U_rms_pa,2));
260     U_pa{j} = sqrt(U_mean_3(:,1).^2 + U_mean_3(:,2).^2
261         + U_mean_3(:,3).^2);
262     E_kin_turb_pa{j} = sum(U_rms_pa,2) ./ 2;
263     %% PHASENSGEMITTELTE AUSWERTUNG ENDE
264
265     if FA == 1;
266         %% START FOURIER ANALYSE
267         % führt für jeden Messpunkt eine Fourieranalyse für
268         % die
269         % Geschwindigkeiten durch
270     for ll=1:3
271         Fs = 250000; % Samplefrequenz
272         T = 1 / Fs;
273         L = length(U_acr(:,ll));
274         t = (0:L-1) * T;
275
276         S = U_acr(:,ll); % Signal
277         plot(t(1:end),S(1:end)) % plot des Zeitsignals
278
279         y = fft(S);

```

```
272     p2 = abs(y / L);
273     p1 = p2(1:L/2+1);
274     p1(2:end-1) = 2 * p1(2:end-1);
275     f = Fs * (0:(L/2))/L;
276     plot(f,p1, 'LineWidth',1.5);
277     grid on
278
279     xlabel('f / f_{ref}')
280     ylabel('Amplitude [m/s]')
281     xlim([0 45000])
282     ylim([0 2.5])
283     name_save_1 = '_Vel_MP_';
284     name_save_2 = '.png';
285     Nummer = num2str(j);
286     name_save = cat(2, 'C:\Users\Balthasar\Documents\
        Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\Auswertung\FA_S', num2str(
        ll), name_save_1, Nummer, name_save_2);
287     saveas(gcf, name_save);
288     close(gcf)
289 end
290
291 end
292 %% ENDE FOURIER ANALYSE
293
294     if help_var_up ==1
295         sort_var_k = sort_var_k+1;
296     end
297     if help_var_down == 1
298         sort_var_k = sort_var_k -1;
299     end
300
301     clc
302     Zeit_Loop = toc;
303     Zeit = (Zeit + Zeit_Loop);
304     Messpunkt_Nummer = j
305     calc_time = ceil((Zeit / j) * (numFiles - j) / 60);
306     message_1 = 'Die Rechenzeit beträgt ca. noch ';
307     message_2 = ' Minute(n)';
308     message = cat(2, message_1, num2str(calc_time),
        message_2);
309     disp(message);
310 end
311 clc
312 disp('Plotting...');
```

```
313 %% AUSWERTUNG ENDE
314
315 %% SORTIEREN VON ERGEBNISSEN START
316 %   zeitgemittelten Ergebnisse müssen für graphische
      Darstellung noch
317 %   richtig sortiert werden
318     k = [1:20]';
319     for i=1:24
320         U_ta(1:20,i) = U_abs_ta(k);
321         Tu_sort_ta(1:20,i) = Tu_ta(k);
322         E_kin_turb_sort_ta(1:20,i) = E_kin_turb_ta(k);
323         pitch_angle_sort_ta(1:20,i) = pitch_angle_ta(k);
324         yaw_angle_sort_ta(1:20,i) = yaw_angle_ta(k);
325
326         if mod(i,2) == 0
327             Tu_sort_ta(1:20,i) = flipud(Tu_sort_ta(1:20,i))
328                 ;
329             U_ta(1:20,i) = flipud(U_ta(1:20,i));
330             E_kin_turb_sort_ta(1:20,i) = flipud(
331                 E_kin_turb_sort_ta(1:20,i));
332             pitch_angle_sort_ta(1:20,i) = flipud(
333                 pitch_angle_sort_ta(1:20,i));
334             yaw_angle_sort_ta(1:20,i) = flipud(
335                 yaw_angle_sort_ta(1:20,i));
336         end
337
338         k = k + 20;
339     end
340
341     a_lokal = sqrt(1.4 .* 287 .* T_stat); % Berechnen der
      lokalen Schallgeschwindigkeit
342     Tu_sort_ta = Tu_sort_ta * 100;
343     Ma_sort_ta = U_ta ./ a_lokal;
344 %% SORTIEREN VON ERGEBNISSEN ENDE
345
346 %% GRAPHISCHE DARSTELLUNG START
347     U_phase_mat = cell2mat(U_pa);
348     Tu_phase_mat = cell2mat(Tu_pa);
349     Tu_phase_mat = Tu_phase_mat .* 100;
350     E_kin_turb_mat = cell2mat(E_kin_turb_pa);
351
352     clearvars y; % Löscht y- Variable von Fourier- Analyse
353
354     vanes = ..; % Anzahl Leitschaufeln
```

```
351     arrow_scale = 10;
352     fpfad1 = 'C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
           CTA_PROGRAMME\Auswertung';
353     veloplot = 0;
354     delta_cu = 20;
355     delta_cr = 0;
356     circ_spacing = 4;
357     Umfangspunkte = 24;
358     ri = ..; % Nabenradius
359     h_ch = ..; % Kanalhöhe
360     phi0 = ..; % Winkelstartwert für graphische Darstellung
361     dphi = ..; % Winkeldifferenz in Umfangsrichtung
362     phi = (phi0:dphi:(phi0+(Umfangspunkte-1)*dphi));
363     Radialpunkte = 20;
364     radiale_Schrittweite = -1 * rad_pos;
365     Neigung = ..;
366     offset_Nabe =.. ;
367     xi0 = ..;
368     xa0 = xi0 - h_ch * sin(Neigung/180*pi);
369     ra = ri + h_ch;
370
371     for k=1:Radialpunkte
372         r = ri + (offset_Nabe + radiale_Schrittweite(k)) * cos(
           Neigung*pi/180);
373         deltar = radiale_Schrittweite(k);
374
375         for h=1:Umfangspunkte
376             x(k,h) = xi0 - deltar * sin(Neigung/180*pi);
377             y(k,h) = r * sin(phi(h)*pi/180);
378             z(k,h) = r * cos(phi(h)*pi/180);
379         end
380
381     end
382
383     for h=1:Umfangspunkte
384         xi(h) = xi0 / 1000;
385         xa(h) = xa0 / 1000;
386         yi(h) = ri * sin(phi(h)*pi/180);
387         ya(h) = ra * sin(phi(h)*pi/180);
388         zi(h) = ri * cos(phi(h)*pi/180); %*cos(Neigung*pi/180) ;
389         za(h) = ra * cos(phi(h)*pi/180); %*cos(Neigung*pi/180) ;
390
391         y_label(h)=(ri -0.002)*sin(phi(h)*pi/180);
392         z_label(h)=(ri -0.002)*cos(phi(h)*pi/180); %*cos(Neigung*
```

```

    pi/180) ;
393     y_text(h)=(ri -0.009)*sin(phi(h)*pi/180);
394     z_text(h)=(ri -0.009)*cos(phi(h)*pi/180);%*cos(Neigung*
    pi/180) ;
395 end
396
397
398 for j=1:Radialpunkte % Berechnung der Fläche einer Radiallinie
399     Ages_U(j)=0;
400
401     r = ri + offset_Nabe + radiale_Schrittweite(j);
402
403     if j~=1 & j~=Radialpunkte
404         ro=r+(radiale_Schrittweite(j+1)-
            radiale_Schrittweite(j))/2;
405         ru=r-(radiale_Schrittweite(j)-radiale_Schrittweite(
            j-1))/2;
406         dr=ro-ru;
407         dA=2*pi*(ro+ru)/2*dr*dphi/360;
408
409     else
410
411         if j==1
412             ro=r+(radiale_Schrittweite(j+1)-
                radiale_Schrittweite(j))/2;
413             ru=r-(radiale_Schrittweite(j+1)-
                radiale_Schrittweite(j))/2; %gleiche
                Schrittweite nach unten wie nach oben
                annehmen
414             dr=ro-ru;
415             dA=2*pi*(ro+ru)/2*dr*dphi/360;
416         end
417
418         if j==Radialpunkte
419             ro=r+(radiale_Schrittweite(j)-
                radiale_Schrittweite(j-1))/2; %gleiche
                Schrittweite nach oben wie nach unten
                annehmen
420             ru=r-(radiale_Schrittweite(j)-
                radiale_Schrittweite(j-1))/2;
421
422             dr=ro-ru;
423             dA=2*pi*(ro+ru)/2*dr*dphi/360;
424         end

```

```
425
426         end
427         dA_rad(j)=dA;
428     end
429 A_rad = sum(dA_rad);
430
431 %% Zeitlich gemittelte Ergebnisse
432 kv = 0;
433 LinePlot = 0;
434
435 % Plot Machzahl zeitgemittelt
436 label_str = 'Ma';
437 Ma_min = min(min(Ma_sort_ta));
438 Ma_max = max(max(Ma_sort_ta));
439 plot_range = [Ma_min Ma_max]; % Druckbereich z.B. von Ma 0.3
    bis Ma 0.8
440 fun_arcplot(Ma_sort_ta, label_str, plot_range, veloplot, delta_cu,
    delta_cr, circ_spacing, y, z, yi, zi, ya, za, y_label, z_label, y_text
    , z_text, ri, h_ch, phi, Umfangspunkte, vanes, arrow_scale, fpfad1,
    kv, LinePlot)
441 title({'Machzahl - zeitlich gemittelt', ' '})
442 saveas(gcf, 'C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
    CTA_PROGRAMME\Auswertung\Ma_ta.png')
443 close(gcf)
444
445 % Plot Turbulenzgrad zeitgemittelt
446 label_str = 'Tu [%]';
447 Tu_min = min(min(Tu_sort_ta));
448 Tu_max = max(max(Tu_sort_ta));
449 plot_range = [Tu_min Tu_max]; % Druckbereich z.B. von Ma 0.3
    bis Ma 0.8
450 fun_arcplot(Tu_sort_ta, label_str, plot_range, veloplot, delta_cu,
    delta_cr, circ_spacing, y, z, yi, zi, ya, za, y_label, z_label, y_text
    , z_text, ri, h_ch, phi, Umfangspunkte, vanes, arrow_scale, fpfad1,
    kv, LinePlot)
451 title({'Turbulenzgrad - zeitlich gemittelt'; ' '})
452 saveas(gcf, 'C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
    CTA_PROGRAMME\Auswertung\Tu_ta.png')
453 close(gcf)
454
455 % Plot turbulent kinetische Energie zeitgemittelt
456 label_str = ' k [m^2/s^2]';
457 E_kin_min = min(min(E_kin_turb_sort_ta));
458 E_kin_max = max(max(E_kin_turb_sort_ta));
```

```
459 plot_range = [E_kin_min E_kin_max]; % Druckbereich z.B. von Ma
    0.3 bis Ma 0.8
460 fun_arcplot(E_kin_turb_sort_ta, label_str, plot_range, veloplot,
    delta_cu, delta_cr, circ_spacing, y, z, yi, zi, ya, za, y_label,
    z_label, y_text, z_text, ri, h_ch, phi, Umfangspunkte, vanes,
    arrow_scale, fpfad1, kv, LinePlot)
461 title({'turbulent kinetische Energie – zeitlich gemittelt'; ' '
    })
462 saveas(gcf, 'C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
    CTA_PROGRAMME\Auswertung\Turb_kin_Ener_ta.png')
463 close(gcf)
464
465 % Plot Yaw– Angle zeitgemittelt
466 label_str = 'Yaw–Angle [°]';
467 Yaw_min = min(min(yaw_angle_sort_ta));
468 Yaw_max = max(max(yaw_angle_sort_ta));
469 plot_range = [Yaw_min Yaw_max]; % Druckbereich z.B. von Ma 0.3
    bis Ma 0.8
470 fun_arcplot(yaw_angle_sort_ta, label_str, plot_range, veloplot,
    delta_cu, delta_cr, circ_spacing, y, z, yi, zi, ya, za, y_label,
    z_label, y_text, z_text, ri, h_ch, phi, Umfangspunkte, vanes,
    arrow_scale, fpfad1, kv, LinePlot)
471 title({'Yaw–Angle – zeitlich gemittelt'; ' '})
472 saveas(gcf, 'C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
    CTA_PROGRAMME\Auswertung\Yaw_Angle_ta.png')
473 close(gcf)
474
475 % Plot Pitch– Angle zeitgemittelt
476 label_str = 'Pitch–Angle [°]';
477 Pitch_min = min(min(pitch_angle_sort_ta));
478 Pitch_max = max(max(pitch_angle_sort_ta));
479 plot_range = [Pitch_min Pitch_max]; % Druckbereich z.B. von Ma
    0.3 bis Ma 0.8
480 fun_arcplot(pitch_angle_sort_ta, label_str, plot_range, veloplot,
    delta_cu, delta_cr, circ_spacing, y, z, yi, zi, ya, za, y_label,
    z_label, y_text, z_text, ri, h_ch, phi, Umfangspunkte, vanes,
    arrow_scale, fpfad1, kv, LinePlot)
481 title({'Pitch–Angle – zeitlich gemittelt'; ' '})
482 saveas(gcf, 'C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
    CTA_PROGRAMME\Auswertung\Pitch_Angle_ta.png')
483 close(gcf)
484
485 % Videoplot Machzahl
486 kv =0;
```

```
487 label_str = 'Ma';
488 LinePlot = 1;
489 plot_range = [ .. ]; % muss eventuell adaptiert werden
490 for i=28:313
491     Zeilenvektor = U_phase_mat(i,:);
492     Mfeld = reshape(Zeilenvektor,[20,24]);
493     for j = 2:2:24
494         Mfeld(:,j) = flipud(Mfeld(:,j));
495     end
496     Mfeld = Mfeld ./ a_lokal;
497     kv = kv +1;
498     close(gcf)
499     fun_arcplot(Mfeld,label_str,plot_range,veloplot,delta_cu,
500                delta_cr,circ_spacing,y,z,yi,zi,ya,za,y_label,z_label,
501                y_text,z_text,ri,h_ch,phi,Umfangspunkte,vanes,
502                arrow_scale,fpfad1,kv,LinePlot)
503     title({'Ma phasengemittelt';' '})
504     drawnow
505     F(kv) = getframe(gcf);
506     pause(0.01)
507 end
508 video = VideoWriter('C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
509 CTA_PROGRAMME\Auswertung\Ma_pa.MP4','MPEG-4');
510 open(video)
511 writeVideo(video,F)
512 close(video)
513
514 % Videoplot Turbulenzgrad
515 kv =0;
516 label_str = 'Tu [%] ';
517 plot_range = [..];
518 for i=28:..
519     Zeilenvektor = Tu_phase_mat(i,:);
520     Mfeld = reshape(Zeilenvektor,[20,24]);
521     for j = 2:2:24
522         Mfeld(:,j) = flipud(Mfeld(:,j));
523     end
524     kv = kv +1;
525     close(gcf)
526     fun_arcplot(Mfeld,label_str,plot_range,veloplot,
527                delta_cu,delta_cr,circ_spacing,y,z,yi,zi,ya,za,
528                y_label,z_label,y_text,z_text,ri,h_ch,phi,
```

```
        Umfangspunkte , vanes , arrow_scale , fpfad1 , kv , LinePlot)
525     title ({ 'Tu phasengemittelt ' ; ' ' })
526     drawnow
527     F(kv) = getframe(gcf);
528     pause(0.01)
529     end
530     video = VideoWriter('C:\Users\Balthasar\Documents\Masterarbeit\
    CTA_PROGRAMME\Auswertung\Tu_pa.MP4', 'MPEG-4');
531     open(video)
532     writeVideo(video,F)
533     close(video)
534     close(gcf)
535
536
537
538     %% TIME SPACE PLOT START Turbulenzgrad
539     for Span = 1:20; % Radialer Punkt in Kanal (1-20 ist möglich)
540
541         Span_pro = round((abs(rad_pos(Span)) + ..) );
542         Time_Vektor = [0:..] ./ ..;
543         Span_Vektor = linspace(0,1.27,24)';
544         for i_points = 1:..
545             i_points_int = i_points + 50; % Die ersten Messwerte
                sind durch Regelverhalten beeinträchtigt
546             Plot_Vektor = zeros(24,1);
547             Plot_Vektor(1,1) = Tu_phase_mat(i_points_int ,Span);
548             for kj = 2:24
549                 if mod(kj,2) == 0
550                     Span_pos = 20 * kj - Span + 1;
551                 else
552                     Span_pos = Span + (kj-1) * 20;
553                 end
554                 Plot_Vektor(kj,1) = Tu_phase_mat(i_points_int ,
                    Span_pos);
555             end
556
557             Plot_Matrix(:,i_points) = Plot_Vektor(:,1);
558         end
559         y_rotor = 0.62 .* Time_Vektor -0.12;
560         y_stator_rotor = 1.9 .* Time_Vektor -0.5;
561         value_min = min(min(Plot_Matrix));
562         value_max = max(max(Plot_Matrix));
563         surf(Time_Vektor ,Span_Vektor ,Plot_Matrix);
564         colormap jet
```

```
565 shading interp
566 caxis([value_min value_max])
567 c = colorbar;
568 c.Label.String = 'Tu';
569 hold on
570 gcf
571 z_lin = ones(1,..)*12;
572 line(Time_Vektor,y_rotor,z_lin,'Color','k','LineWidth',2,'
    LineStyle','--');
573 % line(Time_Vektor,y_stator_rotor,z_lin,'Color','m','
    LineWidth',2,'LineStyle','--');
574 xlim([0 2])
575 ylim([0 1.27])
576 titlename1 = cat(2,'Span ',num2str(Span_pro),'%');
577 savename1 = cat(2,'C:\Users\Balthasar\Documents\
    Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\Auswertung\TS_Tu_',num2str(
    Span),'.png');
578 title(titlename1)
579 view(2)
580 xlabel('Zeit t / \tau')
581 ylabel('\Delta \Theta / \Theta_{HD-Leitrad}')
582 saveas(gcf,savename1)
583 close(gcf)
584 end
585
586 %% TIME SPACE PLOT ENDE
587
588 %% TIME SPACE PLOT START Machzahl
589 for Span = 1:20; % Radialer Punkt in Kanal (1-20 ist möglich)
590
591 Span_pro = round((abs(rad_pos(Span)) + ..);
592 Time_Vektor = [0:..] ./ ..;
593 Span_Vektor = linspace(0,1.27,24)';
594 for i_points = 1:..
595     i_points_int = i_points + 50;
596     Plot_Vektor = zeros(24,1);
597     Plot_Vektor(1,1) = U_phase_mat(i_points_int,Span);
598     for kj = 2:24
599         if mod(kj,2) == 0
600             Span_pos = 20 * kj - Span + 1;
601         else
602             Span_pos = Span + (kj-1) * 20;
603         end
604         Plot_Vektor(kj,1) = U_phase_mat(i_points_int,
```

```
        Span_pos);
605     end
606
607     Plot_Matrix(:, i_points) = Plot_Vektor(:, 1) ./ (a_lokal(
        Span, :))';
608     end
609     y_rotor = 0.62 .* Time_Vektor - 0.12;
610     y_stator_rotor = 1.9 .* Time_Vektor - 0.5;
611     value_min = min(min(Plot_Matrix));
612     value_max = max(max(Plot_Matrix));
613     surf(Time_Vektor, Span_Vektor, Plot_Matrix);
614     colormap jet
615     shading interp
616     caxis([value_min value_max])
617     c = colorbar;
618     c.Label.String = 'Ma';
619     hold on
620     gcf
621     z_lin = ones(1, ..) * 12;
622     line(Time_Vektor, y_rotor, z_lin, 'Color', 'k', 'LineWidth', 2, '
        LineStyle', '--');
623     % line(Time_Vektor, y_stator_rotor, z_lin, 'Color', 'm', '
        LineWidth', 2, 'LineStyle', '--');
624     xlim([0 2])
625     ylim([0 1.27])
626     titlename1 = cat(2, 'Span ', num2str(Span_pro), '%');
627     savename1 = cat(2, 'C:\Users\Balthasar\Documents\
        Masterarbeit\CTA_PROGRAMME\Auswertung\TS_Ma_', num2str(
        Span), '.png');
628     title(titlename1)
629     view(2)
630     xlabel('Zeit t / \tau')
631     ylabel('\Delta \Theta / \Theta_{HD-Leitrad}')
632     saveas(gcf, savename1)
633     close(gcf)
634 end
635
636     %% TIME SPACE PLOT Machzahl
637
638     clc
639     disp('Finished')
640     %% GRAPHISCHE DARSTELLUNG ENDE
```

### A3.1 Anmerkungen zum Code

Aus Datenschutzgründen sind im oben angeführten Code teilweise Variablen nicht definiert sondern durch .. ersetzt worden.

- Zeile 12 und 13: Die Drahttemperaturen bei der Messung entsprechen jenen von der Kalibrierung. Die Referenztemperatur ist jene, bei der die Kalibrierung stattfand.
- Zeilen 17 - 33: Die nachfolgenden Daten müssen für eine Auswertung bekannt sein.
- Zeilen 39 - 57: Die Messdaten müssen als Komma das Punktzeichen besitzen. Die endRow stellt die Zeile, bis zu der die Daten eingelesen bzw. dann auch ausgewertet werde, dar. Gerade zu Testzwecken empfiehlt sich eine Zahl um die 50.000 Werte.
- Zeilen 109 - 125: Da die Messpunkte hintereinander abgefahren werden, ist eine Sortierung notwendig. Die Zeilen 295 bis 300 gehören hier ebenfalls dazu. Diese Sortierung dient lediglich dazu, dass die richtigen Werte von statischer Temperatur, statischem Druck und Verdrehwinkel für die Berechnung herangezogen werden.
- Zeile 132: Aus vorangegangenen Fünflochsondenmessungen sind die Strömungswinkel bereits bekannt. Um bessere Ergebnisse zu erhalten wird die Hitzdrahtsonde in die Hauptströmungsrichtung gedreht. Diese Verdrehung muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.
- Zeilen 155 - 160: Hier werden die zuvor temperaturkorrigierten Spannungen in Geschwindigkeiten umgerechnet. Dies erfolgt mit den Daten aus der Kalibrierung und erfolgt wiederum vom Sensorkoordinatensystem ins Sondenkoordinatensystem.
- Zeilen 199 - 228: Für die phasengemittelte Auswertung muss das Triggersignal korrigiert werden. Um möglichst exakte Ergebnisse zu erhalten, ist eine Interpolation des Anfangswertes notwendig.
- Zeilen 351 - 396: Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgt mit der Funktion fun\_arcplot. Zuvor müssen jedoch einige Übergabeparameter angegeben bzw. berechnet werden.

#### **A4 Abschließende Bemerkungen des Autors**

Das Zuverlässige Testen eines Codes von Programmen ist leider kein einfaches Unterfangen. Obwohl die Auswerterroutinen ansehnliche und im Vergleich zu anderen Messverfahren und deren Auswertelgorithmen in etwa gleiche Ergebnisse liefern, sind Fehler im Code nicht auszuschließen. Dies bitte immer im Gedächtnis behalten.

Für Personen, die sich neu in das Themenfeld der Hitzdrahtanemometrie einarbeiten bzw. speziell für jene Personen, die auf der Masterarbeit von Wachter [Wachter, 2018] und dieser hier vorliegenden Arbeit, ihre eigene Thesis schreiben ist aus Sicht des Autors folgende Reihenfolge bei der Einarbeitung sinnvoll und zielführend:

1. Kapitel Nummer 3 - Geschwindigkeitsmessung in [Nitsche und Brunn, 2006]
2. Durchlesen von [Jørgensen, 2005]
3. Durchführen von ersten Kalibrierungen bzw. Messungen, wie im Anhang von [Wachter, 2018] angeführt
4. Kapitel 3.3 - Geschwindigkeitsmessung in [Indiger, 2016]

Die gesamte verwendete Literatur ist digital (wenn verfügbar) in einem Ordner auf dem CTA-Rechner in der Versuchshalle abgelegt.