

Adaption von Hard- und Software eines Dreikomponenten-Hitzdrahtanemometers zum Gebrauch in Thermischen Turbomaschinen

Masterarbeit
von
Philipp Wachter

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik

Betreuer: Dipl.-Ing. Patrick Zeno Sterzinger

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

Graz, im April 2018

In Kooperation mit:

**Der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft, GE
Aviation US und GE Aviation India**



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Bei der Geschwindigkeitsmessung mittels Hitzdraht, -oder Heißfilmanemometer handelt es sich um eine arrivierte Technik, welche bereits seit mehreren Jahren im Bereich der Forschung und Entwicklung eingesetzt wird. Errungenschaften der letzten Jahre im Bereich der Robustheit durch die Entwicklung von so genannten Fiber-Film-Sonden erhöhten die Lebensdauer der Sensoren deutlich. Durch diese Fortschritte wurden Messungen in thermischen Turbomaschinen stromab des Laufrades ermöglicht.

Mit der Messung in der Abströmung des Rotors treten nicht nur Schwierigkeiten im Bereich der Lebensdauer auf, sondern auch Herausforderungen im Bereich der Kalibrierung und Auswertung hinsichtlich Temperatur- und Druckabhängigkeit der Messung.

Zur Lösung der Problemstellung wurde die Hardware, welche zur Kalibrierung und Messung in einer solchen Umgebung notwendig ist, konstruiert bzw. adaptiert. Die Gedankenzüge, welche zur finalen Ausführung der Komponenten führte sowie die Beschreibung der Komponenten wurden in der Arbeit festgehalten. Zusätzlich wurden auch die notwendigen Algorithmen zur Programmierung der Software ausgearbeitet.

Diese Programme bieten nicht nur die Möglichkeit zur Lösung des Problems der Druck- und Temperaturabhängigkeit der Messung, sondern ermöglichen auch die einfache Kommunikation mit der Software, welche zur Ansteuerung der Sondenbewegung eingesetzt wird. Dadurch kann im Messprozess ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden, was eine Herabsetzung der Messdauer zur Folge hat.

Schlussendlich wurde die entsprechende Hard- und Software in einer Initialmessung verifiziert, in welcher ähnliche Temperaturen wie jene in der Versuchsturbine vorherrschen sowie dieselben Sondentraversiergeräte angesteuert werden mussten. Zur Verifizierung wurde zusätzlich zur Messung mit der neu erstellten Software eine Messung mit der mitgelieferten Standardsoftware von DANTEC durchgeführt. Anschließend wurden die Mittelwerte der Ergebnisse miteinander verglichen. Zuletzt wurde eine zeitaufgelöste Analyse der Messdaten mit Hilfe eines Keyphasorsignals als Referenz pro Wellenumdrehung durchgeführt und auf Plausibilität überprüft.

Abstract

The measurement of velocities with hot wire anemometers is a successful and established technique in the field of research and development. It has already practiced for many years. The development of fiber film sensors lead to huge progress concerning the robustness of such sensors which caused the possibility of measurements downstream the rotor of thermal turbomachinery.

Additionally to the difficulty of stability, measurements close to the rotor of a turbine stage also cause problems concerning the influence of high pressure and high temperature on the measurement result.

For dealing with the effect which was mentioned above it was necessary to design and adapt the hardware for the measurement and the calibration process. The thoughts which lead to the final execution as well as the description of the components are part of this thesis. Moreover it was essential to work out the algorithms for the programs and implement them into the new software.

Beside the advantage of the correct dealing with high pressure and high temperature the self-programmed software is also able to communicate with the traversing system, which is available at the institute. The traversing system is used for the precise movement of the probe in the flow path. The communication with the traversing system enables a higher degree of automation of the measurement process which will lead to a shorter measurement duration.

Finally the designed hardware and the new software were tested in an initialization measurement, which is similar to the measurement in a test turbine in terms of traversing system and the temperature level. Additionally the software samples a reference signal per shaft revolution provided by a keyphasor.

For the verification of the initialization measurement, the measurement was also done with the standard software provided by Dantec Dynamics. Hereafter the mean values of the measurements were compared. Finally, the reference signal was used to carry out a time-resolved analysis of the measurement which was further checked for plausibility.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Allen bedanken, die mich während der Anfertigung der vorliegenden Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zu allererst gebührt mein Dank Herrn Prof. Göttlich, der meine Masterarbeit mitbetreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung der Arbeit möchte ich mich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts für Thermische Turbomaschinen, insbesondere bei meinem Betreuer Patrick Zeno Sterzinger bedanken, welche mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Eltern Karoline und Christoph Wachter bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Abschließend möchte ich noch erwähnen, dass diese Masterarbeit im Rahmen des Beyond-Europe-Projektes „**Turbulence and Optical Measurements for Duct Surface Optimization in Turbofans – Turandot**“ (Projektnummer 707779/855730) stattfand. Für die finanzielle Unterstützung möchte ich mich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG recht herzlich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Grundsätzliches Messprinzip	4
2.2	Vorteile von Hitzdraht- und Heißfilmanemometern	4
2.3	Messanforderungen und Konfiguration der Hardware	5
2.3.1	Digitale Messanforderungen	5
2.3.2	Datenerfassung	6
2.3.3	Der Widerstand des Sensorelements	7
2.3.4	Overheat Ratio.....	8
2.3.5	Modi zur Messdurchführung von HDA.....	9
2.4	Kalibrierung.....	11
2.4.1	Grundsätzliche Mechanismen der Hitzdrahtanemometrie	12
2.4.2	Einfluss der Temperatur	17
2.4.3	Einfluss des Drucks	19
2.4.4	Gleichungen zur Kalibrierung	20
2.5	Auswertung der Spannungsdaten des 3W-Sensors 55R97	23
3	Hardware zur Kalibrierung und Messung	26
3.1	StreamLine Pro System	26
3.1.1	CTA Module.....	27
3.1.2	3W-Sensor 55R97	27
3.1.3	A-D-Wandler PCI-6133.....	28
3.1.4	Automatisches Kalibriergerät.....	28
3.1.5	Pitch/Yaw Manipulator	29
3.1.6	Filtereinheit	30
3.2	Drucklufferhitzer	30
3.2.1	Ausgangspunkt.....	30
3.2.2	Berechnung der benötigten Leistung	31
3.2.3	Anschlüsse an den Drucklufferhitzer	32
3.2.4	Schaltung der Widerstände	33
3.2.5	Regelung des Drucklufferhitzers.....	34
3.3	Sondenschaft	35
3.4	Sondenhalter.....	36

4	Software zur Kalibrierung, Messung und Auswertung	38
4.1	Programm zur Kalibrierung	38
4.2	Programm zur Auswertung der Kalibrierdaten	40
4.2.1	Einlesen der Kalibrierdaten und Eingabe relevanter Werte in die Benutzeroberfläche	41
4.2.2	Trennung der Werte von Geschwindigkeits- und Winkelkalibrierung	41
4.2.3	Geschwindigkeitskalibrierung	41
4.2.4	Winkelkalibrierung	45
4.3	Programm zur Messung	48
4.4	Programm zur Berechnung der Geschwindigkeit aus den Spannungsdaten	51
4.4.1	Import der Daten	51
4.4.2	Berechnung der Kalibriergeschwindigkeit	51
4.4.3	Berechnung der effektiven Geschwindigkeit	52
4.4.4	Berechnung der Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem	52
4.4.5	Berechnung der Geschwindigkeit im Sondenkoordinatensystem	52
4.4.6	Berechnung der Geschwindigkeit im Laborkoordinatensystem	52
4.4.7	Export der Geschwindigkeitsdaten	53
4.5	Programm zur instationären Auswertung	53
4.5.1	Input der Geschwindigkeitsdaten	53
4.5.2	Berechnen des Zeitpunkts des Triggerdurchgangs	53
4.5.3	Unterteilung einer Umdrehung in n Samples	54
4.5.4	Resampling der Geschwindigkeiten	55
4.5.5	Schaffung gleicher zeitlicher Bezugsgrundlage	55
4.5.6	Berechnung der statistischen Größen	55
4.5.7	Ausgabe der Ergebnisse in einem Text-File	56
5	Kalibrierung	57
5.1	Aufbau des Kalibriersystems	57
5.2	Inbetriebnahme des Kalibriersystems	58
5.2.1	Anschluss der Druckluft und der Versorgungsspannung	58
5.2.2	Inbetriebnahme der Sonde	59
5.3	Durchführung der Kalibrierung	61
5.3.1	Hardwarekonfiguration	62
5.3.2	Geschwindigkeitskalibrierung	62

5.3.3	Winkelkalibrierung	66
5.3.4	Struktur der Kalibrierdaten	67
5.4	Auswertung der Kalibrierung	68
5.5	Kalibrierung des Luftherhitzers	69
6	Messung	70
6.1	Aufbau der Messung	70
6.2	Durchführung der Messung	72
6.3	Umrechnung der Spannungen in Geschwindigkeiten	72
6.4	Verifizierung der Messergebnisse	73
6.5	Auswertung der Messergebnisse	75
6.5.1	Phasengemittelte Geschwindigkeitsverteilung über eine Rotorumdrehung	76
6.5.2	Betrag der phasengemittelten Geschwindigkeit über eine Rotorumdrehung	78
6.5.3	Phasengemittelter Turbulenzgrad über eine Rotorumdrehung	79
7	Zusammenfassung und Ausblick	81
	Literaturverzeichnis	82
	Abbildungsverzeichnis	84
	Tabellenverzeichnis	89
	Anhang	90

Abkürzungsverzeichnis

A_w	Querschnittsfläche des Drahtelements
A	Querschnittsfläche
a	Schallgeschwindigkeit
α_{20}	Spezifischer Widerstand bei 20°C
β	Wärmeausdehnungskoeffizient
Ca.	Circa
CT	Constant Temperature
CC	Constant Current
c_p	Spezifische Wärmekapazität
c_w	Spezifische Wärmekapazität des Drahtelements
CT-mode	Constant-Temperature mode
CC-Mode	Constant-Current Mode
c	Fluidgeschwindigkeit
d	Durchmesser des zylinderförmigen Drahtelements
$d\dot{Q}_e$	Durch elektrische Energie erzeugte Wärmeleistung
$d\dot{Q}_{fc}$	Durch Konvektion übertragener Wärmestrom
$d\dot{Q}_c$	Durch Wärmeleitung übertragener Wärmestrom
$d\dot{Q}_r$	Durch Strahlung übertragene Wärmestrom
$d\dot{Q}_s$	Gespeicherte Wärmeleistung
E	Spannung
Etc.	Et cetera
ε	Emissionsgrad
g	Gravitationskonstante
Gr	Grashof-Zahl
HDA	Hitzdrahtanemometer
HFA	Heißfilmanemometer
h	Wärmeübergangszahl
I	Stromstärke
k_w	Wärmeleitfähigkeit des Drahtelements
k	Wärmeleitfähigkeit
kHz	Kilohertz
LDA	Laser Doppler Anemometer
l	Länge des Drahtelements
Ma	Mach-Zahl
μ	Dynamische Viskosität

MSD	Massenstromdichte
\dot{m}	Massenstrom
N	Anzahl der Samples
Nu	Nusselt-Zahl
p	Statische Druck
Pr	Prandtl-Zahl
R_1	Widerstand Nummer 1
R_2	Widerstand Nummer 2
R_{ges}	Gesamtwiderstand
R_0	Widerstand bei Referenztemperatur T_0
R_{20}	Widerstand bei Referenztemperatur T_{20}
R_s, R_c	Widerstände der Kabel bzw. Verbindungsleitungen im CTA
ρ	Dichte des Fluides
R_p	Leads Widerstand
$R_{a,m}$	Widerstand bei Fluidtemperatur unter Berücksichtigung von R_L
$R_{w,m}$	Widerstand des beheizten Drahtes unter Berücksichtigung von R_L
r	Radius
$R_{a,m}$	Widerstand bei Fluidtemperatur unter Berücksichtigung von R_L
$R_{w,m}$	Widerstand des stromdurchflossenen Drahtes unter Berücksichtigung von R_L .
R_{Luft}	Gaskonstante der Luft
R_L	Summe der Widerstände R_s, R_c und R_p
R	Elektrische Widerstand
R_a	Widerstand bei Fluidtemperatur
R_w	Widerstand bei der Temperatur des Drahtes T_w
ρ_w	Dichte des Drahtelements
Re	Reynolds-Zahl
SR	Sampling rate
σ	Stefan-Boltzmann Konstante
T	Zeit
T_{Ref}	Referenztemperatur der Hardwarekonfiguration
t_a	Temperatur am Austritt
t_e	Temperatur am Eintritt
Tu	Turbulenzgrad
$T_{w,m}$	Mittlere Drahttemperatur des beheizten Drahtes
$T_{w,\infty}$	Temperatur eines unendlich langen Drahtes
T_f	Filmtemperatur

$T_{w,m}$	Mittlere Temperatur des beheizten Drahts
T_0	Referenztemperatur (0°C)
T_{20}	Referenztemperatur (20°C)
T_s	Temperatur der Umgebung
T_w	Temperatur des erhitzten Drahtelements
T_a	Temperatur der Strömung
$\overline{u'^2}$	Zeitlich gemittelter Schwankungsanteil der Geschwindigkeit x-Richtung
U_{const}	Konstante Geschwindigkeit des Kalibrierkanals
U_{mean}	Mittelwert des Betrages der drei Geschwindigkeitskomponenten U, V und W
v	Spezifisches Volumen
$\overline{v'^2}$	Zeitlich gemittelter Schwankungsanteil der Geschwindigkeit in y-Richtung
3W-Sonde	Triple-Wire-Sonde
$\overline{w'^2}$	Zeitlich gemittelter Schwankungsanteil der Geschwindigkeit in z-Richtung
W_t	Technische Leistung
χ_w	Spezifische elektrische Widerstand

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Der in der heutigen Zeit zu beobachtende starke Anstieg an Energie und die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen macht die effiziente Umwandlung von Primär- zu Nutzenergie zu einer unerlässlichen Notwendigkeit. Sowohl bei der Umwandlung erneuerbarer als auch fossiler Energiequellen nehmen thermische Turbomaschinen eine zentrale Rolle ein. Zusätzlich sind thermische Turbomaschinen das Hauptantriebsmittel in der zivilen sowie in der militärischen Luftfahrt.

Durch die hohe Verbreitung solcher Maschinen und dem steigendem Wachstum des Flugverkehrs bewirken bereits geringe Steigerungen im Wirkungsgrad große energetische Einsparungen. Um solche Steigerungen realisieren zu können, ist es oft notwendig, das Strömungsverhalten solcher Maschinen genau zu kennen und zu optimieren. Eine weit verbreitete Möglichkeit zur Messung von zeitaufgelösten Strömungsgeschwindigkeiten bietet die Heißfilm- und Hitzdrahtanemometrie.

Strömungen von Fluiden lassen sich generell in laminar, transitionell und turbulent einteilen. Eine laminare Strömung zeichnet sich durch eine zeitlich konstante Geschwindigkeit und Richtung aus. Übersteigen jedoch die Geschwindigkeiten der Strömung einen bestimmten Wert oder umströmt das Fluid eine bestimmte Kontur, kann es zu einem Umschlagen der Strömung von laminar auf turbulent kommen. Charakteristisch für eine turbulente Strömung ist die Überlagerung der Hauptströmungsrichtung mit zufälligen Schwankungsanteilen der Geschwindigkeit in alle Raumrichtungen. Die dadurch entstehenden Wirbel und die hohen Strömungsgeschwindigkeiten verursachen Reibung im Fluid und an den Kontaktflächen der umströmten Körper. Diese Reibung bedeutet einen Verlust der Strömungsenergie, welchen es zu vermeiden gilt.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Güte einer Strömung und somit der Turbulenz ist die Ermittlung des Turbulenzgrades. Dieser setzt die zeitlich gemittelten Schwankungsanteile der drei Geschwindigkeitskomponenten mit dem Mittelwert des Betrags der Strömungsgeschwindigkeit ins Verhältnis. (Kurten, 2011)

$$T_U = \frac{1}{U_{mean}} * \sqrt{\frac{1}{3} * (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} \quad (1.1)$$

Bei der Optimierung von Turbomaschinen ist ein grundlegendes Verständnis der Generierung und Entwicklung von Turbulenz von entscheidender Bedeutung.

Des Weiteren bildet der Turbulenzgrad die Grundlage für die Berechnung von turbulenten Strömungen mittels CFD-Rechnung. Eines der am weitesten verbreiteten Turbulenzmodelle ist das κ - ϵ -Modell. Bei diesem Modell ist eine genaue Kenntnis über die Turbulenz notwendig, um die turbulente kinetische Energie des Modells zu berechnen.

Die Messung mit Hitzdrahtanemometern in thermischen Turbomaschinen ist aufgrund der hohen Drücke und Temperaturen sowie der hohen Strömungsgeschwindigkeiten, welche mit starker Turbulenz einhergehen, sehr herausfordernd. Errungenschaften im Bereich der Robustheit der Sonden, vor allem durch die Entwicklung von Fiber-Film-Sonden, haben einen Einsatz in thermischen Turbomaschinen stromab des Laufrades ermöglicht.

Der Messaufbau der Turbine, welcher am Institut für Messungen verwendet wird, ist in Abbildung 1 dargestellt. Die herausforderndste Messebene, was die Geschwindigkeiten und die damit einhergehende Turbulenz betrifft, ist die Ebene B. In dieser Messebene herrschen Geschwindigkeiten von 0,25 bis 0,55 Mach. Darüber hinaus treten dort Totaldrücke von 1,15 bis 1,25 bar auf, bei einer Temperatur von 330 bis 340 Kelvin.

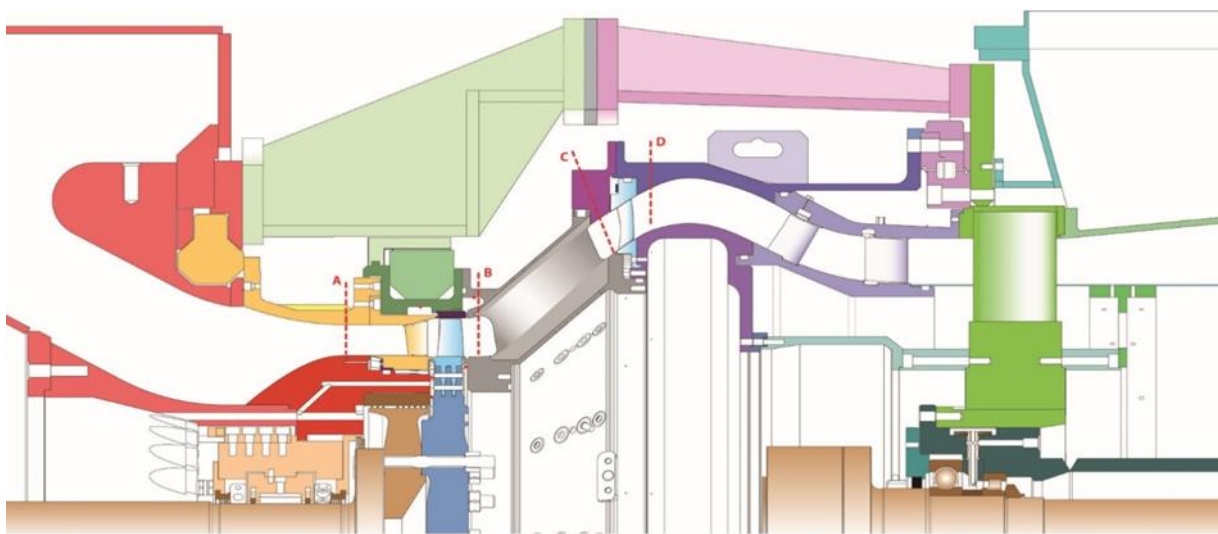


Abbildung 1: Messaufbau Turbine

Die der Arbeit zugrundeliegende Aufgabenstellung war, ein am Institut vorhandenes bzw. aufgerüstetes Hitzdrahtanemometer in Betrieb zu nehmen und es für die Messung in der Turbine vorzubereiten. Dazu wurde zuerst eine Literaturrecherche durchgeführt, aus welcher einige Defizite hervorgingen, welche der bereits vorhandene Kalibrierprozess bzw. die von Dantec Dynamics mitgelieferte Software nicht abdecken konnten.

Erstens hat der Druck einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis eines Hitzdrahtanemometers. Dies hat zur Folge, dass der Druck bei der Kalibrierung jenem bei der Messung so ähnlich wie möglich sein sollte. Da dies jedoch aus technischen Gründen nicht möglich ist, wurde als Lösung die Kalibrierung des Messgeräts mittels Massenstromdichte und nicht mittels Geschwindigkeit gewählt.

Neben dem Druck hat auch die Fluidtemperatur einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis. Die Lösung dieses Problems wurde zum einen durch die Schaffung neuer Hardware in Form eines Druckluftherzlers gelöst, zum anderen durch die analytische Korrektur des Fehlers, welcher durch die Differenz der Temperatur zwischen Messung und Kalibrierung entsteht.

Zuletzt war es mit der von Dantec mitgelieferten Software nicht möglich, die am Institut vorhandene Traversierung, welche zur Bewegung der Sonde im Strömungskanal verwendet wird, anzusteuern. Die direkte Kommunikation zwischen Messsoftware und Traversierung hat den Vorteil, dass ein höherer Automatisierungsgrad des Messprozesses erreicht werden kann, was die Dauer der Messung deutlich verkürzt.

Die genannten Defizite führten dazu, dass Teile der Hardware neu konstruiert bzw. adaptiert werden mussten. Zusätzlich war es notwendig, den der Kalibrierung und Auswertung der Messung zugrundeliegenden Formalismus auszuarbeiten und in Programmen umzusetzen. Neben den Programmen, welche die Kalibrierung und Messung auswerten, mussten zusätzlich Programme geschrieben werden, welche mit dem Constant-Temperature-Anemometer kommunizieren und die notwendigen Daten bei der Messung und der Kalibrierung einstellen und aufzeichnen.

Schlussendlich wurde mit der neu geschaffenen Hard- und Software eine Initialmessung durchgeführt. Bei der Initialmessung herrscht, wie auch bei der Messung in der Turbine, eine erhöhte Temperatur. Zusätzlich wurde ein Referenzsignal für die Detektion der Umdrehung der Welle aufgezeichnet.

Zur Verifizierung wurden die gemessenen Mittelwerte der Geschwindigkeiten der selbst geschriebenen Programme mit jenen der Dantec Software verglichen. Darauf folgend wurde mit dem Referenzsignal eine zeitaufgelöste Auswertung durchgeführt und auf Plausibilität überprüft.

2 Theoretische Grundlagen

Die thermische Anemometrie beruht hauptsächlich auf den Prinzipien des Wärmeübergangs, unabhängig davon, ob es sich um ein Hitzdrahtanemometer (HDA) oder ein Heißfilmanemometer (HFA) handelt. Um Messungen mit einem solchen Gerät durchführen zu können, ist ein grundlegendes Wissen über diese Mechanismen notwendig. Das folgende Kapitel soll zum einen einen Überblick über die theoretischen Grundlagen bieten und zum anderen jenes Wissen vermitteln, welches für die Messung mit einem thermischen Anemometer benötigt wird. (Bruun, 1995)

2.1 Grundsätzliches Messprinzip

Das grundsätzliche Messprinzip eines Hitzdrahtanemometers beruht auf der thermischen Anemometrie. Dabei wird ein Draht in eine Strömung gehalten und mit Strom beheizt. Der vorbeigeführte Luftstrom kühlt den Draht ab, so, dass bei konstanter Heizleistung die Temperatur des Fühlers oder bei konstanter Temperatur die Heizleistung ein Maß für die Geschwindigkeit ist, vorausgesetzt alle anderen Stoffwerte des Fluides können als konstant angenommen werden. Erweiterungen des grundsätzlichen Messprinzips von einem Draht auf mehrere Drähte ermöglichen die Messung von mehreren Geschwindigkeitskomponenten der Raumrichtungen gleichzeitig. (Simens, 2018)

2.2 Vorteile von Hitzdraht- und Heißfilmanemometern

Hitzdrahtanemometer (HDA) und Heißfilmanemometer (HFA) sind das wesentliche Hilfsmittel für jegliche Forschung im Bereich von turbulenten Strömungen von Gasen und Fluiden. Für die Messung in moderat-turbulenten Strömungen ergeben sich für ein solches Messgerät folgende Vorteile: (Bruun, 1995)

1. Kosten: HDA sind im Vergleich zu anderen Messgeräten, welche in diesem Gebiet eingesetzt werden, relativ günstig. Laser Doppler Anemometer (LDA), welche auch zu Geschwindigkeitsmessung in Strömungen verwendet werden, sind um ein vielfaches teurer.
2. Frequenzbereich: Ein standardmäßig ausgeführtes HDA arbeitet in einem Frequenzbereich von 20-50 Kilohertz (kHz). Mit teureren Ausführungen ist es möglich, in einem Frequenzbereich von bis zu mehreren hundert kHz zu messen. Der Messbereich von LDA ist meistens mit 30 kHz begrenzt.
3. Größe: Ein typischer Sensor eines HDA ist ca. 5 Millimeter lang und hat 1,25 Mikrometer im Durchmesser. Im Vergleich dazu benötigt ein LDA ein Messvolumen von 50 Mikrometer mal 0,25 Millimetern.
4. Geschwindigkeitsmessung: HDA ermöglichen eine Messung der Geschwindigkeit an einem festgelegten Punkt. Es gibt verschiedene Sensorausführungen, welche es ermöglichen, alle Geschwindigkeitskomponenten zu ermitteln. Dadurch kann der Geschwindigkeitsvektor in einem festgelegten Punkt bestimmt werden. Des Weiteren sind Geschwindigkeitsmessungen in einem großen Geschwindigkeitsbereich möglich.

5. Temperaturmessung: Gleichzeitige Messungen der fluktuierenden Geschwindigkeit und des Temperaturfelds sind möglich. Dazu wird ein Sensor zur Messung mehrerer Geschwindigkeitskomponenten verwendet, bei der ein Draht im „cold-wire-mode“ arbeitet.
6. Zwei-Phasen-Strömungen: HDA können für Messungen in Störungen verwendet werden, in denen mehr als eine Phase gleichzeitig vorherrscht.
7. Genauigkeit: HDA und LDA können beide Messungen mit einer Messgenauigkeit von 0,1-0,2% durchführen. In den meisten Anwendungen genügt jedoch eine Genauigkeit von 1%.
8. Signalanalyse: Der Output eines HDA ist ein Analogsignal. Dadurch können alle gewünschten Signalanalysen einfach durchgeführt werden.
9. Spezielle Sensoren: Mit speziellen Sensoren und den dazugehörigen Analysemethoden können turbulente Größen wie Periodizität, Dissipationsrate, Turbulenzgrad, Wirbelstärke etc. ermittelt werden.

2.3 Messanforderungen und Konfiguration der Hardware

In diesem Kapitel soll genauer auf die Messanforderungen und die damit verbundene Hardware eingegangen werden welche für eine Messung benötigt wird. Zum einen soll besprochen werden, welche Hardwarekomponenten grundsätzlich notwendig sind, um eine Messung mit einem Hitzdrahtanemometer durchführen zu können, zum anderen sollen die Einstellungen besprochen werden, welche bei einem solchen System getätigt werden müssen. Zusätzlich werden die Gleichungen erläutert und hergeleitet, mit denen wichtige Parameter berechnet werden können.

2.3.1 Digitale Messanforderungen

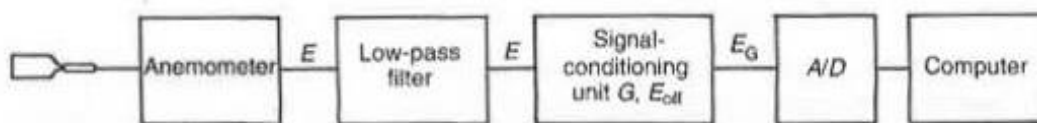


Abbildung 2: Single Channel digital Measurement System (Bruun, 1995)

In Abbildung 2 ist eine typische Messanordnung für ein HDA dargestellt. Es wird empfohlen, dass das Signal zuerst durch einen Low-pass Filter geführt wird. Dieser wird einerseits für die Spektralanalyse und andererseits zum Filtern von hochfrequenten Signalen von elektrischen Geräten verwendet. Danach wird das Signal durch eine „Signal Conditioning Unit“ geleitet. Der Zweck dieser Einheit ist, das Signal derart umzuwandeln, dass es vom darauffolgenden Analog-Digital-Wandler (A-D-Wandler) verarbeitet werden kann. Im diesem A-D-Wandler wird das Signal digitalisiert. Üblicherweise werden drei Kennzahlen zur Beschreibung eines solchen Geräts verwendet: „Voltage Range“, „Resolution“ und „Sampling rate“.

Als „Voltage Range“ wird der Spannungsumfang bezeichnet, welcher sich für gewöhnlich von -5 bis +5 Volt oder von 0-10 Volt erstreckt.

Die zweite Kennziffer wird „Resolution“ genannt. Das Eingangssignal wird in 2^n verschiedene Ausgangssignale unterteilt. Das heißt ein 8 bit A-D-Wandler unterteilt das Signal in $2^8=256$ verschiedene Werte, ein 12 bit A-D-Wandler in 4096 Wert. Daraus wird klar ersichtlich, dass der Fehler bei 2^{12} Ausgangssignalen deutlich kleiner ist als jener, der bei 2^8 Ausgangssignalen auftritt.

Die dritte Kennzahl, die „Sampling Rate“, ist ein Maß für die maximale Abtastrate. Diese Kennzahl ist für die meisten Messungen von großer Bedeutung, da in Gasströmungen eine Abtastrate von 100-250 kHz benötigt wird. Wird mit Sensoren gemessen, welche mehrerer Drähte besitzen, müssen die Signale gleichzeitig abgetastet werden. Dies hat zur Folge, dass der A-D-Wandler eine „Sample and Hold“-Funktion besitzen muss. Unter dieser Funktion versteht man, dass bei einem Kanal so lange angehalten wird, bis die restlichen 2 Kanäle abgetastet worden sind. Heutige Geräte erreichen Abtastraten von bis zu 250 kHz für jeden Kanal. (Bruun, 1995)

Um ein Experiment durchführen zu können, muss neben der Sampling Rate noch die Anzahl der Samples oder die Zeit bekannt sein.

Diese drei Parameter sind mit Gleichung 2.1 miteinander verknüpft.

$$N=SR*T \quad (2.1)$$

Aus Gleichung 2.1 ist ersichtlich, dass nur zwei der drei Parameter frei gewählt werden können, der dritte ergibt sich durch Einsetzen in die Gleichung. Die Wahl dieser Parameter ist von mehreren Faktoren abhängig: (Bruun, 1995)

- Messanforderungen: Darunter versteht man, welche Größen gemessen werden sollen
- Turbulenzgrad der Strömung
- Die verfügbare Bearbeitungszeit.

Unter Berücksichtigung der oben angeführten Punkte werden zwei Parameter gewählt und der dritte mit Gleichung 2.1 ermittelt. (Bruun, 1995)

2.3.2 Datenerfassung

Zur Datenerfassung müssen einerseits die in Kapitel 2.3.1 erläuterten Kennzahlen angegeben werden, zum anderen müssen noch drei weitere Parameter festgelegt werden. Diese sind die „Cut of Frequency“, der „Offset“ und „Gain“ der „Signal Conditioning Unit“. (Bruun, 1995)

Als „Cut of Frequency“ wird jene Frequenz bezeichnet, bis zu der ein low-pass Filter Signale passieren lässt. Das heißt zum Beispiel bei einer „Cut of Frequency“ von 10kHz können nur Signale passieren, welche sich zwischen 0 und 10 kHz befinden. (Electronic tutorials, 2017) „Offset“ und „Gain“ werden eingestellt, um die jeweils dazugehörigen Fehler des A-D-Wandlers auszugleichen. (Küng, 2017)

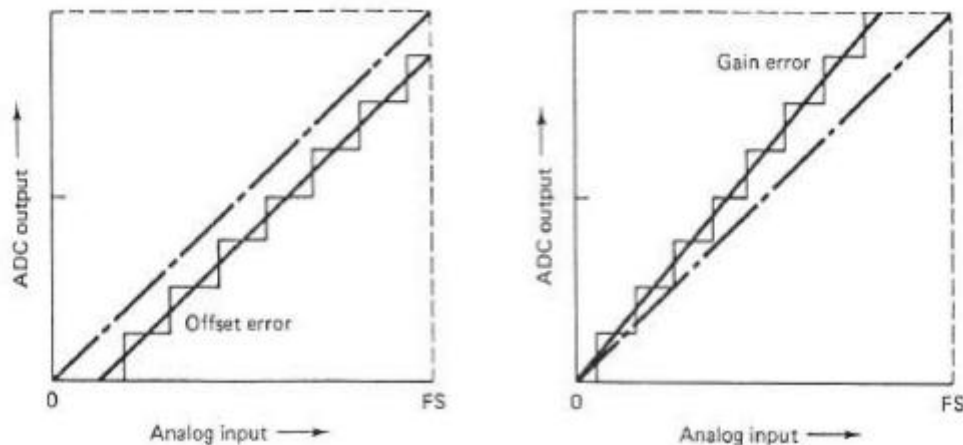


Abbildung 3: Offset- und Gain Fehler (Küng, 2017)

Abbildung 3 zeigt den Offset und den Gain Fehler. Die Größen, um diesen Fehler auszugleichen, werden vom Hersteller bereitgestellt. (Küng, 2017)

2.3.3 Der Widerstand des Sensorelements

Die Berechnung und Festlegung des Widerstands des Sensorelements ist ein zentraler Punkt bei der Konfiguration der Hardware eines Hitzdraht- oder Heißfilmanemometers. Diese Einstellungen haben großen Einfluss auf den Output des Messgeräts und damit auch auf die Kalibrierkurve und das Ergebnis.

Allgemein kann der Widerstand in einem elektrischen Leiter wie folgt angegeben werden, wobei l die Länge des Leiters ist, χ der spezifische elektrische Widerstand und A_w die Querschnittsfläche des Drahtelements. (Bruun, 1995)

$$R = \frac{\chi * l}{A_w} \quad (2.2)$$

Üblicherweise werden Werte für den spezifischen Widerstand von HDA bei 20°C vom Hersteller bereitgestellt.

Die Temperatur des Drahtelements variiert jedoch über dessen Länge. Unter der Annahme, dass $T_w(x)$ bekannt ist, kann die mittlere Sensortemperatur nach Gleichung 2.3 berechnet werden. (Bruun, 1995)

$$T_{w,m} = \frac{1}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} T_w(x) * dx \quad (2.3)$$

Diese Gleichung kann auch auf den Widerstand des Sensorelements angewendet werden.

$$R_w = \frac{1}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\chi * l}{A_w} dx = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\chi}{A_w} dx \quad (2.4)$$

Die Temperaturabhängigkeit von Widerständen kann in folgender Form angegeben werden: (Bruun, 1995)

$$\chi_w = \chi_0 * [1 + \alpha_0 * (T_w - T_0) + \beta_0 * (T_w - T_0)^2] \quad (2.5)$$

In Gleichung 2.5 ist T_0 die Referenztemperatur für die Koeffizienten α_0 , β_0 und χ_0 . Für sehr genaue Messungen wäre es notwendig, den Term zweiter Ordnung zu berücksichtigen. Bei der Messung mit HDA ist es jedoch üblich, aufgrund der genügend hohen Genauigkeit, den Term höherer Ordnung zu vernachlässigen. Wird diese vereinfachte Gleichung in die Gleichung 2.6 eingesetzt, ergibt sich folgendes Integral: (Bruun, 1995)

$$R_w = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\chi_0 * [1 + \alpha_0 * (T_w - T_0)]}{A_w} dx \quad (2.6)$$

Durch die Integration der Gleichung 2.6 und der Annahme, dass es sich bei der Temperatur T_w um die mittlere Temperatur des Drahtes $T_{w,m}$ handelt, ergibt sich für R_w folgende Gleichung: (Bruun, 1995)

$$R_w = R_0 * [1 + \alpha_0 * (T_{w,m} - T_0)] \quad (2.7)$$

Gleichung 2.7 stellt einen Zusammenhang zwischen dem Widerstand R_w und der mittleren Temperatur $T_{w,m}$ her. Es ist üblich, dass bei Anwendungen mit dem HDA, eine Referenztemperatur von 20°C gewählt wird. In diesem Fall muss die Gleichung 2.7 leicht abgeändert werden. (Bruun, 1995)

$$R_w = R_{20} * [1 + \alpha_{20} * (T_{w,m} - T_{20})] \quad (2.8)$$

Wie in Gleichung 2.8 ersichtlich, hat sich dadurch auch α zu α_{20} geändert. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen wird in Gleichung 2.9 aufgezeigt. (Bruun, 1995)

$$\alpha_{20} = \frac{R_0}{R_{20}} * \alpha_0 \quad (2.9)$$

2.3.4 Overheat Ratio

Das Overheat Ratio wird als Quotient der beiden Widerstände R_w und R_a definiert. Dabei wird unter R_w der Widerstand bei der Temperatur des stromdurchflossenen Drahtes

verstanden und R_a repräsentiert den Widerstand des Drahtes bei Fluidtemperatur. (Bruun, 1995)

$$\text{Overheat Ratio} = \frac{R_w}{R_a} \quad (2.10)$$

Für Strömungen von Gasen wird üblicherweise ein Overheat Ratio von 1,8 empfohlen. Um die Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen zu reduzieren und die Sensibilität gegenüber Geschwindigkeitsschwankungen zu erhöhen, ist es notwendig, eine möglichst hohe Drahttemperatur einzustellen. Die Temperatur ist jedoch nach oben hin begrenzt. Es ist dringend darauf zu achten, dass die Temperatur des Drahtes 350°C nicht überschreitet, da sonst Oxidation die Sonde zerstört. (Bruun, 1995)

Des Weiteren ist es für praktische Anwendungen sehr wichtig zu berücksichtigen, dass der Sensorwiderstand noch weitere Widerstände beinhaltet. (Bruun, 1995)

- „Leads Resistance“: Darunter versteht man den Widerstand des Sensors, R_p , welcher die Halterung des Drahtes berücksichtigt, jedoch nicht das Drahtelement selbst.
- Die Widerstände R_s und R_c . Darunter versteht man alle Verbindungswiderstände im CTA-System selbst und die Kabel zur Verbindung der Sonde mit dem System.

Diese Widerstände werden ebenfalls wie der Widerstand R_a durch eine Widerstandsmessung der Software ermittelt oder werden vom Hersteller bereitgestellt. Werden nun die oben angeführten zusätzlichen Widerstände berücksichtigt, ergibt sich für R_L folgender Zusammenhang: (Bruun, 1995)

$$R_L = R_p + R_s + R_c \quad (2.11)$$

Bei einem gewähltem Overheat Ratio können die Widerstände bei der Anwendung mit folgenden Zusammenhängen ermittelt werden: (Bruun, 1995)

$$R_{a,m} = R_a + R_L \quad (2.12)$$

$$R_{w,m} = R_w + R_L \quad (2.13)$$

$R_{a,m}$ entspricht dem Widerstand des Drahtes bei Fluidtemperatur unter Berücksichtigung von R_L und $R_{w,m}$ ist der Widerstand des stromdurchflossenen Drahtes unter Berücksichtigung von R_L , also jener Widerstand, der zum Messen an der Brücke eingestellt wird. (Bruun, 1995)

2.3.5 Modi zur Messdurchführung von HDA

Das Herzstück des Hitzdrahtanemometers bildet die Brücke, in der das Drahtelement zur Messung verschalten ist. Zum Betrieb dieser Brücke gibt es zwei Möglichkeiten: (Bruun, 1995)

- Constand Current (CC) Mode: Bei dieser Betriebsweise wird der Strom, welcher durch das Drahtelement fließt, konstant gehalten. Dadurch variiert die Temperatur bei nicht konstanter Strömungsgeschwindigkeit.
- Constant Temperature (CT) Mode: Die Temperatur im Drahtelement wird konstant gehalten, indem der Strom, der dieses Element durchfließt, variiert wird.

2.3.5.1 Funktionsweise eines HDA im Constant Current Mode

Das Herzstück eines HDA, welches im CC-Mode betrieben wird, ist die Wheatstone Brücke. Eine solche Schaltung ist in Abbildung 4 abgebildet.

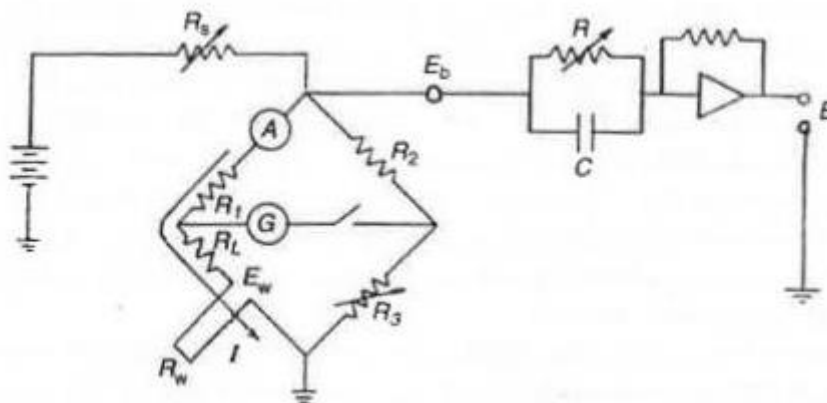


Abbildung 4: Schaltung CC-Mode (Bruun, 1995)

Wie bei allen HDA wird auch hier ein Overheat Ratio gewählt und daraus der Widerstand des stromdurchflossenen Leiters R_w ermittelt. In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass noch weitere Widerstände in der Brückenschaltung vorkommen. Um zuerst den Widerstand R_w einzustellen, wird der Widerstand R_3 variiert. Der Zusammenhang zwischen R_3 und R_w ist durch Gleichung 2.14 gegeben: (Bruun, 1995)

$$\frac{R_w + R_L}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (2.14)$$

Der Widerstand des Sensors und des Kabels werden, wie in 2.3.4 erläutert, bestimmt. Das Galvanometer in der Mitte der Wheatstone Brücke überprüft, ob sich die Brücke im Gleichgewicht befindet. Um dieses Gleichgewicht zu erreichen, wird zusätzlich noch der Widerstand R_s verändert und damit der Strom, der durch die Brücke fließt. Die Brücke wird also durch das Einstellen der Widerstände R_s und R_3 stabil gehalten. (Bruun, 1995)

2.3.5.2 Funktionsweise eines HDA im Constant-Temperature Mode

Der Betrieb eines HDA im CT-Mode bietet sehr große Vorteile bei nicht-isothermen Strömungen, da das Sensorelement mit konstanter Temperatur betrieben wird und je nach Strömungsgeschwindigkeit die Stromstärke derart verändert wird, dass diese konstante Temperatur erhalten bleibt. Dazu wird ein spezieller Regelkreis verwendet, der versucht, die

Änderungen der Temperatur möglichst schnell zu kompensieren. Ein solcher Regelkreis ist in Abbildung 5 dargestellt. (Bruun, 1995)

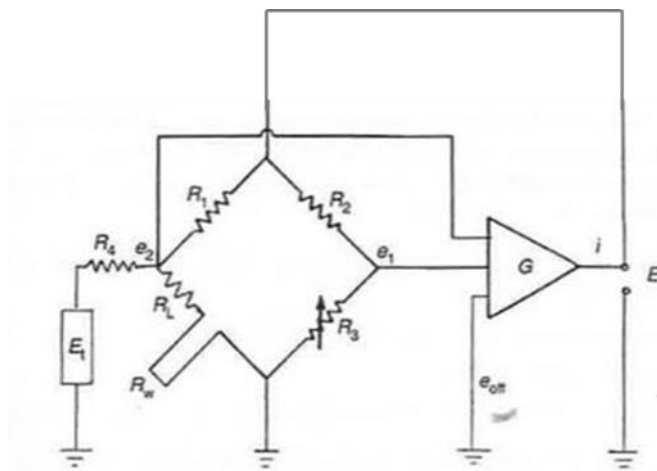


Abbildung 5: CT-Mode (Bruun, 1995)

Ähnlich wie beim Betrieb des HDA im CC-Mode, ist auch beim Betrieb im CT-Mode der Sensor in einer Wheatstone Brücke verschaltet. Wenn sich die Strömungseigenschaften ändern, ändert sich auch die Fehlerspannung $e_2 - e_1$. Diese Fehlerspannung ist ein Maß für die Änderung des Widerstandes in der Brücke. Der Verstärker G detektiert diese Fehlerspannung und ändert den Strom i an seinen Ausgang. Dieser Strom i ist umgekehrt proportional zur Änderung des Widerstands. Somit kann der Widerstand wieder auf seinen Ausgangswert erhöht bzw. erniedrigt werden.

Das Verhältnis der Widerstände R_2/R_1 wird als „Bridge Ratio“ bezeichnet. Üblicherweise werden für dieses Verhältnis Werte zwischen 5 und 20 eingestellt. Für eine optimale Frequenzauflösung oder die Kompensation von sehr langen Kabeln kann jedoch auch ein Verhältnis von 1 verwendet werden. (Bruun, 1995)

2.4 Kalibrierung

Bei der Vorbereitung auf eine Messung spielt neben der Konfiguration der Hardware auch die Kalibrierung eine entscheidende Rolle. In diesem Abschnitt soll zuerst auf die grundsätzlichen Mechanismen der Hitzdrahtanemometrie eingegangen werden. Anhand der Diskussion der grundsätzlichen Mechanismen wird die Notwendigkeit der Kalibrierung aufgezeigt.

Anschließend werden der Einfluss des Drucks und der Einfluss der Temperatur genauer erläutert und die jeweiligen Korrekturmöglichkeiten beschrieben.

Zuletzt wird noch auf die verschiedenen Gleichungen eingegangen, welche bei der Kalibrierung zur Verfügung stehen, um den Wärmeübergang eines Drahtelements mathematisch darstellen zu können.

2.4.1 Grundsätzliche Mechanismen der Hitzdrahtanemometrie

Bei den grundsätzlichen Mechanismen der Hitzdraht- bzw. Heißfilmanemometrie muss man bei der mathematischen Formulierung der Wärmeübertragung zwischen einem Drahtelement mit unendlicher Länge und einem Drahtelement mit endlicher Länge unterscheiden. Bei einem Drahtelement mit endlicher Länge findet neben dem konvektiven Wärmetransport und der Wärmeübertragung durch Strahlung zusätzlich Wärmeleitung an den Halterungen der Drähte statt, welche bei einem Drahtelement mit unendlicher Länge vernachlässigt werden kann. Diese Wärmeleitung an der Halterung verfälscht das Ergebnis der Messung, da dieser Wärmestrom, der zum Abkühlen des Drahtes beiträgt, nicht von der Strömung verursacht wird.

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die mathematische Formulierung dieses Sachverhalts und führen als Lösung des Problems Kalibrierkonstanten ein, welche bei der entsprechenden Kalibrierung ermittelt werden können.

Um den nachfolgenden Kapiteln nicht vorzugreifen, wird in den Kapiteln 2.4.1.1, 2.4.1.2 und 2.4.1.3 eine isobare und isotherme Strömung angenommen.

2.4.1.1 Wärmetransport eines unendlich langen Drahtelements

Schon früh wurde versucht, den Wärmetransport mit dimensionslosen Kennzahlen zu beschreiben. Zu den wichtigsten Kennzahlen zählen die Nusselt-Zahl (Nu), die Reynolds-Zahl (Re), die Prandtl-Zahl (Pr), die Grashof-Zahl (Gr) und die Mach-Zahl (Ma). (Bruun, 1995)

$$Nu = \frac{h * d}{k} \quad (2.15)$$

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{k} \quad (2.16)$$

$$Re = \frac{\rho * U * d}{\mu} \quad (2.17)$$

$$Gr = \frac{\rho^2 * g * d^3 * \beta * (T_w - T_a)}{\mu^2} \quad (2.18)$$

$$Ma = \frac{U}{a} \quad (2.19)$$

Wobei h dem Wärmeübergangskoeffizienten entspricht,

k ist die Wärmeleitfähigkeit des Fluides,

μ ist die dynamische Viskosität,

h ist die Wärmeübergangszahl,

c_p ist die spezifische Wärmekapazität,

ρ ist die Dichte des Fluides,

g ist die Gravitationskonstante,

β ist der Wärmeausdehnungskoeffizient,

T_w ist die Temperatur des erhitzten Drahtelements,

T_a ist die Temperatur der Strömung,
 a ist die Schallgeschwindigkeit,
 U ist die Strömungsgeschwindigkeit,
 d ist der Durchmesser des zylinderförmigen Drahtelements.

King, der bereits 1914 theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Thema konvektive Wärmeübertragung gemacht hat, beschrieb den Wärmeübergang wie folgt: (Bruun, 1995)

$$Nu = A + B * Re^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

Die Konstanten A und B sind Kalibrierkonstanten, welche von Fluid zu Fluid variieren. Kramers führte später weitere Untersuchungen zu diesem Thema durch. Er wählte die „Filmtemperatur“ (Bruun, 1995)

$$T_f = \frac{T_w + T_a}{2} \quad (2.21)$$

als Referenztemperatur für die Stoffwerte μ , ρ und k . Dadurch erhielt er ausreichend genaue Ergebnisse in einem Bereich von $0,01 < Re < 10\,000$ und $0,71 < Pr < 1\,000$ durch die Verwendung der Gleichung 2.22. (Bruun, 1995)

$$Nu = 0,42 * Pr^{0,2} + 0,57 * Pr^{0,33} * Re^{0,5} \quad (2.22)$$

Bei Strömungen mit sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt ein großer Teil der Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion. Wie stark die natürliche Konvektion ausgeprägt ist, hängt von der Grashof-Zahl (Gr) ab. Der Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion kann vernachlässigt werden, wenn Ungleichung 2.23 erfüllt ist. (Bruun, 1995)

$$Re > Gr^{\frac{1}{3}} \quad (2.23)$$

In jenem Bereich, in dem natürliche Konvektion berücksichtigt werden muss, gilt der Zusammenhang aus Gleichung 2.24, vorausgesetzt die Reynolds-Zahl befindet sich in einem Bereich zwischen 0,02 und 44. (Bruun, 1995)

$$Nu = 0,24 + 0,56 * Re^{0,45} \quad (2.24)$$

2.4.1.2 Wärmetransport eines Drahtelements mit endlicher Länge

Der Wärmeübergang bei dem tatsächlichen HDA ist nur bedingt mit dem Wärmeübergang eines unendlich langen Drahtelements vergleichbar. Der tatsächlich aktive Sensor ist an

einer Halterung befestigt. Diese Halterung wird im englischen als „Prongs“ bezeichnet. Diese Prongs sind im Verhältnis zum Draht sehr dick. Dadurch wird sich dort die mittlere Fluidtemperatur \overline{T}_a einstellen. Da der Draht heißer ist als die mittlere Fluidtemperatur, \overline{T}_a , wird Wärmeleitung auftreten und ein Teil der Wärme wird über die Halterung abfließen. Gleichung 2.25 zeigt die Wärmebilanz, aufgestellt an einem infinitesimalen Drahtelement: (Bruun, 1995)

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s \quad (2.25)$$

Wobei $d\dot{Q}_e$ jene durch elektrische Energie erzeugte Wärmeleistung ist,
 $d\dot{Q}_{fc}$ ist der durch den konvektiven Wärmeübergang übertragene Wärmestrom,
 $d\dot{Q}_c$ ist der durch Wärmeleitung übertragener Wärmestrom,
 $d\dot{Q}_r$ ist die durch Strahlung übertragener Wärmestrom,
 $d\dot{Q}_s$ und d ist die im Element gespeicherte Wärmeleistung.

Jene Wärmeleistung, welche durch elektrischen Strom erzeugt wird, kann mit der Gleichung 2.26 beschrieben werden. (Bruun, 1995)

$$d\dot{Q}_e = \frac{I^2 * \chi_w}{A_w} * dx \quad (2.26)$$

Dabei ist χ_w der spezifische elektrische Widerstand des Drahtes, welcher mit dem Material und der Temperatur T_w des Drahtes variiert. I entspricht der Stromstärke und A_w der Querschnittsfläche des Drahtes. Jener durch Konvektion übertragene Wärmestrom kann mit Gleichung 2.27 bestimmt werden. (Bruun, 1995)

$$d\dot{Q}_{fc} = \pi * d * h * (T_w - T_a) dx \quad (2.27)$$

Der Koeffizient h wird als Wärmeübergangszahl bezeichnet. Der durch Wärmeleitung übertragene Wärmestrom ist in Gleichung 2.28 dargestellt. (Bruun, 1995)

$$d\dot{Q}_c = -k_w * A_w * \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx \quad (2.28)$$

k_w repräsentiert die Wärmeleitfähigkeit des Drahtelements bei der Temperatur T_w .

$$d\dot{Q}_r = \pi * d * \sigma * \epsilon * (T_w^4 - T_s^4) * dx \quad (2.29)$$

Gleichung 2.29 zeigt die Berechnung des Strahlungsterms. In dieser Gleichung entspricht σ der Stefan-Boltzmann Konstante, ϵ ist der Emissionsgrad des Körpers und T_s die

Temperatur der Umgebung, auf die abgestrahlt wird. Der letzte Term der Gleichung 2.25, die gespeicherte Wärmeleistung, wird durch die Gleichung 2.30 ausgedrückt. (Bruun, 1995)

$$d\dot{Q}_S = \rho_w * c_w * A_w * \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (2.30)$$

In Gleichung 2.30 ist ρ_w die Dichte des Materials, aus dem der Draht besteht und c_w die spezifische Wärmekapazität.

Werden nun Gleichung 2.26 bis 2.30 in die Gleichung 2.25 eingesetzt, ergibt sich die Gleichung 2.31. (Bruun, 1995)

$$k_w * A_w * \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx + \frac{I^2 * \chi_w}{A_w} - \pi * d * h * (T_w - T_a) - \rho_w * c_w * A_w * \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (2.31)$$

2.4.1.3 Zusammenhänge der Wärmeübertragung

Für ein unendlich langes Drahtelement kann, unter der Annahme der Vernachlässigung der durch Strahlung abgegebenen Wärmemenge, relativ leicht eine Gleichung gefunden werden, da die Wärmeverluste durch Wärmeleitung über die Halterung nicht berücksichtigt werden müssen. Für ein Element mit der Länge l kann der Zusammenhang wie folgt beschrieben werden: (Bruun, 1995)

$$I^2 R_{w,\infty} = \pi * h * d * l * (T_{w,\infty} - T_a) = \pi * l * k * (T_{w,\infty} - T_a) * Nu \quad (2.32)$$

Aus Gleichung 2.7 kann folgender Zusammenhang freigestellt werden:

$$T_{w,\infty} - T_a = \frac{R_{w,\infty} - R_a}{\alpha_0 R_0} \quad (2.33)$$

Wird nun Gleichung 2.22 und Gleichung 2.33 in Gleichung 2.32 eingesetzt, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$I^2 R_{w,\infty} = \frac{\pi l k}{\alpha_0} * \frac{R_{w,\infty} - R_a}{R_0} * (0,42 * Pr^{0,2} + 0,57 * Pr^{0,33} * Re^{0,5}) \quad (2.34)$$

Für Anwendungen des HDA wird die Gleichung oft in folgender Form geschrieben

$$\frac{I^2 R_{w,\infty}}{R_{w,\infty} - R_a} = A + B * U^{0,5} \quad (2.35)$$

Mit den Konstanten A und B:

$$A = 0,42 * \frac{\pi k l}{\alpha_0 R_0} * Pr^{0,2} \quad (2.36)$$

$$B = 0,57 * \frac{\pi k l}{\alpha_0 R_0} * Pr^{0,33} * \left[\frac{\rho * d}{\mu} \right]^{0,5} \quad (2.37)$$

Bei Drahtelementen mit endlicher Länge müssen noch zusätzlich die Verluste, welche durch Wärmeleitung an die Halterung abgegeben werden, berücksichtigt werden. Dies geschieht in der Regel durch eine leichte Abänderung der Gleichung 2.35. (Bruun, 1995)

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_a} = A + B * U^n \quad (2.38)$$

R_w bezeichnet in dieser Gleichung den tatsächlichen Widerstand des Drahtes bei der Temperatur T_w . Der Zusammenhang zwischen T_w und R_w wird in Gleichung 2.39 beschrieben: (Bruun, 1995)

$$T_w - T_a = \frac{R_w - R_a}{\alpha_0 R_0} \quad (2.39)$$

Der Exponent n , welcher in Gleichung 2.39 zum ersten Mal angeführt ist, wird verwendet, weil der Wurzelansatz ($n=0,5$) nicht sehr genau ist. Die drei Unbekannten aus dieser Gleichung, A , B und n , werden bei der Kalibrierung ermittelt.

HDA werden hauptsächlich zur Messung von Geschwindigkeiten und Temperaturschwankungen verwendet. Im folgenden Kapitel soll nun der Zusammenhang zwischen diesen zwei Größen aufgezeigt werden. (Bruun, 1995)

2.4.1.4 Temperaturempfindlichkeit

Aus der Elektrotechnik ist das Ohm'sche Gesetz bekannt, welches einen Zusammenhang zwischen Spannung, Strom und Widerstand angibt. Auf den Draht des HDA angewandt lautet es wie folgt: (Bruun, 1995)

$$E_w = I R_w \quad (2.40)$$

Wird nun das Ohm'sche Gesetz und Gleichung 2.39 für die Temperaturdifferenz verwendet und in Gleichung 2.38 eingesetzt, so erhält man folgenden Zusammenhang. (Bruun, 1995)

$$\frac{E_w^2}{R_w} = (A + B * U^n) * (T_w - T_a) \quad (2.41)$$

$\alpha_0 R_0$ wurden in Gleichung 2.41 in die Konstanten A und B hineingezogen

2.4.2 Einfluss der Temperatur

In den meisten Strömungen ändert sich die Temperatur des Fluides mit der Zeit, das heißt die Temperatur T_a kann nicht als konstant angenommen werden. Wie bereits in Kapitel 2.4.1.4 gezeigt, hat die Fluidtemperatur großen Einfluss auf den Wärmeübergang. Daher muss die Änderung dieser Temperatur durch eine Korrektur berücksichtigt werden. Im folgenden Kapitel werden die Möglichkeiten zur Korrektur des Temperatureinflusses vorgestellt und beschrieben. (Bruun, 1995)

2.4.2.1 Geschwindigkeit- und Temperaturabhängigkeit von CTA Signalen

Die meisten Gleichungen zur Umrechnung des Signals in die Geschwindigkeitskomponenten lassen sich in 3 Kategorien einteilen: (Bruun, 1995)

- Erstens kann der Wärmeübergang als Produkt der Temperaturdifferenz $T_w - T_a$ und eine Funktion der Geschwindigkeit dargestellt werden.

$$E^2 = f(U) * (T_w - T_a) \quad (2.42)$$

- Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Wärmeübergang mit Hilfe von dimensionslosen Kennzahlen zu beschreiben. Dabei werden meist die Kennzahlen Nu , Pr und Re verwendet.
- Direkte Kalibrierung, um einen Zusammenhang zwischen dem Ausgangssignal E und der Geschwindigkeit U herzustellen.

2.4.2.1.1 Direkte Kalibrierung

Die direkte Kalibrierung ist die genaueste Art, um einen Zusammenhang zwischen der Spannung und der Geschwindigkeit zu ermitteln. Dabei wird für ein fixiertes Setting ($R_w = \text{konst.}$) das Spannungssignal für eine vorgegebene Geschwindigkeit gemessen, wodurch sich ein Zusammenhang $E = f(U, T_a)_{T_w = \text{konst.}}$ ergibt. Diese Kalibrierung wird bei verschiedenen Fluidtemperaturen T_a durchgeführt, was zu einer Schar an Kurven führt, wie in Abbildung 6 dargestellt. (Bruun, 1995)

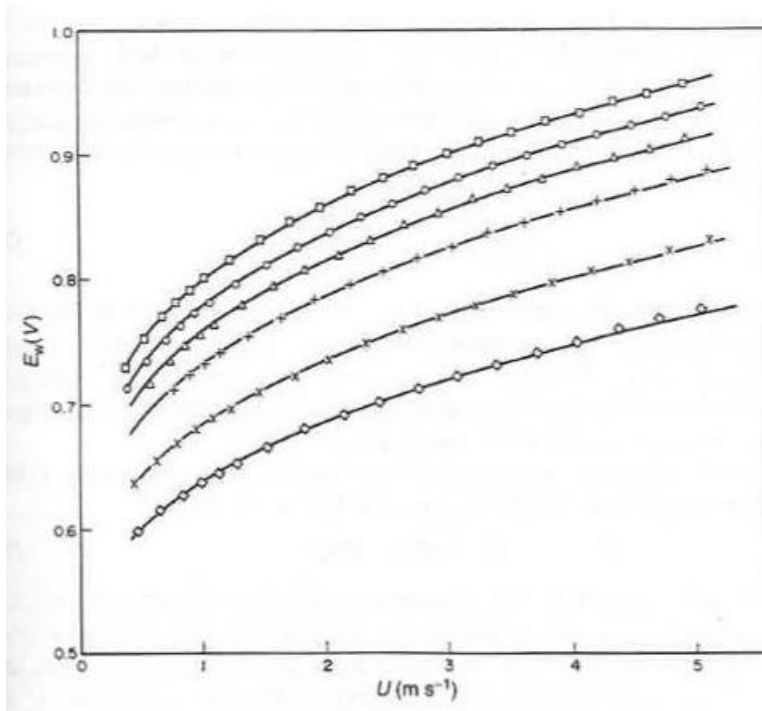


Abbildung 6: Einfluss der Temperatur auf das Spannungssignal (Bruun, 1995)

Diese Methode setzt genaue Kenntnis über die Widerstände des HDA voraus, da die Temperatur des Drahtes T_w mit diesen Widerständen berechnet wird. Die Gleichungen zur Ermittlung der Drahttemperatur sind in Kapitel 2.4.1 angeführt.

Für die mathematische Formulierung der Kurve zwischen den Kalibrierpunkten können verschiedene mathematische Formulierungen gewählt werden, wie in Kapitel 2.4.4 gezeigt wird.

Wird nun vorausgesetzt, dass das Potenzgesetz verwendet wird und der Wert für $n=0,45$ (guter Wert für n) konstant gesetzt wird, ergibt sich eine Abhängigkeit der Koeffizienten A und B von der Fluidtemperatur T_a . Zur Ermittlung eines mathematischen Zusammenhangs der temperaturabhängigen Konstanten gibt es mehrere Ansätze, welche einen linearen Zusammenhang zwischen den Konstanten und der Fluidtemperatur voraussetzen. Eine häufig gewählte Formulierung wird mit Gleichung 2.43a und Gleichung 2.43b gezeigt. Bei diesem Ansatz werden die von der Fluidtemperatur abhängigen Kalibrierkonstanten A und B mit A^* und B^* bezeichnet. (Bruun, 1995)

$$A^* = A_1 + A_2 T_a \quad (2.43a)$$

$$B^* = B_1 + B_2 T_a \quad (2.43b)$$

Ein weiterer Ansatz ist, dass die Kalibrierkonstanten proportional zu einem Koeffizienten und der Temperaturdifferenz $T_w - T_a$ sind. (Bruun, 1995)

$$A^* = A(T_w - T_a) \quad (2.44a)$$

$$B^* = B(T_w - T_a) \quad (2.44b)$$

2.4.2.1.2 Wärmeübergang als Funktion von Temperatur und Geschwindigkeit

Für moderate Änderungen in der Fluidtemperatur von 10-80°C kann der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Temperatur und Spannung, wie bereits erwähnt, mit Gleichung 2.41 dargestellt werden. (Bruun, 1995)

$$\frac{E_w^2}{R_w} = (A + B * U^n) * (T_w - T_a) \quad (2.41)$$

Die Korrektur der Spannung kann mit der nachfolgenden Gleichung 2.45 durchgeführt werden.

$$E_w = E_{w,r} \left(\frac{T_w - T_a}{T_w - T_{a,r}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

Die Temperatur $T_{a,r}$ stellt eine Referenztemperatur des Fluides dar, zum Beispiel jene Temperatur, welche zur Kalibrierung verwendet wurde. (Bruun, 1995)

2.4.2.2 Korrekturmöglichkeiten bei schwankender Fluidtemperatur

Wenn sich die Temperatur der Strömung ändert, gibt es drei Möglichkeiten dies zu korrigieren. (Bruun, 1995)

- Automatische Kompensation: Es wird ein Temperatursensor in die Wheatstone Brücke eingebaut, welcher die Änderung der Umgebungstemperatur kompensiert. Bei dieser Methode ist es nicht notwendig, eine separate Messung der Temperatur durchzuführen.
- Manuelle Kompensation: Bei der manuellen Kompensation wird der Widerstand am Draht manuell so verändert, dass die Abweichung in der Fluidtemperatur ausgeglichen wird. Bei dieser Methode ist es notwendig, die Fluidtemperatur mit einem zusätzlichen Sensor zu messen.
- Analytische Korrektur: Bei dieser Methode wird der Widerstand R_w konstant gehalten und die Spannung wird im Nachhinein mittels der Gleichung 2.44 oder mittels direkter Kalibration korrigiert. Wie bei der zweiten Methode, ist auch bei dieser Methode die Kenntnis der Strömungstemperatur essentiell.

2.4.3 Einfluss des Drucks

Neben der Temperatur hat auch der Druck großen Einfluss auf den Output der Messung. Aus der Kontinuitätsgleichung, siehe Gleichung 2.46, ist erkennbar, dass der Massenstrom ein Produkt der Dichte, der Geschwindigkeit und der Fläche, welche rechtwinklig auf die Geschwindigkeit steht, ist.

$$\dot{m} = \rho * c * A \quad (2.46)$$

Bei zunehmendem Druck ändern sich die Eigenschaften des Fluides und somit auch die Dichte. Dieser Zusammenhang kann aus der Idealgasgleichung abgeleitet werden und ist in Gleichung 2.47 ersichtlich,

$$\rho = \frac{p}{R * T} \quad (2.47)$$

wobei p den Druck in Pascal repräsentiert, ρ die Dichte, R die Gaskonstante der Luft und T die Temperatur in Kelvin.

Wird nun die Geschwindigkeit und die Temperatur als konstant angenommen, ändert sich bei zunehmendem Druck auch die Dichte proportional dazu. Dies führt bei gleicher Geschwindigkeit zu einer Erhöhung des Massenstroms und somit zu einer Steigerung der übertragenen Wärmemenge an die Strömung.

Durch die Kalibrierung mittels Massenstromdichte kann dieser Effekt berücksichtigt und ausgeglichen werden.

2.4.3.1 Kalibrierung mittels Massenstromdichte

Die Massenstromdichte wird durch das Produkt von Geschwindigkeit und Dichte gebildet, siehe Gleichung 2.48. (Kurten, 2011)

$$MSD = \rho * c \quad (2.48)$$

In den vorherigen Kapiteln wurde zum Thema Kalibrierung die Notwendigkeit eines Zusammenhangs zwischen Spannung und Geschwindigkeit erläutert. Bei der Kalibrierung mittels Massenstromdichte gilt es, einen Zusammenhang zwischen Spannung und Massenstromdichte herzustellen.

$$MSD = F(U) \quad (2.49)$$

Mit Hilfe der Spannung wird eine Massenstromdichte berechnet, aus der anschließend die Geschwindigkeit ermittelt werden kann.

2.4.4 Gleichungen zur Kalibrierung

Um den Zusammenhang aus Gleichung 2.49 darstellen zu können, hat jeder Anwender mehrere Gleichungen zur Auswahl, die einen passenden Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit bzw. Massenstromdichte und dem Ausgangssignal herstellen. Je nach Gleichung treten verschiedene Vor- und Nachteile auf, sei es in der mathematischen Verarbeitung und Implementierung in das Rechenprogramm oder in der Genauigkeit. Im

folgenden Kapitel soll nun ein grober Überblick über die gängigsten Gleichungen gegeben werden. (Bruun, 1995)

2.4.4.1 Das Potenzgesetz

Das Potenzgesetz wird in der Form

$$E=A+B U^n \quad (2.50)$$

angegeben. Um das Potenzgesetz auf einen Datensatz anzuwenden, gibt es drei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit ist, alle drei Konstanten A, B und n aus dem Datensatz zu ermitteln. Die zweite Möglichkeit ist, die Konstanten A und B aus dem Datensatz zu ermitteln und n als Variable zu betrachten. n wird so lange verändert bis der Fehler minimal wird.

Zuletzt können auch die Konstanten B und n aus dem Datensatz ermittelt werden und A wird als Variable betrachtet. (Bruun, 1995)

2.4.4.2 Polynom Gleichung

Der vorher gezeigte Ansatz zur mathematischen Formulierung des Zusammenhangs der Geschwindigkeit U und der Spannung E war in der Form $E = F(U)$ gegeben. Da die Geschwindigkeit von Interesse ist, muss die Gleichung umgestellt werden und auf die Form $E = F^{-1}(U)$ gebracht werden. Mathematisch spricht jedoch nichts dagegen, einen Zusammenhang für die Geschwindigkeit und die Spannung zu finden, welcher in der Form $U = F(E)$ gegeben ist. (Bruun, 1995)

$$U = A + BE + CE^2 + DE^3 + \dots \quad (2.51)$$

Diese Gleichung benötigt deutlich weniger Rechenleistung bei der Verarbeitung der Daten, da U bereits in expliziter Form gegeben ist.

Spätere Untersuchungen zu diesem Thema brachten noch weitere Verbesserungen in Form der folgenden Gleichungen hervor: (Bruun, 1995)

$$U = A + BE^2 + C(E^2)^2 \quad (2.52)$$

$$U = A + BE^2 + C(E^2)^2 + D(E^2)^3 \quad (2.53)$$

2.4.4.3 Genauigkeit der Kalibrierungsgleichungen

Die folgend angeführten Genauigkeiten wurden für einen Bereich von 5-50m/s erfasst. Um die Zuverlässigkeit der vorliegenden Daten zu verifizieren, wurde zuerst das Potenzgesetz

auf diesen Datensatz angewandt. Nach der Verifizierung wurde derselbe Datensatz für die restlichen Gleichungen verwendet.

Der Fehler ε_u wird durch die Gleichung 2.54 definiert. (Bruun, 1995)

$$\varepsilon_u = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{U_R}{U_C} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.54)$$

U_R repräsentiert die gemessene Geschwindigkeit und U_C jene Geschwindigkeit, welche sich aus dem Zusammenhang $U_C = F^{-1}(E_R)$ mit der gemessenen Spannung E_R bestimmen lässt. (Bruun, 1995)

2.4.4.3.1 Potenzgesetz

Die Ergebnisse für die Auswertung mit dem Potenzgesetz sind in Tabelle 1 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine gute Genauigkeit ($\varepsilon_u \cong 0,1 - 0,15\%$) in allen drei Fällen erreicht werden kann. Die gleichzeitige Ermittlung aller drei Konstanten A, B und n aus dem Datensatz des Kalibriervorgangs ergibt die höchste Genauigkeit. (Bruun, 1995)

Tabelle 1: Genauigkeit des einfachen und erweiterten Potenzgesetzes für Geschwindigkeiten im Bereich 5-50 m/s (Bruun, 1995)

	A	B	C	n	$\varepsilon_u(\%)$
$E^2 = A + BU^n$					
Gleichzeitige Lösung A,B und n	5,980	4,608	-	0,4137	0,11
Inkrement, n	6,018	4,587	-	0,4145	0,15
Inkrement, A	6,005	4,592	-	0,4143	0,15
$E^2 = A + BU^{\frac{1}{2}} + CU$	7,544	3,449	-0,005	0,5	0,46

2.4.4.3.2 Erweitertes Potenzgesetz

Die Ergebnisse der Genauigkeit für das erweiterte Potenzgesetz sind ebenfalls in Tabelle 1 dargestellt. Die Konstante C hat den Wert -0,005 und zeigt, dass der Term CU als eine Art Korrekturterm im Vergleich zum gewöhnlichen Potenzgesetz verstanden werden kann. Trotz dieses Korrekturterms ist ersichtlich, dass sich der Wert des Fehlers im Vergleich zum normalen Potenzgesetz mehr als verdreifacht hat. (Bruun, 1995)

2.4.4.3.3 Polynom Gleichung

Tabelle 2: Genauigkeit der Polynom Gleichung verschiedenen Grades für Geschwindigkeiten im Bereich 5-50 m/s (Bruun, 1995)

	$\epsilon_u(\%)$
$U = A + BE + CE^2$	2,5
$U = A + BE + CE^2 + DE^3$	0,24
$U = A + BE + CE^2 + DE^3 + DE^4$	0,15
$U = A + BE^2 + C(E^2)^2$	0,8
$U = A + BE^2 + C(E^2)^2 + D(E^2)^3$	0,15

Tabelle 2 zeigt den Fehler für Polynomgleichungen von zweiter bis vierter Ordnung sowie den Fehler von deren zwei Variationen. Der Trend zeigt, dass die Polynomgleichungen grundsätzlich einen höheren Fehler aufweisen als der Potenzansatz. Nur die Gleichung vierter Ordnung und die zweite Variation der Polynomgleichung sind vergleichbar genau. (Bruun, 1995)

2.5 Auswertung der Spannungsdaten des 3W-Sensors 55R97

Nachdem bei der Kalibrierung alle Konstanten für einen bestimmten Sensortyp ermittelt wurden, können die bei der Messung ermittelten Spannungssignale in die Geschwindigkeitskomponenten der Raumrichtungen umgerechnet werden. Im folgenden Abschnitt wird die Umrechnung für die 3W-Sonde 55R97 von Dantec gezeigt. Die Anordnung der drei Drähte ist in Abbildung 7 abgebildet. Für die genauere Beschreibung der 3W-Sonde 55R97 wird auf das Kapitel 3.1.3 verwiesen.

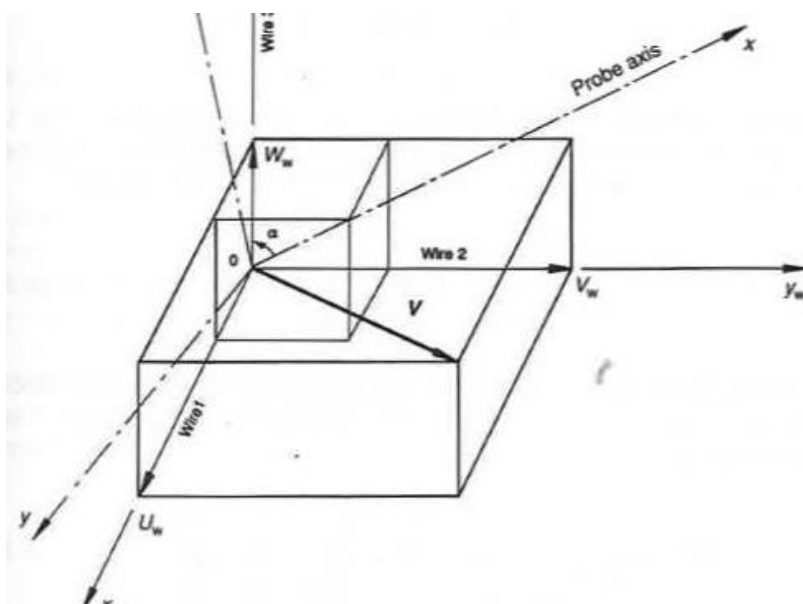


Abbildung 7: Sensor- und Sonden-Koordinatensystem einer HDA-Sensors (Bruun, 1995)

Aus dem Ansatz der effektiven Geschwindigkeit, welcher das Potenzgesetz und das Gesetz von Jørgensen beinhaltet, ergeben sich die Gleichungen 2.55a, 2.55b, und 2.55c.

In den Gleichungen 2.55a-2.55c fällt auf, dass neben den in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Konstanten A, B und n noch weitere Kalibrierkonstanten vorkommen. Bei 3W-Sensoren muss neben der Kalibrierung der Geschwindigkeit bzw. der Massenstromdichte noch eine weitere Kalibrierung zur Ermittlung der Positionierung der Drähte zueinander durchgeführt werden. Diese Kalibrierung wird Winkelkalibrierung genannt. Deren Durchführung wird in den späteren Kapiteln genauer erläutert. (Bruun, 1995)

$$\left(\frac{E_1^2 - A_1}{B_1}\right)^{\frac{2}{n_1}} = V_{e1}^2 = k_1^2 U_w^2 + V_w^2 + h_1^2 W_w^2 \quad (2.55a)$$

$$\left(\frac{E_2^2 - A_2}{B_2}\right)^{\frac{2}{n_2}} = V_{e2}^2 = h_2^2 U_w^2 + k_2^2 V_w^2 + W_w^2 \quad (2.55b)$$

$$\left(\frac{E_3^2 - A_3}{B_3}\right)^{\frac{2}{n_3}} = V_{e3}^2 = U_w^2 + h_3^2 V_w^2 + k_3^2 W_w^2 \quad (2.55c)$$

Werden die Gleichungen 2.55a, 2.55b, und 2.55c zu Matrizen zusammengefasst, können sie folgendermaßen angeschrieben werden. (Bruun, 1995)

$$\begin{bmatrix} V_{e1}^2 \\ V_{e2}^2 \\ V_{e3}^2 \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} U_w^2 \\ V_w^2 \\ W_w^2 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Die Matrix **D** wird dabei wie folgt definiert:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} k_1^2 & 1 & h_1^2 \\ h_2^2 & k_2^2 & 1 \\ 1 & h_3^2 & k_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Durch die Bildung der Inversen der Matrix **D** kann das oben angeführte Gleichungssystem gelöst werden.

$$\begin{bmatrix} U_w^2 \\ V_w^2 \\ W_w^2 \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e1}^2 \\ V_{e2}^2 \\ V_{e3}^2 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Nachdem das Gleichungssystem gelöst wurde, müssen die Geschwindigkeiten in das Sonden-Koordinatensystem umgerechnet werden. Die geschieht durch Anwendung der Matrix **N**. Des Weiteren können die Geschwindigkeiten mit der Matrix **C** in jedes beliebige

Koordinatensystem transformiert werden, vorausgesetzt die beiden Drehwinkel β und γ sind bekannt. Die Position dieser beiden Winkel ist in Abbildung 8 gezeigt. (Bruun, 1995)

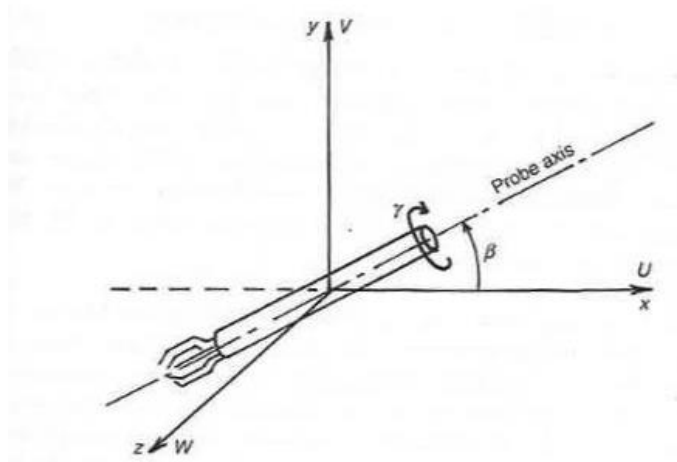


Abbildung 8: Dreh- und Kippwinkel eines HDA-Sensors (Bruun, 1995)

Formal kann diese Transformation wie in Gleichung 2.59 angeschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{CN} \begin{bmatrix} U_w \\ V_w \\ W_w \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Die Matrizen \mathbf{N} und \mathbf{C} werden in Gleichung 2.60 bzw. 2.61. definiert. Anzumerken ist noch, dass sich die Einträge der Matrix \mathbf{N} je nach Sensortyp ändern. Die Winkel werden für jeden Sensor vom Hersteller angegeben und müssen dementsprechend adaptiert werden. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0,57735 & 0,57735 & 0,57735 \\ 0,707107 & -0,707107 & 0 \\ 0,408248 & 0,408248 & 0,816496 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

3 Hardware zur Kalibrierung und Messung

Um die in Kapitel 1 angeführte Problemstellung lösen zu können, mussten für die Messung einige Bauteile adaptiert bzw. neu konstruiert werden. Im Folgenden soll das Gesamtsystem und jene zusätzlich konstruierten Bauteile, welche für die Messung notwendig waren, genauer beschrieben werden sowie die Gedankenzüge, welche zur finalen Ausführung geführt haben, näher erläutert werden.

3.1 StreamLine Pro System

Bei dem StreamLine Pro System handelt es sich um ein Constant Temperature Anemometer von Dantec Dynamics. Das System ermöglicht die Messung mit allen von Dantec erhältlichen Sensoren und besteht aus folgenden Komponenten: (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

- CTA Module
 - Anemometer
 - Signal Conditioner
- 3W-Sensor 55R97
- A-D-Wandler: PCI 6133
- Automatisches Kalibriergerät
- Pitch/Yaw Manipulator
- Filtereinheit

In Abbildung 9 ist das SteamLine Pro System mit Kalibrierkanal dargestellt.



Abbildung 9: StreamLine Pro System (Dynamics, Dantec Dynamics: Turn Measurement into Knowledge, 2018)

3.1.1 CTA Module

Die CTA Module bilden das Herzstück des Messgerätes. Das Anemometer beinhaltet die Schaltung, welche die Messung ermöglicht. Der Signal Conditioner wandelt dieses Signal in ein Analoges Spannungssignal um, welches dann vom A-D-Wandler verarbeitet werden kann. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

3.1.1.1 Anemometer

Das Anemometer arbeitet nach dem Constant-Temperatur-Prinzip mit einer Wheatstone Brücke. Dabei wird ein Fehlerstrom in der Brücke gemessen, welcher ein Maß für die Abkühlung des Drahtes ist. Je nach Betrag des Fehlerstroms wird die Menge an Strom, welche über die Brücke läuft, erhöht bzw. erniedrigt, um den Draht auf konstanter Temperatur zu halten. Dieser Fehlerstrom ist proportional zu jener Spannung, welche vom A-D-Wandler eingelesen wird.

Für das von Dantec gelieferte Anemometer sind zwei Einstellungen des Bridge Ratios möglich: 1:20 und 1:1.

In den meisten Anwendungen wird ein Verhältnis von 1:20 eingestellt. Durch diese Einstellung kann der Widerstand am Hitzdraht besonders genau eingestellt werden, welcher die Temperatur des Drahtes bestimmt. In Zahlen ausgedrückt, lässt sich die Temperatur am Draht mit einem Fehler, welcher kleiner 0,1% ist, einstellen.

Die Einstellung 1:1 wird in speziellen Situationen verwendet, zum Beispiel wenn sehr lange Kabel zur Messung benötigt werden und die volle Bandbreite des Systems ausgeschöpft werden soll.

Des Weiteren besitzt das Messsystem einen Schutzmechanismus, der das Überhitzen des Sensors verhindern soll. Der Stromfluss durch den Draht wird bei einem falsch eingestellten Widerstand oder anderen Unregelmäßigkeiten sofort unterbrochen.

Zusätzlich verfügt das Anemometer über ein sehr präzises Widerstandsmessgerät, mit welchem die Widerstände der einzelnen Bauteile ausgemessen werden können. Dies dient dazu, um den Kaltwiderstand des Messaufbaus zu ermitteln. Aus diesem Kaltwiderstand wird mittels Overheat Ratio der einzustellende Widerstand am Draht errechnet und damit jene Temperatur, welche der Draht nach der Aktivierung der Brücke annehmen wird. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

3.1.1.2 Signal Conditioner

Der Signal Conditioner wird verwendet, um die Spannung am Ausgang des Messgeräts an den Eingang des A-D-Wandlers anzupassen. Zusätzlich wird durch dieses Bauteil eine Filterung des Signals ermöglicht. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

3.1.2 3W-Sensor 55R97

Beim Sensor 55R97, welcher in Abbildung 10 dargestellt ist, handelt es sich um einen Triple-Fiber-Film Sensor zur instationären Messung aller drei Geschwindigkeitskomponenten U, V

und W . Der Sensor wird rechtwinklig zur Achse des Schafts angeströmt und besitzt einen Akzeptanzkegel mit einem Öffnungswinkel von $70,4^\circ$. (Dynamics, Dantec Dynamics: Turn Measurements into Knowledge, 2018)

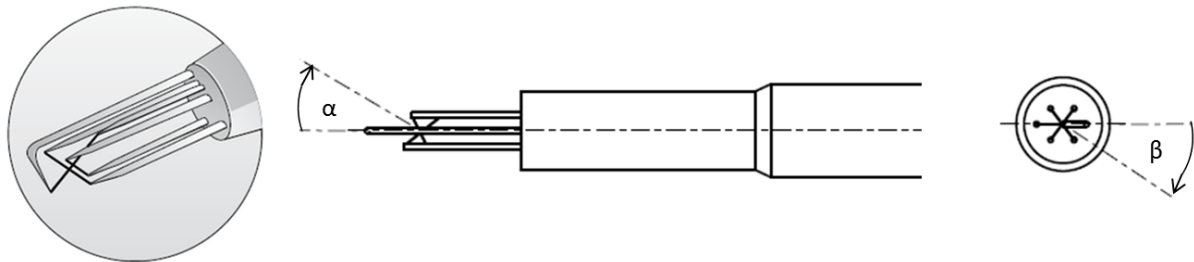


Abbildung 10: 3W-Sensor 55R97 mit Kennzeichnung des Pitch- und Yaw-Angles (Dantec dynamics: turn measurements into knowledge, 3W-Probe, 2018)

In Abbildung 10 sind zusätzlich der Pitch- und der Yaw-Angle eingezeichnet. α entspricht dabei dem Yaw-Angle und β dem Pitch-Angle.

3.1.3 A-D-Wandler PCI-6133

Der PCI-6133 ist ein Multifunktions-Datenerfassungsmodul mit simultaner Abtastung von National Instruments. Das Gerät wandelt das analoge Eingangssignal in ein digitales Signal um, welches vom Computer verarbeitet werden kann. Es handelt sich hierbei um einen 14 bit A-D-Wandler, welcher folglich das Eingangssignal in 2^{14} Abschnitte genau unterteilen kann. (Instruments, 2018)

Abbildung 11 zeigt einen solchen Analog-Digital-Wandler. Dieser ist üblicherweise nicht sichtbar im Computer verbaut.



Abbildung 11: PCI-6133 (Instruments, 2018)

3.1.4 Automatisches Kalibriergerät

Das automatische Kalibriergerät kann zur Kalibrierung verschiedenster Sensoren verwendet werden und ist für Geschwindigkeiten von wenigen cm/s bis zu ca. Mach 1 geeignet. Das Kalibriergerät benötigt einen Druckluftanschluss, welcher mit einem zwischengeschalteten Filter an das System angeschlossen wird. Mittels USB oder Ethernet kann der Kalibrierkanal

an den Computer angeschlossen werden und so vom Computer aus gesteuert werden. Insgesamt stehen vier Düsen zur Verfügung, die auf den Ausgang des Kalibrierkanals aufgeschraubt werden können. Diese Düsen haben verschieden große elliptische Querschnitte und ermöglichen so eine große Breite an verschiedenen Geschwindigkeiten bei einem möglichst geringen Turbulenzgrad im Freistrah. Die Flächen der vier Düsen betragen: (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

- Düse 0: 1385 mm² (Ø 42 mm) für 0,02-0,5m/s
- Düse 1: 113 mm² (Ø 12 mm) für 0,5-60 m/s
- Düse 2: 60 mm² (Ø 8,7 mm) für 5-120 m/s
- Düse 3: 20 mm² (Ø 5 mm) für 5-300 m/s

Die Düsen können, wie in Abbildung 12 ersichtlich, am Ausgang des Kalibrierkanals hineingeschraubt und je nach Bedarf ausgetauscht werden.



Abbildung 12: Automatisches Kalibriergerät (Dynamics, Dantec Dynamics: Turn Measurement into Knowledge, 2018)

Bei der Kalibrierung selbst wird die eingestellte Geschwindigkeit in Kombination mit der Temperatur und den Spannungssignalen der Drähte aufgezeichnet wodurch die Kalibrierkonstanten errechnet werden können. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

3.1.5 Pitch/Yaw Manipulator

Der Pitch/Yaw Manipulator ermöglicht die Einstellung verschiedener Winkel bei der Kalibrierung. Die Pitch und Yaw Winkel können dabei beliebig eingestellt werden und somit können 3W-Sensoren kalibriert werden. Die Winkeleinstellung muss von Hand durchgeführt werden. Abbildung 13 zeigt den am Institut vorhandenen Pitch/Yaw Manipulator.

(Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)



Abbildung 13: Pitch/Yaw Manipulator

3.1.6 Filtereinheit

Die Filtereinheit reinigt die Luft vor Eintritt in den Kalibrierkanal von Partikeln oder Öltropfen, die aus dem Druckluftnetz stammen können. Die maximale Lufttemperatur, mit der der Filter durchströmt werden darf, beträgt 80°C, bei einem maximalen Druck von 16 bar. Sollten höhere Temperaturen bei der Messung und damit auch bei der Kalibrierung erreicht werden, kann die Filtereinheit durch eine andere, welche für höhere Temperaturen geeignet ist, ersetzt werden. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

3.2 Druckluftherhitzer

Wie in den theoretischen Grundlagen gezeigt, ist der Wärmeübergang des HDA stark temperaturabhängig. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, ist es notwendig, die Druckluft, welche von der Hausdruckluft entnommen wird, auf die zu erwartende Temperatur zu erwärmen. Um dies zu ermöglichen, wurde ein Druckluftherhitzer konstruiert bzw. adaptiert, der über die entsprechende Leistung verfügt.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang noch zu erwähnen, dass der Druckluftherhitzer immer von Luft umströmt sein muss! Sollte dies nicht der Fall sein, wird dieser zu wenig gekühlt und das System thermisch überlastet. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

3.2.1 Ausgangspunkt

Ausgangspunkt für die Konstruktion ist ein bereits am Institut vorhandener Druckluftherhitzer. Dieser wurde mit Dreiphasenwechselstrom betrieben und verfügte mit ca. 18 kW über eine deutlich zu hohe Leistung. Die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie erfolgt

mittels Heizwiderständen. Abbildung 14 zeigt den Druckluftherizer mit denen im Nachhinein hinzugefügten Adaptierungen und eine schematische Darstellung des Aufbaus.

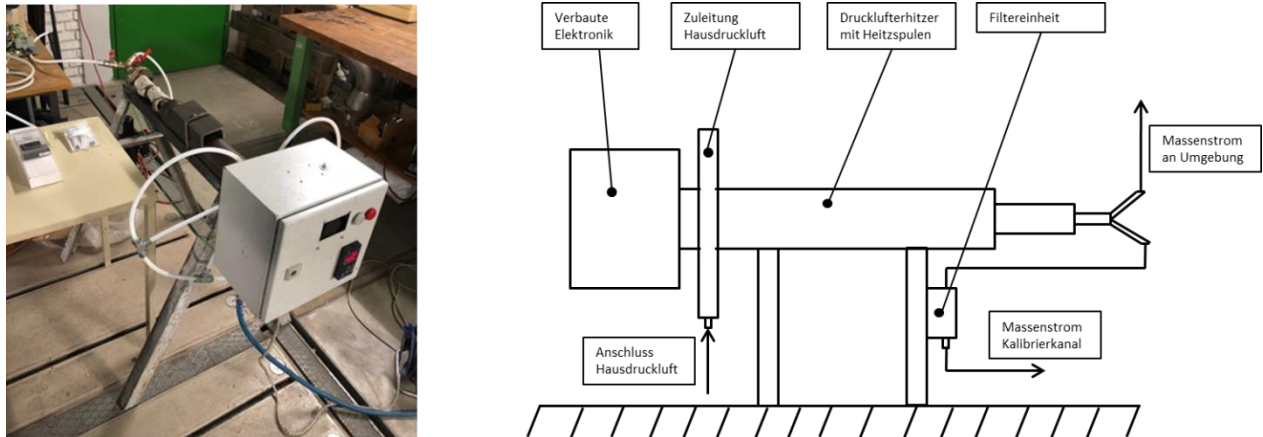


Abbildung 14: Druckluftherizer mit schematischer Skizze des Aufbaus

3.2.2 Berechnung der benötigten Leistung

Im ersten Schritt wurde eine vereinfachte Berechnung zur Ermittlung der benötigten Leistung durchgeführt. Dazu wurde eine inkompressible Strömung durch einen adiabaten Luftherizer angenommen. Des Weiteren wurde die Dichte unabhängig von der Temperatur als konstant vorausgesetzt. Die Stoffwerte für die Dichte der Luft wurden bei 20 °C (Raumtemperatur) nachgeschlagen, da diese Temperatur der minimalen Temperatur entspricht, mit der kalibriert werden kann und somit die größte Dichte aufweist. Zur Ermittlung des Massenstroms wurden die Querschnitte und die erlaubten Geschwindigkeiten durch die Düsen des Kalibrierkanals verwendet. Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung kann, wie in Gleichung 3.1, der Massenstrom berechnet werden.

$$\dot{m} = \rho * A * c \quad (3.1)$$

Wird nun eine Kreisfläche am Düsenaustritt angenommen, ergeben sich mit Gleichung 3.2 folgende Flächen für die Düsen:

$$A = r^2 * \pi \quad (3.2)$$

Düse 0: $A=1385 \text{ mm}^2$

Düse 1: $A=113 \text{ mm}^2$

Düse 2: $A=60 \text{ mm}^2$

Düse 3: $A=20 \text{ mm}^2$

Die zu den Flächen dazugehörigen maximalen Geschwindigkeiten können aus dem Kapitel 3.1.4 entnommen werden. Für die Dichte wird ein Wert von $\rho= 1,05 \text{ kg/m}^3$ (bei 20 °C)

angenommen. Damit ergeben sich folgende Massenströme für die verschiedenen Düsen: (Wischnewski, 2018)

Düse 0: $\dot{m} = 0,0007 \text{ kg/s}$

Düse 1: $\dot{m} = 0,007 \text{ kg/s}$

Düse 2: $\dot{m} = 0,008 \text{ kg/s}$

Düse 3: $\dot{m} = 0,006 \text{ kg/s}$

Um die maximal benötigte Leistung zu berechnen, wird für die folgende Betrachtung der Massenstrom von Düse zwei verwendet.

Das stark vereinfachte System, das zur Berechnung der Leistung verwendet wird, ist in Abbildung 15 dargestellt. Dieses System wird als stationär und adiabat angenommen.

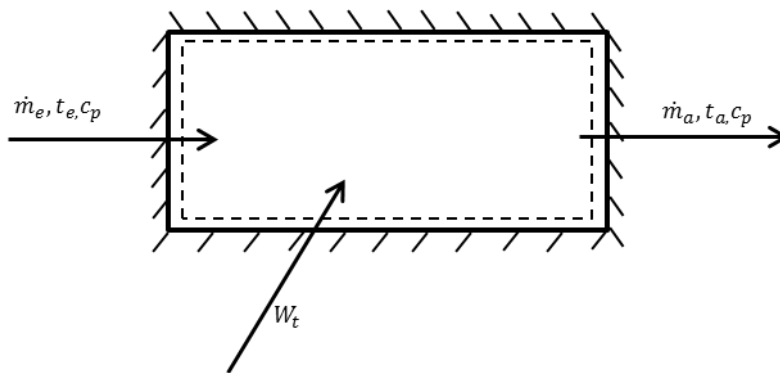


Abbildung 15: Vereinfachtes thermodynamisches System

Nach Anwendung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik und der Vereinfachung dieser Gleichung, ergibt sich die in Gleichung 3.3 angeführte Formel zur Berechnung der technischen Leistung. Für die spezifische Wärmekapazität wird ein Wert von $1,019 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ angenommen. Dieser Wert entspricht der spezifischen Wärmekapazität von Luft bei 8 bar Luftdruck und 20°C . Die Referenztemperatur von 20°C wurde wiederum gewählt, weil bei dieser Temperatur die spezifische Wärmekapazität am größten ist und so die maximale Leistung bestimmt werden kann. Für die Ausgangstemperatur wurde eine Temperatur von 130°C angenommen, da dies die maximal erlaubte Temperatur der Zuleitungen des Druckluftherzigers ist, für die Eingangstemperatur wurden 20°C gewählt (Raumtemperatur). (Wärmekapazität von Gasen, 2018)

$$W_t = \dot{m} * c_p * (t_a - t_e) = 896,72 \text{ W} \quad (3.3)$$

3.2.3 Anschlüsse an den Druckluftheritzer

Das Hauptaugenmerk bei der Auswahl der Zu- und Ableitungen wurde auf den Druck und die Temperatur gelegt. Die Schläuche müssen einem Druck von 8 bar bei einer Temperatur von 130°C standhalten. Die Annahme der Temperatur wurde getroffen, weil beim Kauf eines neuen Filters eine höhere Temperatur als die 80°C auftreten darf und man dahingehend

nicht beschränkt sein möchte. Die in der Turbine auftretenden Temperaturen wurden zum Vergleich in Kapitel 1 angeführt.

Des Weiteren sollte der Innendurchmesser nicht zu klein sein, um zu große Strömungsverluste zu vermeiden.

Die Auswahl fiel auf einen Schlauch aus Teflon von Horsta mit einem Innendurchmesser von 8mm. Der Anschluss an die Hausdruckluft erfolgt mit einer Schnellkupplung (EU Standardgröße).

3.2.4 Schaltung der Widerstände

Der Druckluftherizer besteht aus sechs Widerständen, welche beliebig miteinander verschaltet werden können. Der Betrag der einzelnen Widerstände beträgt im Mittel 30 Ohm. Die Schaltung der Widerstände erfolgt, wie in Abbildung 16 gezeigt, durch drei parallel geschaltete Widerstände, welche in Serie geschaltet werden.

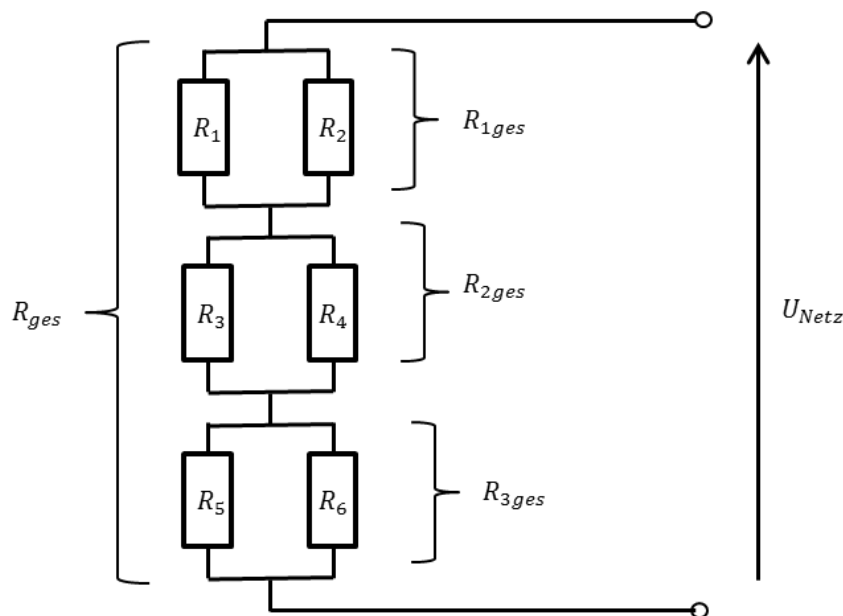


Abbildung 16: Schaltung Druckluftherizer

Zur Berechnung der Leistung aller Widerstände, werden die Widerstände, wie in Abbildung 16 mit den geschwungenen Klammern dargestellt, zusammengefasst. Zuerst werden die zwei parallel geschalteten Widerstände (z.B. R_1 und R_2) mit einem Widerstand ersetzt (z.B. R_{1ges}). Die Berechnung wird hier für R_1 und R_2 gezeigt. Für alle weiteren Widerstände erfolgt die Berechnung analog.

$$\frac{1}{R_{1ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3.4)$$

Nachdem die rechte Seite der Gleichung 3.4 auf gleichen Nenner gebracht und der Kehrwert gebildet wurde, ergibt sich die explizite Gleichung 3.5 für R_{1ges} .

$$R_{1ges} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30 * 30}{30 + 30} = 15\Omega \quad (3.5)$$

Nach der Vereinfachung der Widerstände mit Gleichung 3.5 erhält man drei Widerstände, welche in Serie geschaltet sind. Daraus lässt sich der Gesamtwiderstand der Schaltung mit Gleichung 3.6 berechnen.

$$R_{ges} = R_{1ges} + R_{2ges} + R_{3ges} = 15 + 15 + 15 = 45\Omega \quad (3.6)$$

Die Leistung kann mit Hilfe ihrer Definition $P=U*I$ und dem Ohm'schen Gesetz berechnet werden. Nach Umformen und Einsetzen des Ohm'schen Gesetzes ergibt sich Gleichung 3.7.

$$P = \frac{U^2}{R_{ges}} \quad (3.7)$$

Für eine Spannung von 230 Volt ergibt sich eine Leistung der Widerstände von 1175 Watt.

3.2.5 Regelung des Druckluftherhitzers

Aus der oben durchgeführten Berechnung ist ersichtlich, dass der Luftherhitzer eine maximale Leistung von ca. 900 Watt benötigt, die Heizwiderstände jedoch eine Leistung von 1175 Watt zur Verfügung stellen. Zusätzlich muss es auch möglich sein, bei verschiedenen Temperaturniveaus und Massenströmen eine Kalibrierung durchführen zu können. Aus diesen Gründen ist es notwendig, dass der Druckluftherhitzer über eine Art der Leistungsregelung verfügt.

Um die gewünschte Leistung einstellen zu können, wurden zwei Möglichkeiten der Leistungsregelung eingebaut:

- Bypass
- Leistungsregelung

3.2.5.1 Bypass

Der Bypass bietet die Möglichkeit, mehr Luft durch den Druckluftherhitzer strömen zu lassen als für die Kalibrierung notwendig ist und die überschüssige Luft an die Umgebung abzugeben. Wie in Gleichung 3.3 ersichtlich ist, sinkt bei zunehmendem Massenstrom die Ausgangstemperatur, wenn die technische Leistung konstant gehalten wird. Zusätzlich wird durch den Bypass sichergestellt, dass immer Luft um den Druckluftherhitzer strömt, um eine thermische Überlastung zu verhindern.

3.2.5.2 Leistungsregelung

Die Leistungsregelung erfolgt mit dem Leistungsregler Bausteins Kemo M204 230V/AC. Dieser Baustein regelt die Leistung mithilfe der Schwingungspaketsteuerung, was eine

Regelung von 0-100% ermöglicht. Abbildung 17 zeigt den verwendeten Baustein. (Conrad, 2018)



Abbildung 17: Kemo M204 230V/AC (Conrad, 2018)

3.3 Sondenschaft

Die von Dantec mitgelieferten Sondenschaft sind in Abbildung 18 dargestellt. Diese sind für den Einsatz in der Turbine zum einen zu kurz und zum anderen bieten sie keine axiale Sicherung des Sondenkopfs. Daher war es notwendig, einen längeren Sondenschaft zu konstruieren, der über eine solche axiale Sicherung verfügt.



Abbildung 18: Sondenschaft Dantec

Der neu konstruierte Schaft hat nicht nur den Vorteil, dass er länger ist, er kann auch von einem passenden Schutzrohr umgeben werden, was ein einfaches Einführen in den Prüfstand ermöglicht, ohne die Sonde selbst zu beschädigen. Dazu wird das Schutzrohr über den Schaft samt Sonde gegeben. Nachdem sich die Sonde an der gewünschten Position befindet, kann das Schutzrohr zurückgezogen werden und die Sonde steht frei in der Strömung.

Der Schaft selbst besteht aus einem Rohr mit 10 mm Außendurchmesser und einer Wandstärke von 2 mm. Am vorderen Ende ist ein M9x10 Gewinde gedreht worden. Das Gegenstück, die Verschlusskappe, besitzt ebenfalls ein M9x10 Gewinde, welches innen am Auslauf des Gewindes, eine Fase besitzt. In diesen Freiraum wird ein O-Ring gegeben. Wird die Verschlusskappe angeschraubt, wird der O-Ring gequetscht und auf die Sonde gedrückt, was dazu führt, dass die Sonde in axialer Richtung befestigt wird.

Am Ende des Sondenschafts ist ein Quader angebracht, welcher als Positionsreferenz für die Messung und Kalibrierung dient. Dieser Quader wird, nachdem die Sonde bei der Kalibrierung in der Strömung platziert wurde, möglichst horizontal ausgerichtet und mit der Feststellschraube am Sondenschaft fixiert. Bei der Messung in der Turbine wird der Quader erneut horizontal ausgerichtet, was eine korrekte Positionierung entsprechend der Kalibrierung ermöglicht.

Der neu gefertigte Sondenschaft samt Quader und Verschlusskappe ist in Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 19: neu gefertigter Sondenschaft

3.4 Sondenhalter

Die oben angeführte Konstruktion des Sondenschaftes hat zur Folge, dass die mitgelieferte Halterung des Kalibrierkanals nicht mehr groß genug ist, da sie nur eine 6 mm Bohrung besitzt. Zur genauen Messung ist es jedoch notwendig, die Kalibrierung mit dem bei der Messung eingesetzten Schaft inklusive Positionsreferenz zu kalibrieren. Daher musste eine neue Halterung konstruiert werden. Abbildung 20 zeigt die konstruierte Halterung des Sondenschaftes.

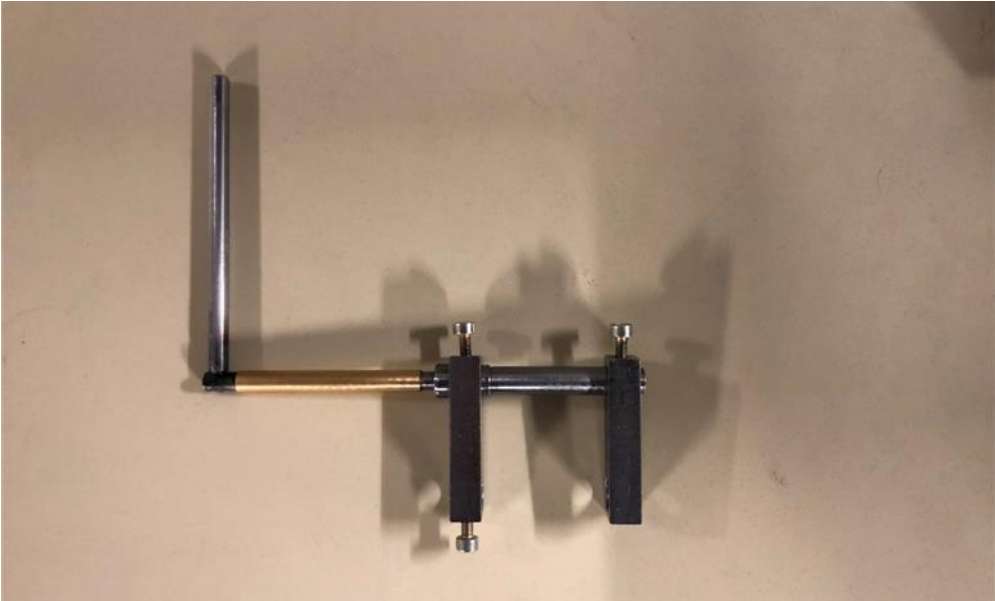


Abbildung 20: Sondenhalterung

4 Software zur Kalibrierung, Messung und Auswertung

Neben der Hardware, welche in Kapitel 3 genauer beschrieben wurde, mussten auch Programme zur Kalibrierung und Messung neu geschrieben werden. Diese Programme zur Auswertung der Kalibrierung und Messung wurden in Matlab programmiert, die Programme zur Durchführung der Messung und der Kalibrierung wurden in Labview erstellt. Zuletzt wurde noch ein weiteres Programm in Matlab programmiert, welches die instationäre Auswertung der Geschwindigkeitsdaten durchführt.

4.1 Programm zur Kalibrierung

Das Programm zur Durchführung der Kalibrierung, welches unter dem Namen „Final_Kalibrierung.vi“ zu finden ist, zeichnet alle Parameter auf, welche zur Auswertung der Kalibrierung benötigt werden. Dazu zählen unter anderem der statische Druck, die Totaltemperatur, Pitch- und Yaw-Winkel und die drei Spannungssignale. Eine genauere Beschreibung der verarbeiteten Vis ist in Anhang 2 zu finden.

Der Ablauf des Programms wird in Abbildung 21 gezeigt. Die Inputs, welche das Programm benötigt, sind blau dargestellt, die Outputs mit grüner Farbe.

Am Anfang des Programms steht die Initialisierung. In diesem Schritt wird der Kontakt zum CTA-System aufgebaut. Nachdem der Kontakt hergestellt wurde, erfolgt die Eingabe der Parameter. Diese Parameter müssen von Hand eingegeben werden und definieren die verschiedenen Einstellungen, welche das Programm in den nachfolgenden Schritten tätigt. Während der Eingabe der Parameter werden diese regelmäßig überprüft. Sollte sich ein eingegebener Parameter nicht in den vorgeschriebenen Schranken befinden, wird dies im Textfeld am oberen Rand der Eingabefläche angezeigt und durch einen Standardwert ersetzt. Dies dient vor allem zum Schutz der Sonde bei falsch eingegebenen Parametern.

Werden die Parameter als korrekt empfunden, beginnt das Programm, nach dem Erteilen des Befehls, die Daten einzulesen. Die Daten beinhalten die Widerstände, welche zur Kalibrierung und Messung notwendig sind sowie die notwendigen SC- und CTA-Parameter. Die SC- und CTA-Parameter beinhalten unter anderem die Länge des Kabels für die Kabelkompensation, die Filtereinstellungen sowie die Einstellungen des AD-Wandlers und der SC-Einheit. In den folgenden zwei Schritten werden diese Parameter an das CTA-System übergeben und eingestellt.

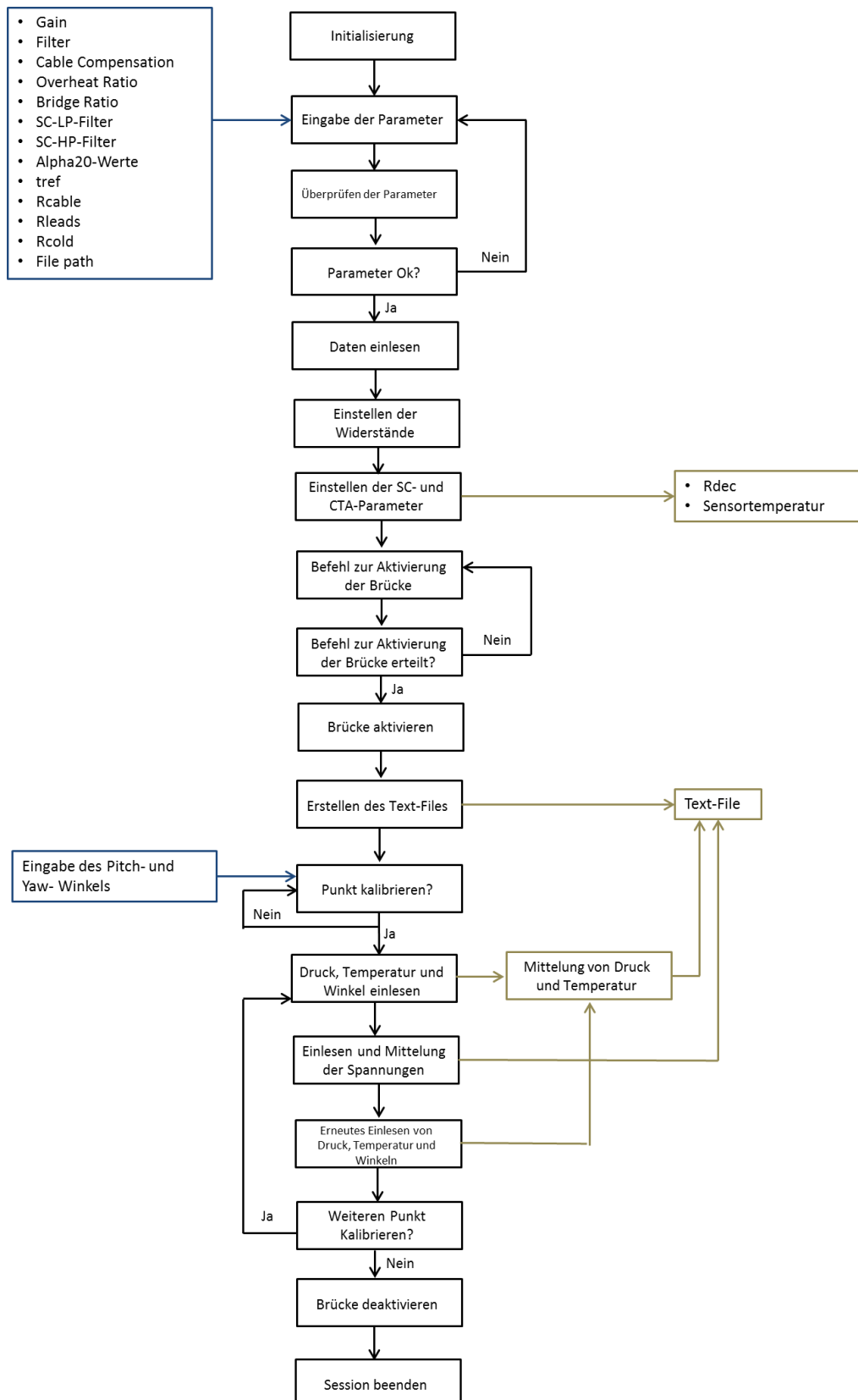


Abbildung 21: Ablauf Programm Kalibrierung

Nach der Durchführung der Widerstandseinstellung und der SC- und CTA-Parameter Einstellung benötigt das Programm den Befehl zur Aktivierung der Brücke. Bevor die Brücke aktiviert wird, ist an der Ausgabe des Programms zu überprüfen, ob die eingestellten

Widerstände R_{dec} jenen der Hardwarekonfiguration entsprechen. Sollte dies der Fall sein, kann die Brücke aktiviert werden.

Das Aktivieren der Brücke leitet den Stromkreis über die Brücke. Kurz bevor der erste Punkt kalibriert werden kann, wird das Text-File mit dem Header automatisch erstellt. Die dann ermittelten Kalibrierdaten werden unter diesen Header ins Text-File geschrieben.

Nach der Erstellung des Text-Files wartet das Programm auf den Befehl, die Kalibrierdaten für einen Punkt aufzunehmen. Bevor dieser Befehl erteilt wird, müssen noch die Winkelstellungen des Kalibrierkanals eingegeben werden.

Nach der Erteilung des Befehls misst das Programm als erstes die Totaltemperatur, den statische Druck und die vom Kalibrierkanal eingestellte Geschwindigkeit. Danach werden die Spannungen der drei Sensoren eingelesen und zum Schluss wird erneut die Totaltemperatur, der statische Druck und die Geschwindigkeit ermittelt. Bevor die Größen statischer Druck, Totaltemperatur und die Geschwindigkeit in das Textfile geschrieben werden, werden diese noch gemittelt.

Nachdem die Daten ins Text-File geschrieben wurden, wartet das Programm auf weitere Befehle. Zur Auswahl stehen das Programm zu beenden oder einen weiteren Punkt zu kalibrieren. Beim Befehl einen weiteren Punkt zu kalibrieren führt das Programm die vier zuvor durchgeführten Schritte erneut aus, siehe Abbildung 21. Wird der Befehl „Kalibrierung beenden“ ausgeführt, wird die Brücke automatisch deaktiviert und die Session beendet.

4.2 Programm zur Auswertung der Kalibrierdaten

Die Daten, welche bei der Kalibrierung mit dem Programm aus Kapitel 4.1 aufgenommen bzw. gemessen wurden, müssen im Folgenden mit dem Programm „Kalibrierprogramm.m“ ausgewertet werden. Dazu wurde in Matlab ein Programm programmiert, das zum einen bei der Geschwindigkeitskalibrierung einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Spannung herstellt und zum anderen bei der Winkelkalibrierung einen Zusammenhang zwischen der Winkelstellung und der Spannung ermittelt. Der genaue Ablauf der Durchführung der Kalibrierung wird im Kapitel 5 erklärt. Der Matlabe-Code ist in Anhang 4 angehängt.

Die Schritte, welche zur Auswertung der Kalibrierung notwendig sind, lassen sich grob wie folgt einteilen:

- Einlesen der Kalibrierdaten und Eingabe relevanter Werte in die Benutzeroberfläche
- Trennung der Werte von Geschwindigkeits- und Winkelkalibrierung
- Geschwindigkeitskalibrierung
 - Berechnung der statischen Temperatur
 - Berechnung von Dichte und Massenstromdichte
 - Berechnung der Drahttemperatur
 - Fehlerkorrektur aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen
 - Berechnen des Polynoms der Geschwindigkeitskalibrierung
 - Berechnen der Geschwindigkeit U_{cal} und des relativen Fehlers
 - Plotten des Vergleichs der Geschwindigkeiten U_{cal} und des relativen Fehlers
- Winkelkalibrierung

- Berechnen der durchschnittlichen Geschwindigkeit bei der Winkelkalibrierung
- Berechnen der Geschwindigkeit im Sondenkoordinatensystem
- Umrechnen der Geschwindigkeit ins Sensorkoordinatensystem
- Berechnen der statischen Temperatur und Dichte
- Fehlerkorrektur aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen
- Berechnen der Massenstromdichte aus den Spannungen und Ermittlung der daraus resultierenden Geschwindigkeit
- Berechnen der Pitch- und Yaw-Faktoren sowie der Winkelwerte mittels multipler nichtlinearer Regression
- Berechnung der Geschwindigkeit durch die im Punkt vorher berechneten Größen
- Ermittlung des Fehlers
- Plotten des Fehlers und des Fittings der Winkelkalibration
- Ausgabe der berechneten Werte in einem Text-File
- Optionale Speicherung der Plots

4.2.1 Einlesen der Kalibrierdaten und Eingabe relevanter Werte in die Benutzeroberfläche

Im ersten Schritt werden die Daten aus der Kalibrierung eingelesen. Diese Daten werden automatisch in der richtigen Struktur vom Programm zur Kalibrierung aus Kapitel 4.1 ausgegeben. Dabei müssen die Daten der Winkel- und Geschwindigkeitskalibrierung in einem Text-File abgespeichert werden. Zusätzlich müssen die Transformationsmatrix, die alpha20-Werte und die Referenztemperatur direkt in der Benutzeroberfläche eingegeben werden. Die alpha20-Werte sind am Deckel der Sensorverpackung zu finden, die Referenztemperaturen sind in der Hardwarekonfiguration ersichtlich, und die Transformationsmatrix kann aus der Datenbank der StreamWare Pro Software entnommen werden.

4.2.2 Trennung der Werte von Geschwindigkeits- und Winkelkalibrierung

Danach werden die Werte der Winkelkalibrierung und der Geschwindigkeitskalibrierung getrennt. Dies geschieht durch die Werte der beiden Winkel. Haben der Pitch-Angle und der Yaw-Angle einen Wert von Null, werden diese Werte der Geschwindigkeitskalibrierung zugewiesen, weisen die beiden Winkel andere Werte auf, werden diese der Winkelkalibrierung zugeteilt.

4.2.3 Geschwindigkeitskalibrierung

Zuerst wird die Geschwindigkeitskalibrierung durchgeführt, da deren Output für die Winkelkalibrierung relevant ist. Der Output der Geschwindigkeitskalibrierung sind Koeffizienten eines Polynoms n-ter Ordnung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Polynome

fünfter Ordnung verwendet. Das Vorgehen zur Ermittlung der Koeffizienten wird im Folgenden beschrieben.

4.2.3.1 Berechnen der statischen Temperatur

Da der Kalibrierkanal die Totaltemperatur aufzeichnet, muss zuerst die statische Temperatur berechnet werden. Die Berechnung der Temperatur erfolgt durch Gleichung 4.1:

$$T_{stat} = T_{tot} - \frac{c^2}{2c_p} \quad (4.1)$$

In Gleichung 4.1 fällt auf, dass die spezifische Wärmekapazität c_p mit der statischen Temperatur variiert und somit iterativ gelöst werden muss. Die Schleife, welche die Temperatur iterativ löst, bricht bei einem Fehler der kleiner als 0,00001 ist automatisch ab.

4.2.3.2 Berechnung von Dichte und Massenstromdichte

Nachdem die statische Temperatur berechnet wurde, ist es möglich, die Dichte und die Massenstromdichte zu berechnen. Die Dichte wird mit der Idealgasgleichung ermittelt, siehe Gleichung 4.2:

$$\rho = \frac{p}{R_{Luft} * T_{stat}} \quad (4.2)$$

Mit der aus Gleichung 4.2 berechneten Dichte und der Geschwindigkeit, welche bei der Kalibrierung aufgezeichnet wurde, lässt sich anschließend die Massenstromdichte berechnen.

$$MSD = \rho * c \quad (4.3)$$

4.2.3.3 Berechnung der Drahttemperatur

Um den Fehler zu korrigieren, welcher bei der Messung bei unterschiedlichen statischen Temperaturen auftritt, ist es notwendig, die Temperatur des Drahtes zu kennen. Um diese Temperatur zu ermitteln, muss im ersten Schritt der Alpha-Wert bei Referenztemperatur bestimmt werden. Dieser errechnet sich aus dem α_{20} -Wert und der Referenztemperatur. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$\alpha_{Ref} = \frac{\alpha_{20}}{1 + \alpha_{20} * (T_{Ref} - 20)} \quad (4.4)$$

Daraus folgend kann die Drahttemperatur bestimmt werden:

$$T_W = \frac{a}{\alpha_{Ref}} + T_{Ref} \quad (4.5)$$

4.2.3.4 Fehlerkorrektur aufgrund von variierenden Temperaturen

Treten Temperaturen auf, welche nicht der Referenztemperatur der Hardwarekonfiguration entsprechen, verursachen diese Fehler bei der Messung und der Kalibrierung. Um den Fehler möglichst klein zu halten, können die Spannungen analytisch mit Gleichung 4.6 korrigiert werden. (Bruun, 1995)

$$E_{corr} = E * \left(\frac{T_W - T_a}{T_W - T_{Ref}} \right)^{0,5} \quad (4.6)$$

4.2.3.5 Berechnen des Polynoms der Geschwindigkeitskalibrierung

Die Berechnung des Polynoms der Geschwindigkeitskalibrierung erfolgt mit der Matlabfunktion „polyfit“. Diese Funktion legt ein Polynom gewünschter Ordnung durch eine Anzahl vorgegebener Punkte. Das Ergebnis der Funktion sind die Koeffizienten, welche wie folgt anzuordnen sind: (Matlab, 2018)

$$P(x) = p_1x^n + p_2x^{n-2} + \dots + p_nx + p_{n+1} \quad (4.7)$$

Zur Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Messung wird nicht mittels Geschwindigkeit, sondern mittels Massenstromdichte kalibriert. Das Programm bestimmt somit die Koeffizienten des Polynoms von Gleichung 4.8.

$$MSD = p_6 + p_5 * E + p_4 * E^2 + p_3 * E^3 + p_2 * E^4 + p_1 * E^5 \quad (4.8)$$

4.2.3.6 Berechnen der Geschwindigkeit U_{cal} und des relativen Fehlers

Um Aufschluss über die Qualität der Kalibrierung zu erhalten, wurden die Geschwindigkeit U_{cal} berechnet und mit der im Kalibriergerät eingestellten Geschwindigkeit in jedem Kalibrierpunkt verglichen. Zusätzlich wurde der relative Fehler bestimmt.

Zur Ermittlung der berechneten Geschwindigkeit U_{cal} für jeden der drei Sensoren wurden die Spannungen der drei Sensoren von jedem Kalibrierpunkt mit den entsprechenden Koeffizienten in das Polynom aus Kapitel 4.2.3.5 eingesetzt.

Zur Ermittlung des relativen Fehlers wurde im ersten Schritt die Differenz zwischen der berechneten Geschwindigkeit und jener Geschwindigkeit, welche tatsächlich im Kalibrierkanal eingestellt wurde, gebildet. Im zweiten Schritt wurde diese Differenz durch die tatsächlich eingestellte Geschwindigkeit im Kalibrierkanal dividiert.

4.2.3.7 Plotten des Vergleichs der Geschwindigkeiten U_{cal} und des relativen Fehlers

Die Auswertung der Geschwindigkeitskalibrierung wird durch die Ausgabe des Vergleichs der Geschwindigkeiten U_{cal} sowie der Ausgabe des relativen Fehlers in einem Diagramm dargestellt.

Beispielhaft wird in Abbildung 22 das Diagramm des Vergleichs der beiden Geschwindigkeiten U_{cal} sowie die Ausgabe des relativen Fehlers in Abbildung 23 gezeigt.

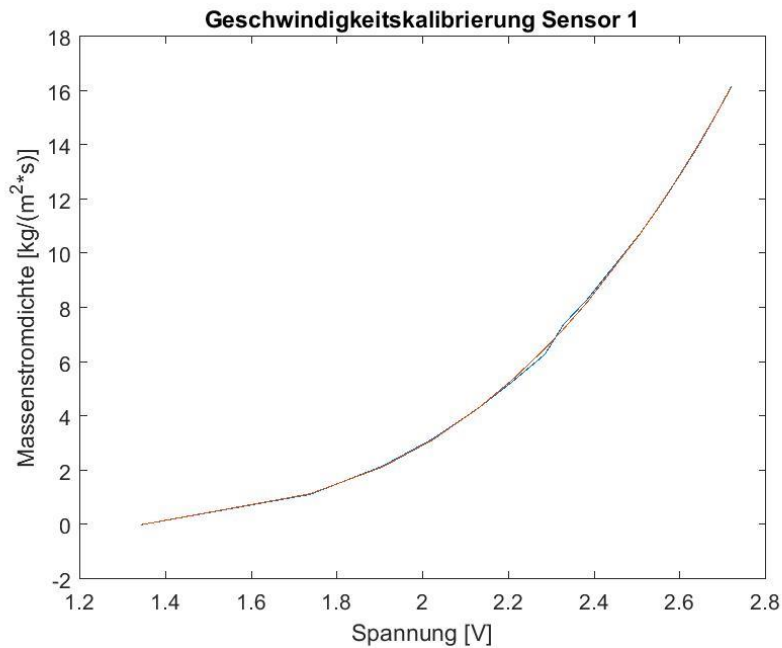


Abbildung 22: Plot des Vergleichs der Geschwindigkeiten U_{cal} für den Sensor 1

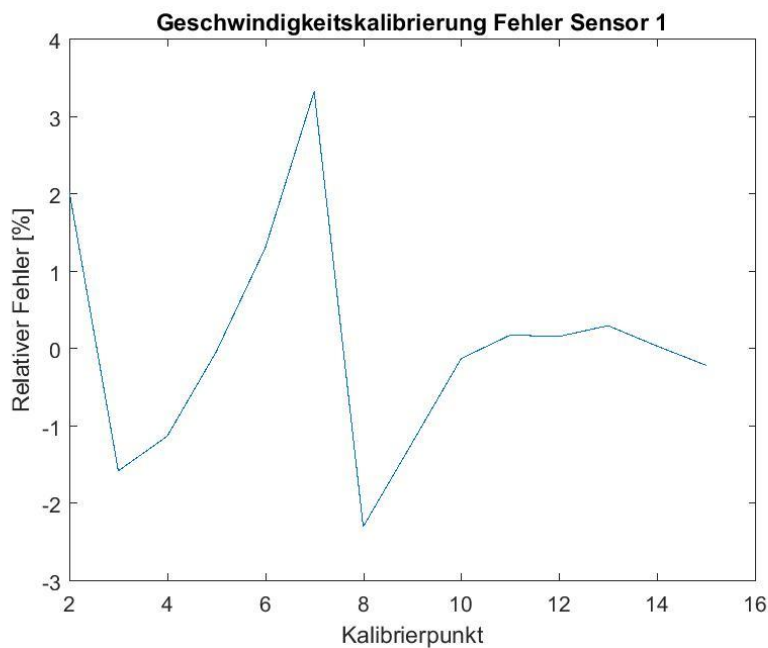


Abbildung 23: Plot des relativen Fehlers für den Sensor 1

4.2.4 Winkelkalibrierung

Nachdem die Geschwindigkeitskalibrierung ausgewertet wurde, ist es möglich, die Berechnungen zur Winkelkalibrierung durchzuführen. Durch die Positionierung der Sensoren mit verschiedenen Winkelstellungen in der Strömung kann ein Zusammenhang zwischen Winkeln und Spannungen erstellt werden. Die genaue Berechnungen und der dazugehörige Formalismus wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

4.2.4.1 Berechnen der durchschnittlichen Geschwindigkeit bei der Winkelkalibrierung

Um den Einfluss von unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu eliminieren, basiert die Berechnung der Winkelkalibrierung auf einer konstanten Geschwindigkeit. Da die im Kalibrierkanal eingestellte Geschwindigkeit jedoch leicht schwankt, entsteht ein kleiner Fehler, welcher akzeptiert werden muss. Im Programm wird, um den Fehler möglichst klein zu halten, die konstante Geschwindigkeit durch Mittelung aller Geschwindigkeiten der Kalibrierpunkte berechnet.

4.2.4.2 Berechnen der Geschwindigkeit im Sondenkoordinatensystem

Als nächstes muss die zuvor berechnete konstante Geschwindigkeit ins Sondenkoordinatensystem umgerechnet werden. Dies geschieht durch Anwendung der Gleichungen 4.9 bis 4.11: (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$U_{Sonde1} = U_{const} * \cos(\theta) \quad (4.9)$$

$$U_{Sonde2} = U_{const} * \sin(\theta) * \cos(\phi) \quad (4.10)$$

$$U_{Sonde3} = U_{const} * \sin(\theta) * \sin(\phi) \quad (4.11)$$

4.2.4.3 Umrechnen der Geschwindigkeit ins Sensorkoordinatensystem

Im nächsten Schritt können die Geschwindigkeiten, welche in Kapitel 4.2.4.2 ermittelt wurden, ins Sensorkoordinatensystem umgerechnet werden. Der allgemeine Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten im Sonden- und Sensorkoordinatensystem ist in Gleichung 4.12 dargestellt. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$\vec{U}_{Sonde} = \mathbf{X} * \vec{U}_{Sensor} \quad (4.12)$$

Die Berechnung der Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem erfolgt durch Invertieren der Transformationsmatrix \mathbf{X} . Die Transformationsmatrix \mathbf{X} variiert von Sensor zu Sensor und wird vom Hersteller bereitgestellt.

$$\vec{U}_{Sensor} = \mathbf{X}^{-1} * \vec{U}_{Probe} \quad (4.13)$$

4.2.4.4 Berechnung der statischen Temperatur und Dichte sowie Fehlerkorrektur aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen

Die Berechnung der statischen Temperatur und der Dichte erfolgt nach dem Formalismus, welcher bereits in Kapitel 4.2.3.1 und 4.2.3.2 vorgestellt wurde. Die Temperaturkorrektur wurde in Kapitel 4.2.3.4 erläutert.

4.2.4.5 Berechnen der Massenstromdichte aus den Spannungen und Ermittlung der daraus resultierenden Geschwindigkeit

Da die Polynome der Geschwindigkeitskalibrierung zur Berechnung der Massenstromdichte bestimmt wurden, muss zur Ermittlung der Geschwindigkeit der Umweg über diese genommen werden. Dazu werden zuerst die Spannungen in die Polynome wie folgt eingesetzt: (Matlab, 2018)

$$MSD = p_6 + p_5 * E + p_4 * E^2 + p_3 * E^3 + p_2 * E^4 + p_1 * E^5 \quad (4.8)$$

Die Geschwindigkeit daraus wird durch die Division der Massenstromdichte durch die Dichte bestimmt.

$$U_{cal} = \frac{MSD}{\rho} \quad (4.14)$$

4.2.4.6 Berechnen der Pitch- und Yaw-Faktoren sowie der Winkelwerte mittels multipler nichtlinearer Regression

Aus den zuvor gezeigten Berechnungen wurden die Kalibriergeschwindigkeit U_{cal} und die Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem bestimmt. Zwischen diesen beiden Geschwindigkeiten gibt es einen Zusammenhang, welcher in Kapitel 2.5 bereits erwähnt wurde. Durch Umformen ergibt sich folgendes Modell für die Sensoren: (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$U_{cal1}^2 = \frac{k_1^2}{(1 + k_1^2 + h_1^2) * \cos^2(\alpha_1)} * U_{Sensor1}^2 + \frac{1}{(1 + k_1^2 + h_1^2) * \cos^2(\alpha_1)} * U_{Sensor2}^2 + \frac{h_1^2}{(1 + k_1^2 + h_1^2) * \cos^2(\alpha_1)} * U_{Sensor3}^2 \quad (4.15a)$$

$$U_{cal2}^2 = \frac{h_2^2}{(1 + k_2^2 + h_2^2) * \cos^2(\alpha_2)} * U_{Sensor1}^2 + \frac{k_2^2}{(1 + k_2^2 + h_2^2) * \cos^2(\alpha_2)} * U_{Sensor2}^2 + \frac{1}{(1 + k_2^2 + h_2^2) * \cos^2(\alpha_2)} * U_{Sensor3}^2 \quad (4.15b)$$

$$U_{cal3}^2 = \frac{1}{(1 + k_3^2 + h_3^2) * \cos^2(\alpha_3)} * U_{Sensor1}^2 + \frac{h_3^2}{(1 + k_3^2 + h_3^2) * \cos^2(\alpha_3)} * U_{Sensor2}^2 + \frac{k_3^2}{(1 + k_3^2 + h_3^2) * \cos^2(\alpha_3)} * U_{Sensor3}^2 \quad (4.15c)$$

Das Regressionsmodell optimiert die drei Werte h_i , k_i und α_i dahingehend, dass die Gleichungen für die vier Geschwindigkeiten möglichst optimal erfüllt sind. Diese Optimierung wird für jede der drei Gleichungen getrennt durchgeführt.

4.2.4.7 Berechnung der Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem durch die im Punkt vorher berechneten Größen

Zur Überprüfung der Berechnung mittels multipler nichtlinearer Regression werden die Geschwindigkeiten im Sensorkoordinatensystem miteinander verglichen. Dazu muss die Kalibrierungsgeschwindigkeit U_{cal} ins Sensorkoordinatensystem umgerechnet werden. Zuerst muss dazu die effektive Geschwindigkeit U_{eff} bestimmt werden: (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$U_{eff1} = U_{cal1} * (1 + k_1^2 + h_1^2)^{0,5} * \cos(\alpha_1) \quad (4.16a)$$

$$U_{eff2} = U_{cal2} * (1 + k_2^2 + h_2^2)^{0,5} * \cos(\alpha_2) \quad (4.16b)$$

$$U_{eff3} = U_{cal3} * (1 + k_3^2 + h_3^2)^{0,5} * \cos(\alpha_3) \quad (4.16c)$$

Die Bestimmung der Geschwindigkeit in Sensorkoordinaten erfolgt durch die Lösung des folgenden Gleichungssystems:

$$\begin{bmatrix} U_{eff1}^2 \\ U_{eff2}^2 \\ U_{eff3}^2 \end{bmatrix} = K * \begin{bmatrix} U_{Sensor1}^2 \\ U_{Sensor2}^2 \\ U_{Sensor3}^2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Wobei k wie folgt dargestellt wird.

$$K = \begin{bmatrix} k_1^2 & 1 & h_1^2 \\ h_2^2 & k_2^2 & 1 \\ 1 & h_3^2 & k_3^2 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

4.2.4.8 Ermittlung des Fehlers

Der Fehler wird durch Bildung der Differenz der beiden Geschwindigkeiten im Sensorkoordinatensystem bestimmt. Dabei ist jene Geschwindigkeit, welche durch U_{const} ermittelt wurde, als die richtige anzusehen. Durch diese Annahme kann auch der relative Fehler bestimmt werden, indem die Differenz durch diese Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem dividiert wird.

4.2.4.9 Plotten des Fehlers und des Fittings der Winkelkalibration

Zur Auswertung der Winkelkalibration ist eine visuelle Darstellung des Fittings und des Fehlers notwendig. Dies wird in Matlab mit der Plot-Funktion ausgeführt. Beispielhaft ist in Abbildung 24 der Fehler und das Fitting für den Sensor 2 dargestellt. Die Grafiken werden automatisch nach der Berechnung angezeigt.

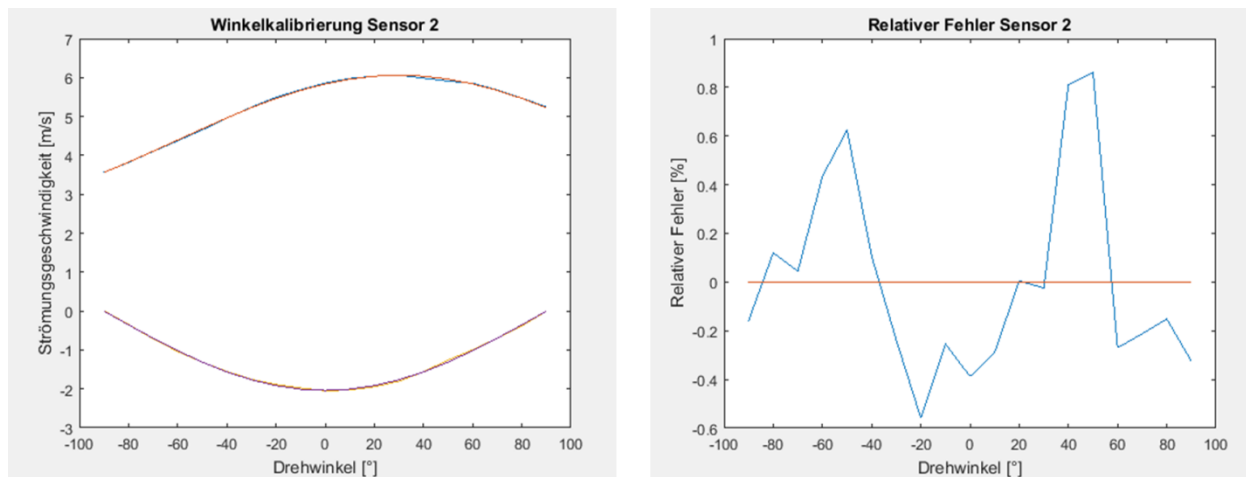


Abbildung 24: Fehler und Fitting der Winkelkalibration

4.2.4.10 Ausgabe der berechneten Werte in einem Text-File und optionale Speicherung der Grafiken

Zuletzt werden die berechneten Werte in einem Text-File ausgegeben. Das ausgegebene Text-File dient als Input für das Programm zur Umrechnung der Spannung in die Geschwindigkeit.

Zusätzlich können die erstellten Abbildungen optional auch abgespeichert werden. Dazu müssen nur die Prozentzeichen vor dem dazugehörigen Befehl entfernt werden.

4.3 Programm zur Messung

Das Programm zur Messung, welches unter dem Namen „Final_Lufferhitzer.vi zu finden ist, zeichnet alle notwendigen Größen auf, um mit dem Matlab-Programm „Auswertung der Messdaten“ aus Kapitel 4.4 die drei Geschwindigkeitskomponenten aus den drei Spannungssignalen berechnen zu können. Dazu zählen die Spannungen selbst, der Druck, die Temperatur, ein oder mehrere Triggersignale und ein oder mehrere Positionsvariablen. Eine genauere Beschreibung der Vis ist in Anhang 3 angehängt.

In Abbildung 25 sind wiederum die Inputs mit blauer Farbe gekennzeichnet, die Outputs mit grüner Farbe.

Zu Beginn muss das Programm, wie in Kapitel 4.1, initialisiert werden, um Kontakt mit dem CTA-System herstellen zu können. Im darauffolgenden Schritt erfolgt wieder die Eingabe der Parameter. Im Vergleich zum Programm aus Kapitel 4.1 enthält der Schritt „Eingabe der Parameter“ in diesem Programm deutlich mehr Inputs. Diese Daten sind für die Messung selbst nicht alle relevant. Relevant sind nur jene Daten, welche auch in Kapitel 4.1 eingegeben wurden. Die restlichen Daten dienen nur zur Information und werden in einem späteren Schritt gesammelt in einem File ausgegeben.

Nach der Eingabe der Parameter werden diese überprüft und ausge bessert, sollte sich einer der Parameter nicht im eingestellten Grenzbereich befinden. Sollte dies der Fall sein, wird dies in der Ausgabe im oberen Bereich der Benutzeroberfläche angezeigt.

Zeigt die Ausgabe im oberen Bereich der Benutzeroberfläche „OK“ an, können die Daten durch den Befehl „Daten einlesen“ vom Programm eingelesen werden. Nach dem Einlesen der Daten werden diese automatisch in ein eigenes Text-File gespeichert. Durch dieses Text-File kann im Nachhinein immer nachvollzogen werden, mit welchen Einstellungen die Messung durchgeführt wurde.

In den nächsten beiden Schritten werden, wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert, die CTA- und SC-Parameter sowie die Widerstände eingestellt. Nachdem diese beiden Schritte durchgeführt wurden, muss der Befehl zur Aktivierung der Brücke und zum Start der Messung erteilt werden. Zuvor sollte jedoch überprüft werden, ob der Decadenwiderstand, R_{dec} , jenem der Hardwarekonfiguration entspricht.

Nach der Aktivierung der Brücke wartet das System auf den Befehl, den Punkt messen zu dürfen. Dieser Befehl erfolgt durch das Drücken des Buttons „Punkt messen“. Danach werden automatisch die Temperatur und die Spannungen eingelesen und zusammen mit dem Druck und den Positionsvariablen in einem Text-File abgespeichert.

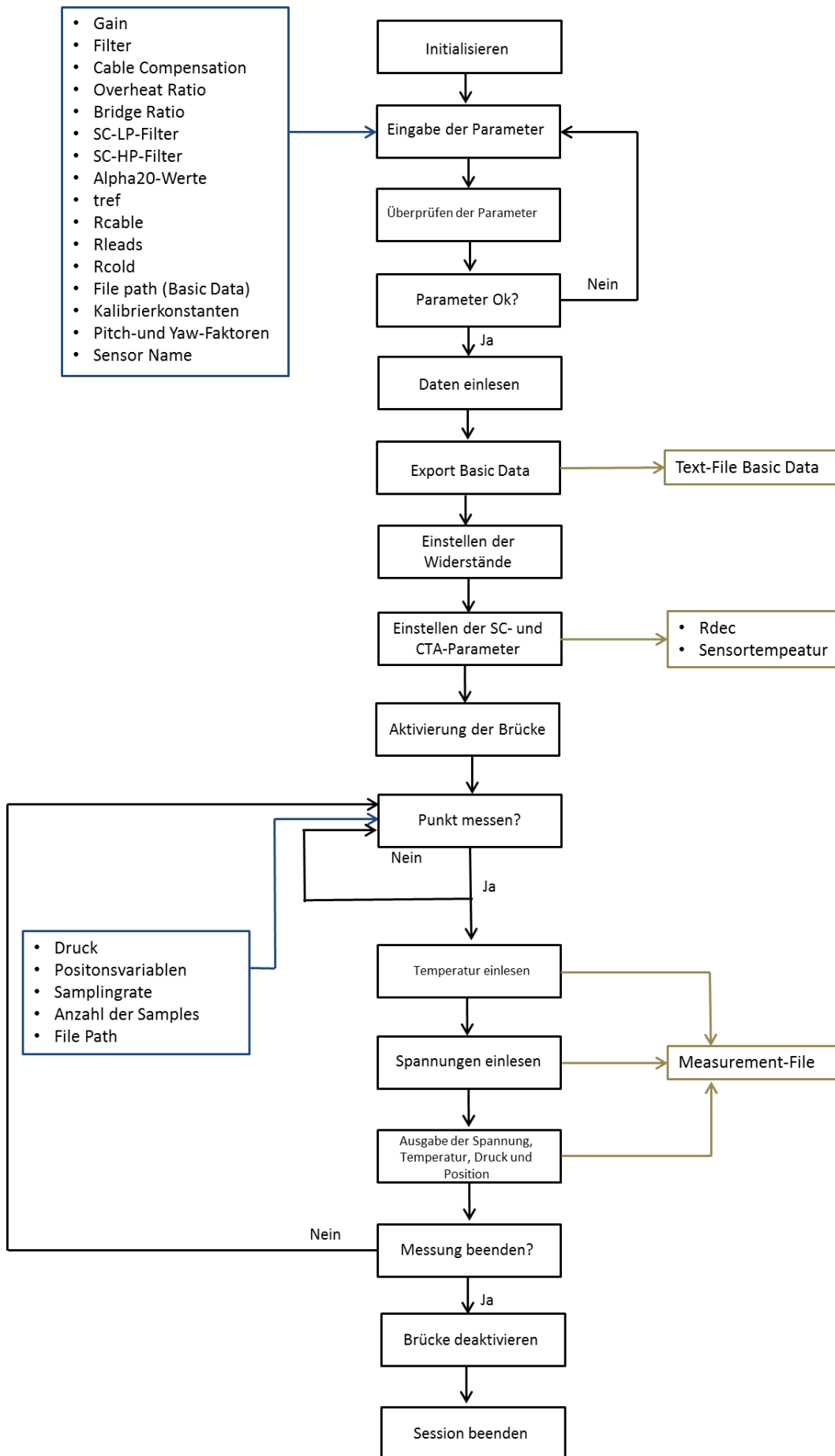


Abbildung 25: Ablauf Programm zur Messung

Zuletzt muss sich der Anwender wieder entscheiden, ob er die Messung beenden oder fortsetzen will. Beim Fortsetzen der Messung werden die zuvor erklärten Schritte, siehe Abbildung 25, erneut durchgeführt. Beim Beenden der Messung wird die Brücke deaktiviert und die Session beendet.

4.4 Programm zur Berechnung der Geschwindigkeit aus den Spannungsdaten

Das Programm zur Berechnung der Geschwindigkeiten aus den Spannungsdaten wurde ebenfalls in Matlab programmiert. Das Programm basiert auf den in Kapitel 2 vorgestellten theoretischen Grundlagen und ist unter dem Namen „Umrechnung_Volt_Geschwindigkeit_Massenstromdichte.m“ abgespeichert. Der Code der Programmierung ist in Anhang 5 zu finden. Zusätzlich müssen Informationen in der Benutzeroberfläche eingegeben bzw. aus den bei der Auswertung der Kalibrierung erstellten Text-Files importiert werden. Zuletzt müssen die errechneten Geschwindigkeitsdaten exportiert werden.

4.4.1 Import der Daten

Das Programm benötigt eine Menge an Daten zur Umrechnung. Dazu wird im ersten Schritt das Text-File aus dem Programm zur Auswertung der Kalibrierung importiert. Dieses Text-File enthält alle Kalibrierkonstanten aus der Geschwindigkeitskalibrierung, Pitch- und Yaw-Faktoren, Referenztemperaturen und α_{20} -Werte.

Zusätzlich müssen in die Benutzeroberfläche noch folgende Daten eingegeben werden:

- Overheat Ratio
- Anzahl der Text-Files

Die Anzahl der Text-Files dient zur Festlegung bis zu welchem Text-File die Auswertung automatisch durchgeführt werden soll.

4.4.2 Berechnung der Kalibriergeschwindigkeit

Die Kalibriergeschwindigkeit U_{cal} der drei Sensoren wird, wie bereits erwähnt, mit dem Polynomansatz berechnet. Dazu muss jedoch der Umweg über die Massenstromdichte gewählt werden.

Die Polynome müssen dazu, wie in Gleichung 4.19 gezeigt, angeordnet werden. Dies ist durch die Definition der Koeffizienten der Matlabfunktion „Polyfit“ begründet. (Matlab, 2018)

$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1} \quad (4.19)$$

Nachdem die Massenstromdichte der drei Sensoren berechnet wurde, kann durch die Division der Dichte die Geschwindigkeit bestimmt werden.

4.4.3 Berechnung der effektiven Geschwindigkeit

Da die Sensoren bei der Kalibrierung in einem bestimmten Winkel zur Strömung stehen, muss die Kalibrierungsgeschwindigkeit korrigiert werden. Diese korrigierte Geschwindigkeit wird U_{eff} genannt und berechnet sich durch Gleichung 4.20. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$U_{effi} = U_{cali} * (1 + k_i + h_i)^{0,5} * \cos(\alpha_i) \quad (4.20)$$

4.4.4 Berechnung der Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem

Als nächstes kann die Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem berechnet werden. Das Gleichungssystem, das dazu aufgestellt werden muss, ist in Kapitel 2.5 zu finden. Gelöst wird dieses Gleichungssystem durch das Invertieren der entsprechenden Matrix. Matlab stellt dazu Funktionen bereit, die sehr einfach angewendet werden können.

4.4.5 Berechnung der Geschwindigkeit im Sondenkoordinatensystem

Die Berechnung der Geschwindigkeit im Sondenkoordinatensystem erfolgt durch die Multiplikation der Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem mit einer Transformationsmatrix. Diese Transformationsmatrix ist in Gleichung 4.21 gegeben: (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$T = \begin{bmatrix} 0,57735 & 0,57735 & 0,57735 \\ 0,707107 & -0,707107 & 6,12323 * 10^{-17} \\ 0,40824 & 0,40824 & -0,816496 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

4.4.6 Berechnung der Geschwindigkeit im Laborkoordinatensystem

Optional kann noch eine Transformation der Geschwindigkeit in ein anderes Koordinatensystem vorgenommen werden. Eine Drehung um den Pitch-Angle kann durch Multiplikation der Geschwindigkeiten mit der in Gleichung 4.22 angegebenen Matrix durchgeführt werden, eine Rotation um den Roll-Angle durch die Matrix R aus Gleichung 4.23. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$P = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

4.4.7 Export der Geschwindigkeitsdaten

Im letzten Schritt werden die errechneten Daten exportiert. Der Name der Daten kann dabei beliebig durch die Variable „Name“ gewählt werden. Hinter dem Namen wird eine Laufvariable (bei eins beginnend) angehängt.

4.5 Programm zur instationären Auswertung

Nachdem die drei Geschwindigkeitskomponenten U, V und W berechnet wurden, können diese Geschwindigkeitsdaten zeitaufgelöst ausgewertet werden. Dazu wurde ein weiteres Programm in Matlab programmiert, welches den Output des Programms aus Kapitel 4.4 verarbeitet. Der Code der Programmierung ist in Anhang 9 beigelegt. Das Programm ist unter dem Namen „Instationaere_Auswertung.m“ zu finden. Grob lässt sich das Programm zur instationären Auswertung in folgende Bereiche unterteilen:

- Input der Geschwindigkeitsdaten
- Berechnen des Zeitpunktes des Triggerdurchgangs
- Unterteilung einer Umdrehung in n Samples
- Resampling der Geschwindigkeiten
- Schaffung gleicher zeitlicher Bezugsgrundlage
- Berechnung der statistischen Größen
- Ausgabe der Ergebnisse in einem Text-File

4.5.1 Input der Geschwindigkeitsdaten

Im ersten Schritt werden die Geschwindigkeitsdaten, zusammen mit der Zeitspalte und dem Triggersignal, welche als Text-File vorliegen, importiert. Die Daten müssen in jener Form vorliegen, wie sie vom Programm aus Kapitel 4.4 ausgegeben werden.

Zusätzlich zu den Geschwindigkeitsdaten muss noch der Triggerlevel und die Anzahl der Samples, in welche eine Umdrehung unterteilt werden soll, festgelegt werden.

4.5.2 Berechnen des Zeitpunktes des Triggerdurchgangs

Nachdem die Geschwindigkeitsdaten importiert wurden und der Triggerlevel festgelegt wurde, muss der Zeitpunkt errechnet werden, an dem der Triggerlevel von dem entsprechenden Signal überschritten wird. Zur Berechnung dieses Zeitpunktes wird linear interpoliert.

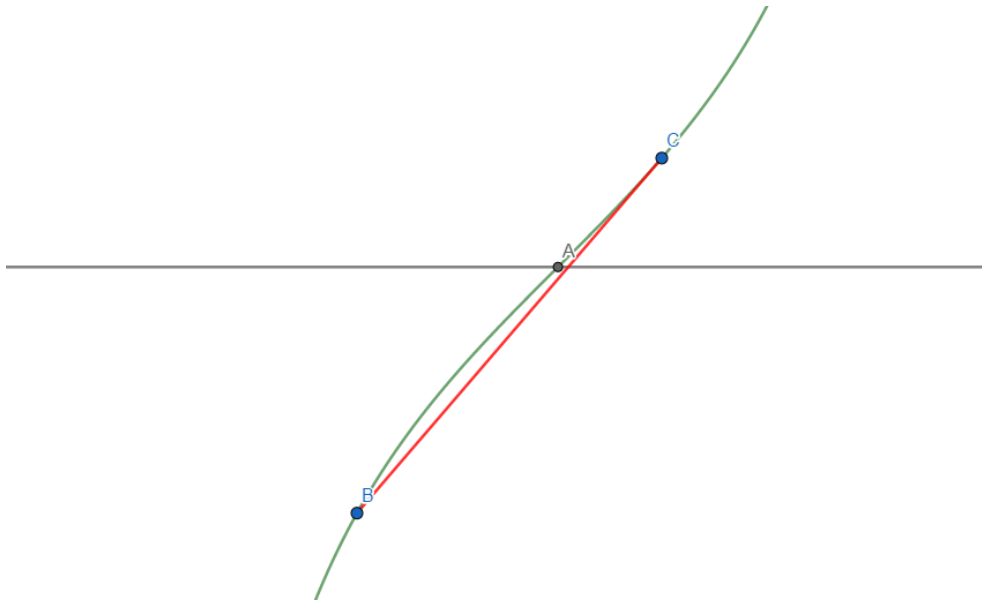


Abbildung 26: Interpolation Triggerlevel

Die Abbildung 26 zeigt die lineare Interpolation des Zeitpunktes, an dem das Triggersignal den Triggerlevel schneidet.

Das Programm sucht dazu jene zwei Zeitpunkte aus den Messdaten heraus, deren Signale des Triggers oberhalb und unterhalb des Triggerlevels liegen. Der Schnittpunkt des Triggersignals mit dem Triggerlevel wird mit Gleichung 4.24 berechnet.

$$T_{\text{Schnittpunkt}} = T_{\text{unterhalb}} + \frac{T_{\text{oberhalb}} - T_{\text{unterhalb}}}{Tr_{\text{oberhalb}} - Tr_{\text{unterhalb}}} * (\text{Triggerlevel} - Tr_{\text{unterhalb}}) \quad (4.24)$$

Tr steht dabei für den Wert des Triggersignal oberhalb bzw. unterhalb und T für die dazugehörigen Zeitpunkte.

Diese Berechnung wird für jeden Punkt durchgeführt, an dem das Triggersignal den Triggerlevel kreuzt. Für die weitere Auswertung ist darauf zu achten, dass das Triggersignal den Triggerlevel immer mit absteigender und aufsteigender Flanke kreuzt. Daher ist nur jeder zweite Punkt für die Auswertung relevant.

Bei dem Lufterhitzer tritt zusätzlich die Besonderheit auf, dass jede Schaufel das Triggersignal erhöht, da eine Reflexionslichtschranke zur Bestimmung des Triggersignals verwendet wurde. Daher wird in diesem Fall der Triggerlevel fünf Mal pro Umdrehung überschritten.

4.5.3 Unterteilung einer Umdrehung in n Samples

Durch die zuvor durchgeführte Berechnung ist bekannt, wann die Umdrehung des Rotors beginnt und wann diese endet. Dieser Zeitbereich wird im Folgenden in n Stützstellen unterteilt. Da die gewählten Stützstellen mit jenen des Messfiles nicht übereinstimmen, müssen die Geschwindigkeiten an diesen Stützstellen neu bestimmt werden. Dieser Vorgang wird Resampling genannt und wird im nächsten Kapitel erklärt.

4.5.4 Resampling der Geschwindigkeiten

Beim Resampling der Geschwindigkeiten werden die Werte der Geschwindigkeitskomponenten U, V und W an den gewählten Stützstellen berechnet. Die Berechnung der Werte an den Stützstellen erfolgt wie zuvor mittels linearer Interpolation, siehe Gleichung 4.24.

Das Programm ermittelt dazu, wie zuvor, die Geschwindigkeiten des oberhalb und unterhalb eines bestimmten Zeitpunkts, welcher durch die Stützstelle gegeben ist, liegenden Zeitschritts und berechnet aus diesen Daten die Geschwindigkeit an der Stützstelle. Diese Berechnung wird für jede Stützstelle und für jede Geschwindigkeitskomponente durchgeführt.

4.5.5 Schaffung gleicher zeitlicher Bezugsgrundlage

Da die Rotordrehzahl von Umdrehung zu Umdrehung leicht variiert, ist es notwendig, eine gemeinsame Bezugsgrundlage für die Zeit zu schaffen. Dazu wird für jede Umdrehung des Rotors ein Multiplikator berechnet. Dieser Multiplikator wird derart ausgelegt, dass die Zeit, welcher der Rotor für eine Umdrehung benötigt, auf eine Sekunde ausgedehnt wird. Für die Berechnung dieses Multiplikators wird Gleichung 4.25 verwendet.

$$\text{Multiplikator} = \frac{1}{\Delta t} \quad (4.25)$$

Dabei repräsentiert Δt jene Zeit, die der Rotor für die Umdrehung benötigt.

Nachdem die Multiplikatoren berechnet wurden, wird jeder Zeitschritt mit dem entsprechenden Multiplikator multipliziert.

4.5.6 Berechnung der statistischen Größen

Für eine weitere Analyse der Daten ist es notwendig, die relevanten statistischen Größen zu ermitteln. Dazu werden im ersten Schritt alle Geschwindigkeiten derselben Geschwindigkeitskomponente mit derselben zeitlichen Bezugsgrundlage zu einem Vektor zusammengefasst.

Für jeden dieser Vektoren kann anschließend der arithmetische Mittelwert sowie das gemittelte Quadrat der Geschwindigkeitsschwankungen berechnet werden.

Gleichungen 4.26a, b und c zeigt die Ermittlung des gemittelten Quadrats der Geschwindigkeit für die drei Geschwindigkeitskomponenten U, V und W. (E.Jorgensen, 2002)

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 \quad (4.26a)$$

$$\overline{v'^2} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 \quad (4.26b)$$

$$\overline{w'^2} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2 \quad (4.26c)$$

4.5.7 Ausgabe der Ergebnisse in einem Text-File

Zuletzt werden die Mittelwerte und die gemittelten Quadrate der Geschwindigkeitsschwankungen in einem Text-File ausgegeben. Mit diesen Daten kann im Anschluss zum Beispiel der Turbulenzgrad bestimmt werden.

5 Kalibrierung

In diesem Kapitel soll genauer auf den Ablauf und die Durchführung der Kalibrierung eingegangen werden. Dazu wird zu Beginn der Aufbau des Kalibriersystems und dessen Inbetriebnahme betrachtet. Danach wird genauer auf die Hardwarekonfiguration, die Geschwindigkeitskalibrierung und die Winkelkalibrierung eingegangen und deren Durchführung erklärt. Zuletzt wird noch der Ablauf der Auswertung in dem dafür geschriebenen Matlab-Programm erläutert.

5.1 Aufbau des Kalibriersystems

Der Aufbau des zur Kalibrierung notwendigen Systems ist in Abbildung 27 dargestellt. Ausgangspunkt für die Kalibrierung ist der Luftmassenstrom, welcher der Hausdruckluft entnommen wird. Die Hausdruckluft wird mit einem Druck von 8 bar bereitgestellt und wird mittels Euronorm Kupplung an das System angeschlossen. Der Durchlauferhitzer benötigt eine Versorgungsspannung von 230V Wechselfspannung. Mit Hilfe der Schwingungspaketsteuerung kann die Leistung des Druckluftherzlers geregelt werden. Die ungefähre Temperatur der ausströmenden Luft kann von der Temperaturanzeige entnommen werden. Die Druckluft durchströmt diesen Druckluftherzler und wird am Ende von diesem in zwei Massenströme aufgeteilt. Einer der Massenströme wird an die Umgebung abgegeben, der andere in den Kalibrierkanal. Der Bypassmassenstrom erfüllt dabei zwei Funktionen. Zum einen dient dieser Massenstrom zur Regelung der Temperatur, zum anderen wird so gewährleistet, dass der Druckluftherzler immer von Luft umströmt wird. Der Massenstrom, welcher in den Kalibrierkanal fließt, wird dort von einer entsprechenden Drossel geregelt, um am Ausgang des Kalibrierkanals die entsprechende Geschwindigkeit bereitstellen zu können. Zusätzlich zur Geschwindigkeit werden auch die Totaltemperatur und der statische Druck im Kalibrierkanal aufgezeichnet.

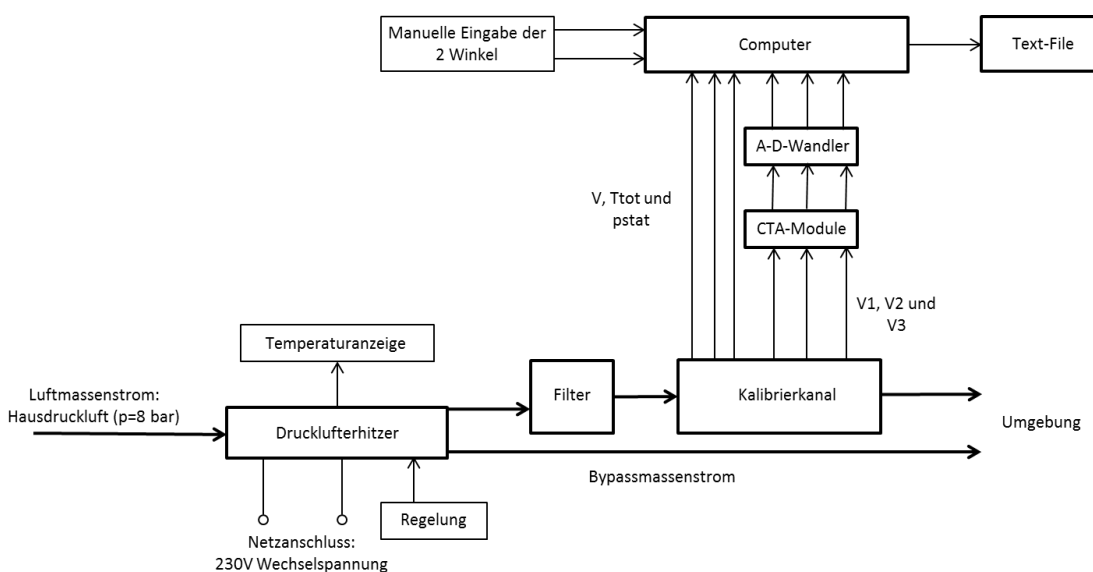


Abbildung 27: Aufbau des Kalibriersystems

Mit Hilfe der Sonde, welche in der entsprechenden Vorrichtung am Ausgang des Kalibrierkanals platziert wird, können die drei Spannungssignale aufgenommen werden. Diese Spannungssignale werden in die CTA-Module geleitet, dort verarbeitet und anschließend im A-D-Wandler in eine digitale Spannung umgewandelt. Der Computer zeichnet Druck, Temperatur, Geschwindigkeit, drei Spannungen und die zwei manuell eingegebenen Winkel auf und gibt diese als Text-File aus.

5.2 Inbetriebnahme des Kalibriersystems

Die Inbetriebnahme des Kalibriersystems besteht aus zwei Schritten. Zuerst müssen die Druckluftanschlüsse und die Versorgungsspannung angeschlossen werden und im zweiten Schritt muss die Sonde in Betrieb genommen werden.

5.2.1 Anschluss der Druckluft und der Versorgungsspannung

Das Kalibriersystem muss über einen Anschluss an die Hausdruckluft verfügen. Die am Institut verfügbare Hausdruckluft weist einen Druck von 8 bar auf, was für das Kalibriersystem absolut ausreichend ist. Die Druckluft wird mit einer Euro-Norm Kupplung an den Druckluftheritzer angeschlossen, siehe Abbildung 28.



Abbildung 28: Anschluss Druckluft an das Kalibriersystem

Nachdem der Luftmassenstrom den Druckluftheritzer durchströmt hat, wird er in zwei Ströme aufgeteilt. Ein Massenstrom wird an die Umgebung abgegeben, der zweite wird weiter in den

Filter und anschließend in den Kalibrierkanal geleitet. Der Anschluss des Luftmassenstroms am Ausgang des Filters an den Kalibrierkanal wird in Abbildung 29 gezeigt.



Abbildung 29: Anschluss Luftmassenstroms an den Kalibrierkanal

Die Inbetriebnahme der elektronischen Bauteile erfolgt durch das Verbinden des Stromkabels, welches aus dem weißen Kasten herausgeführt ist, mit der Netzspannung.

5.2.2 Inbetriebnahme der Sonde

Zuerst wird die Halterung für die Sonde in den Pitch- und Yaw-Manipulator wie in Abbildung 30 ersichtlich eingespannt.



Abbildung 30: Einspannung Sondenhalterung in den Pitch- und Yaw Manipulator

Danach wird der Schaft und die Sonde wie in Abbildung 31 in dem Sondenhalter platziert. Es ist darauf zu achten, dass die Sonde möglichst mittig über der Düse des Kalibrierkanals platziert wird, so, dass sich auch beim Einstellen verschiedener Winkel die Drähte immer in der Strömung befinden.

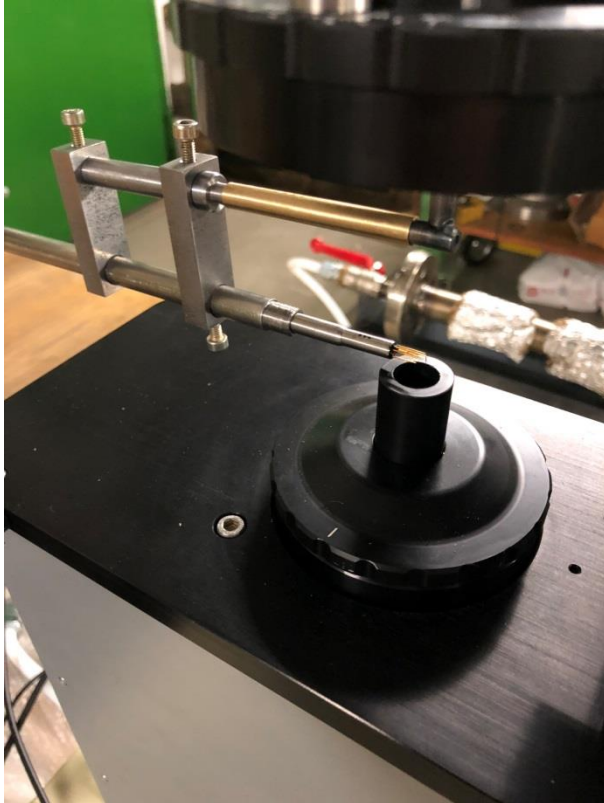


Abbildung 31: Positionierung der Sonde in der Sondenhalterung (Pitch-Angle=0, Yaw-Angle=0)

Nachdem die Sonde entsprechend platziert wurde, kann der viereckige Quader am Ende der Sonde ausgerichtet werden. Dazu wird die Feststellschraube des Quaders geöffnet und dieser mithilfe einer Wasserwaage möglichst waagrecht platziert. Anschließend wird die Feststellschraube erneut befestigt. Die Ausrichtung des Quaders dient zur korrekten Platzierung der Sonde bei der Messung.

Im nächsten Schritt muss die Sonde noch mit CTA-System verbunden werden. Dazu müssen die BNC-Kabel verwendet werden, welche in Abbildung 32 ersichtlich sind. Wichtig an dieser Stelle ist anzumerken, dass immer diese Kabel verwendet werden müssen, da der Widerstand dieser Kabel genau bekannt ist.



Abbildung 32: BNC-Kabel CTA-System

Die Anzahl der Markierungen auf den Tüten, in denen die Kabel verstaut sind, stehen für die Sensornummern eins bis drei. Die Kabel am Ausgang des Schafts der Sonde besitzen ebenfalls Markierungen, welche die Sensornummern repräsentieren. Entsprechend der Markierungen werden die Kabel zuerst am Sondenschaft angeschlossen und danach am CTA-System. Der Anschluss ans CTA-System erfolgt wie in Abbildung 33. Dabei wird das Kabel des Sensors eins ganz links angeschlossen, das Kabel für den Sensor zwei in der Mitte und das Kabel des Sensors 3 rechts.



Abbildung 33: Anschluss BNC-Kabel an das CTA-System

5.3 Durchführung der Kalibrierung

Die Kalibrierung der Sonde erfolgt in drei Schritten:

- Hardwarekonfiguration
- Geschwindigkeitskalibrierung
- Winkelkalibrierung

5.3.1 Hardwarekonfiguration

Um die Widerstände zu ermitteln, mit welchen die Sonde bei der Kalibrierung und bei der Messung betrieben wird, muss zuerst eine Hardwarekonfiguration durchgeführt werden. Die Hardwarekonfiguration wird mit der StreamWare Software durchgeführt, wie in Anhang 1 nachzulesen.

Während des Messens der Widerstände muss im Kalibrierkanal die zu erwartende Temperatur mit der zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeit eingestellt werden.

5.3.1.1 Einstellen der Temperatur im Kalibrierkanal

Bei der Einstellung der Temperatur sind zwei verschiedene Vorgänge zu unterscheiden. Zum Ersten das Einstellen der Temperatur bei kleinen Massenströmen und zum Zweiten das Einstellen der Temperatur bei großen Massenströmen. Die Steuerung des Kalibrierkanals erfolgt mit dem Programm „Automatic Calibrator“, welches von Dantec zur Verfügung gestellt wird.

5.3.1.1.1 Einstellen der Temperatur bei kleinen Massenströmen

Bei kleinen Massenströmen reicht der vorhandene Massenstrom nicht aus, um den Kalibrierkanal auf die gewünschte Temperatur zu erhitzen. Daher ist es zu empfehlen, den Kalibrierkanal zuerst bis zur maximalen Geschwindigkeit zu öffnen. Dadurch wird der Kalibrierkanal aufgeheizt. Sobald die gewünschte Temperatur erreicht wird, kann die Geschwindigkeit auf den gewünschten Wert reduziert werden. Da das System sehr träge ist, bleibt im Anschluss genügend Zeit, um die gewünschten Punkte zu kalibrieren bzw. die Hardwarekonfiguration durchzuführen.

5.3.1.1.2 Einstellen der Temperatur bei großen Massenströmen

Bei großen Massenströmen muss die Temperatur mit dem Massenstrom bzw. der Schwingungspaketsteuerung angepasst werden. Zu empfehlen ist, dass das System mit einem möglichst großen Bypassmassenstrom betrieben wird, da dann die Änderungen der Geschwindigkeit im Kalibrierkanal kaum Einfluss auf die Temperatur haben.

5.3.2 Geschwindigkeitskalibrierung

Die Geschwindigkeitskalibrierung wird mit dem Programm, welches in Kapitel 4.1 beschrieben wurde, durchgeführt. Zuerst müssen die notwendigen Parameter ins Programm eingegeben werden. Das Aussehen der Benutzeroberfläche des Programms für die Eingabe der Parameter ist in Abbildung 34 dargestellt.

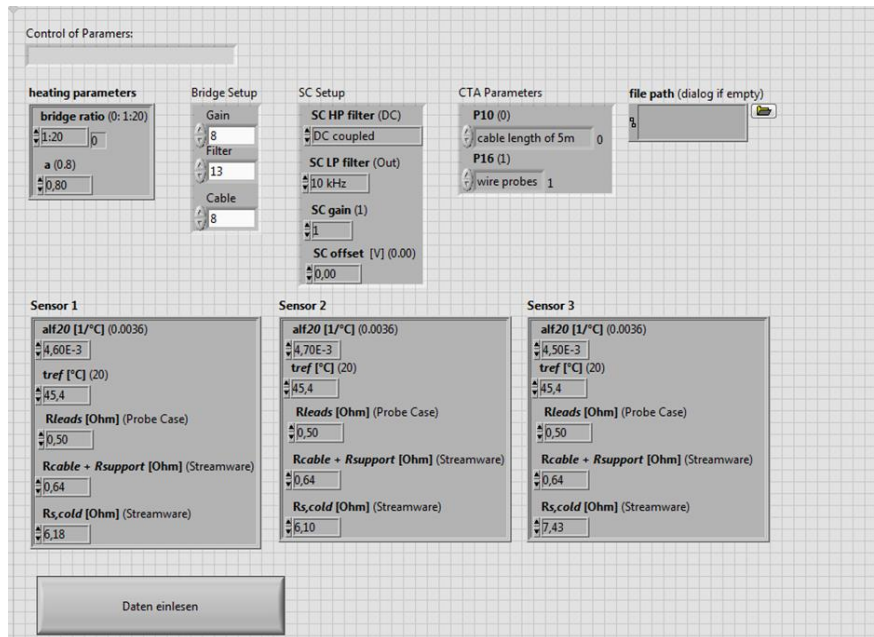


Abbildung 34: Benutzeroberfläche Eingabe der Parameter

Im Folgenden wird nun auf die einzelnen einzugebenden Größen eingegangen und erklärt, wo diese zu finden sind.

Eine gute Möglichkeit, um sich einen Überblick über die einzustellenden Größen zu machen, ist eine Messung in der StreamWare Software durchzuführen, wie in Anhang 1 beschrieben. Dabei geht es nicht um die Messung selbst, sondern im Messfile werden alle Informationen zur Sonde komprimiert zusammengefasst und ausgegeben. Zusätzlich werden die Standardwerte im Folgenden aufgelistet:

- Bridge Ratio: Das Bridge Ratio wird standardmäßig mit 1:20 eingestellt. Nur bei besonders langen Kabeln kann unter Umständen ein Verhältnis von 1:1 eingestellt werden.
- Overheat Ratio: Das Overheat Ratio wurde bereits bei der Hardwarekonfiguration definiert und kann dort nachgelesen werden. Bei Messungen in Strömungen, welche aus Gasen bestehen, wird standardmäßig ein Overheat Ratio von 0,8 eingestellt.
- Gain: 8
- Filter: 13
- Cable: 8
- SC HP-Filter: Der HP-Filter kann je nach Bedarf aktiviert werden.
- SC LP-Filter: Der HP-Filter kann je nach Bedarf aktiviert werden.
- SC-gain: 1
- SC-offset: 0
- P10: Cable length of 5 meters
- P16: Wire Probe
- File Path: Name und Ort an dem das Text-File abgespeichert werden soll.
- Alf20: Sind auf der Verpackung der Sonde zu finden, siehe Abbildung 35
- Tref: Diese Temperatur muss aus der Hardwarekonfiguration entnommen werden.
- Rleads: Sind auf der Verpackung der Sonde zu finden, siehe Abbildung 35.
- Rcable + Rsupport: Dieser Wert wird standardmäßig mit 0,64 Ohm angegeben.

- $R_{s,cold}$: Diese Widerstände sind aus der Hardwarekonfiguration zu entnehmen

Die Abbildung 39 zeigt die zuvor erwähnte Sondenverpackung:



Abbildung 35: Sondenverpackung

Während der Eingabe der Daten und danach werden die Werte dieser Daten laufend überprüft. Sind die Daten innerhalb des vorgegebenen Bereichs wird, dies mit einem „OK“ im Feld „Control of Parameters“ angegeben. In diesem Fall kann auf das Feld „Daten einlesen“ geklickt werden, damit die Daten vom System übernommen werden.

Im nächsten Schritt muss überprüft werden, ob die berechneten und eingestellten Widerstände jenen der Hardwarekonfiguration entsprechen. Die Ausgabe dieser Widerstände ist in Abbildung 36 dargestellt. Im Fall, dass der Decandenwiderstand R_{dec} mit jenem der Hardwarekonfiguration übereinstimmt, kann die Brücke aktiviert werden. Sollte dies nicht der Fall sein, müssen die zuvor eingegebenen Parameter erneut überprüft werden.

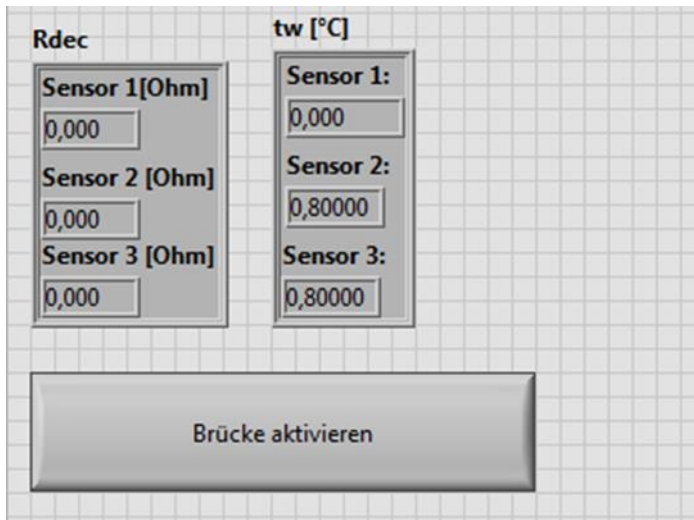


Abbildung 36: Überprüfen eingestellter Widerstand

Nachdem die Brücke aktiviert wurde, kann der eigentlich Kalibriervorgang beginnen. Dazu werden die Sensoren, wie in Abbildung 31 ersichtlich, in der Strömung platziert. Die Benutzeroberfläche mit der die Kalibrierung durchgeführt wird ist in Abbildung 37 ersichtlich.

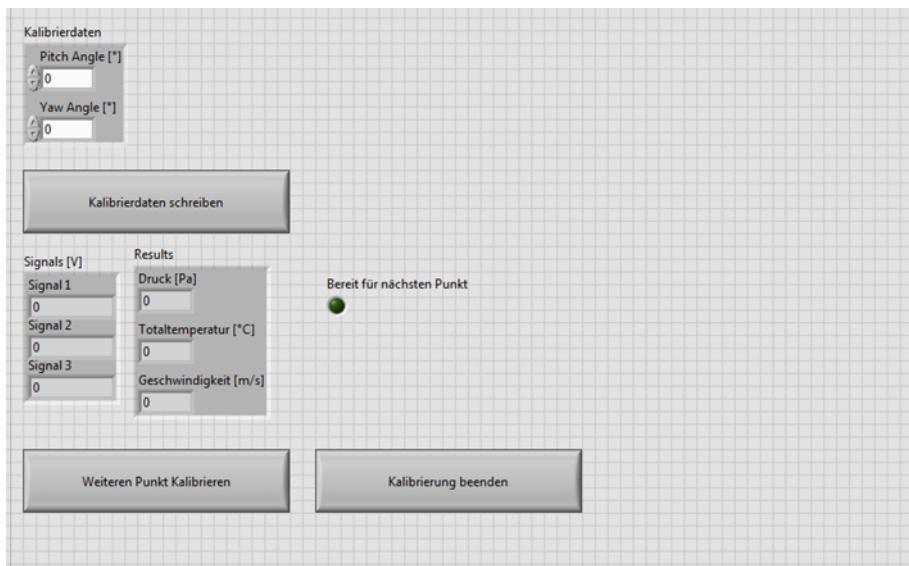


Abbildung 37: Benutzeroberfläche Durchführung Kalibrierung

Bei der Geschwindigkeitskalibrierung wird immer ein Pitch- und ein Yaw-Angle von 0° eingegeben und eingestellt. Mit dem zuvor erwähnten Programm „Automatic Calibrator“ wird im Kalibrierkanal die gewünschte Geschwindigkeit vorgegeben. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass auch die eingestellte Temperatur dem gewünschten Wert entspricht. Mit dem Button „Kalibrierdaten schreiben“ werden die Daten aufgezeichnet und im Text-File abgespeichert. Sobald das Programm das Aufzeichnen der Kalibrierdaten beendet hat, wird dies durch die Signallampe „Bereit für nächsten Punkt“ gekennzeichnet. Danach hat der Anwender zu entscheiden, ob er die Kalibrierung beenden oder einen weiteren Punkt kalibrieren möchte. Dies wird durch die entsprechenden Buttons ausgeführt.

Bei der Geschwindigkeitskalibrierung ist es zu empfehlen, 20 bis 30 Punkte im zu erwartenden Geschwindigkeitsbereich zu kalibrieren. Eine höhere Anzahl an Punkten führt nur selten zu einer Steigerung der Genauigkeit. (E.Jorgensen, 2002)

5.3.3 Winkelkalibrierung

Die Winkelkalibrierung kann gleich anschließend an die Geschwindigkeitskalibrierung durchgeführt werden. Dazu wird im Kalibrierkanal eine mittlere zu erwartende konstante Geschwindigkeit eingestellt. Neben der Geschwindigkeit muss auch die Temperatur so eingestellt werden, dass sie dem Wert der Hardwarekonfiguration entspricht. Das Einlesen der Kalibrierdaten und die Bedienung des Programm ist ident zu jener, welche in Kapitel 5.3.2 erläutert wurde.

Die Durchführung der Winkelkalibrierung erfolgt mit konstantem Pitch-Angle und variablem Yaw-Angle. Die erste Position, die einzustellen ist, ist jene mit einem Pitch-Angle von 15° und einem Yaw-Angle von -90° . Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Skala des Yaw-Angles um 90° verschoben ist. Das heißt, dass ein tatsächlicher Yaw-Angle von -90° einem Yaw-Angle von 0° auf der Skala entspricht. Die erste einzustellende Position wird in Abbildung 38 gezeigt.



Abbildung 38: Pitch-Angle: 15° , Yaw-Angle: -90°

In den weiteren Schritten wird nun der Yaw-Angle in 10° Schritten von -90° bis 90° Grad variiert und bei jeder Position werden die Spannungen aufgezeichnet. Es ist auch darauf zu achten, dass bei jeder Position die entsprechenden Winkel in die Benutzeroberfläche des Labview-Programms eingegeben werden.

Zum besseren Verständnis wird in Abbildung 39 eine weitere Positionierung der Sonde gezeigt.

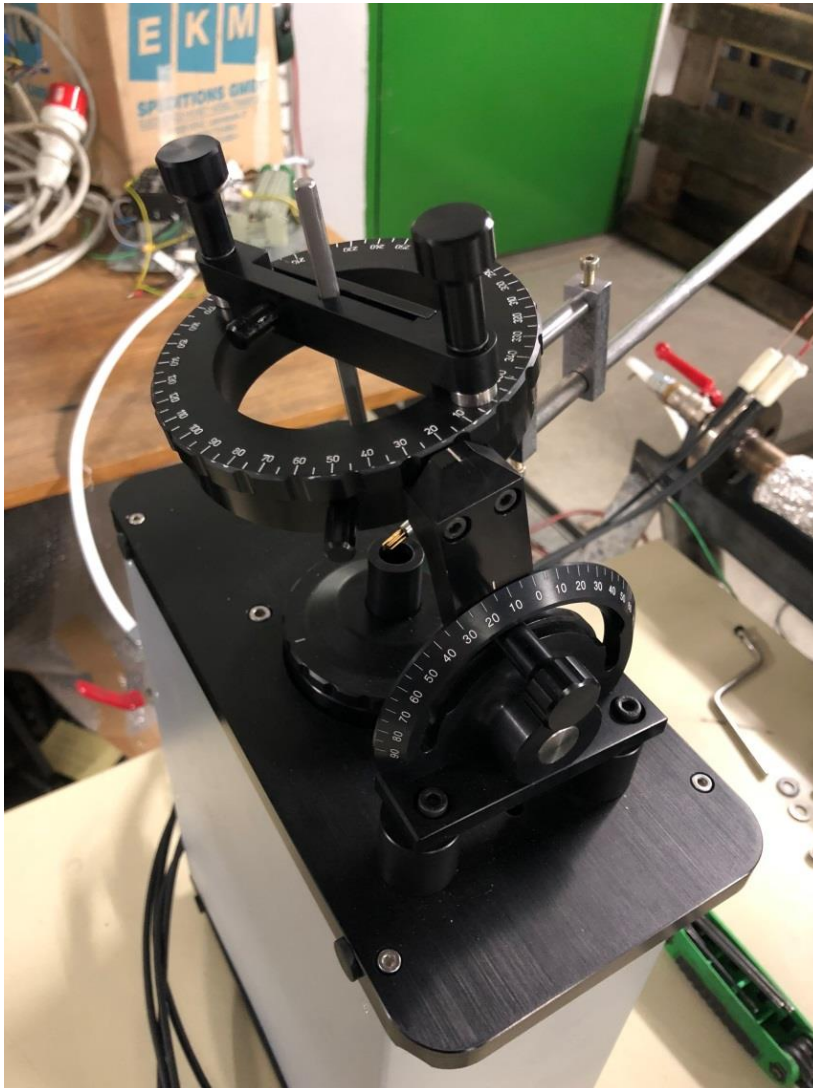


Abbildung 39: Pitch-Angle: 15° , Yaw-Angle: -70°

Nachdem der Yaw-Angle von -90° bis 90° variiert wurde und die Spannungen in jeder Position aufgezeichnet wurden, kann die Kalibrierung beendet werden.

5.3.4 Struktur der Kalibrierdaten

Der Output der Kalibrierung ist ein Text-File, welches alle aufgezeichneten Daten enthält. Ein solches Text-File wird beispielhaft in Abbildung 40 gezeigt.

Pitch Angle [°]	Yaw Angle [°]	Totaltemperatur [°C]	umgebungsdruck [Pa]	geschwindigkeit [m/s]	Sensor 1 [V]	Sensor 2 [V]	Sensor 3 [V]
0,000000	0,000000	44,375543	95432,574219	10,028235	2,432370	2,404443	2,413786
0,000000	0,000000	45,238108	95432,230469	10,787560	2,466065	2,438033	2,447538
0,000000	0,000000	45,323947	95428,542969	10,848594	2,473001	2,444819	2,454291
0,000000	0,000000	45,433862	95428,187501	11,771034	2,514800	2,486927	2,496262
0,000000	0,000000	45,429422	95425,785157	11,766533	2,519983	2,492044	2,501346
0,000000	0,000000	45,395716	95425,218751	12,619865	2,557595	2,529918	2,538600
0,000000	0,000000	45,208429	95419,527344	12,625829	2,564110	2,536578	2,544953
0,000000	0,000000	45,071741	95421,519532	13,699241	2,606779	2,580321	2,587339
0,000000	0,000000	44,905756	95417,218750	13,678244	2,609110	2,582100	2,589501
0,000000	0,000000	44,728312	95424,988282	14,816100	2,650768	2,625044	2,630743
0,000000	0,000000	44,524988	95421,300782	14,776854	2,652754	2,626758	2,632608
0,000000	0,000000	44,926828	95416,253907	15,620170	2,650309	2,624860	2,630832
0,000000	0,000000	44,893900	95413,312501	15,599189	2,656869	2,632529	2,637410
0,000000	0,000000	44,914957	95416,417969	16,178318	2,679335	2,655264	2,659354
0,000000	0,000000	44,919367	95424,164063	17,953474	2,733905	2,711644	2,712660
0,000000	0,000000	44,890665	95418,769532	17,952797	2,734267	2,712322	2,713062
0,000000	0,000000	44,848795	95412,335937	17,956480	2,734706	2,712550	2,713438
0,000000	0,000000	45,499429	95404,671875	17,994024	2,713425	2,692150	2,693044
0,000000	0,000000	45,659144	95408,480469	18,826199	2,740867	2,719433	2,719796
0,000000	0,000000	45,747583	95411,246094	19,434370	2,761067	2,740603	2,739609
0,000000	0,000000	45,774500	95410,347657	19,451588	2,764278	2,743880	2,742670
0,000000	0,000000	45,787759	95417,550782	20,205801	2,786991	2,767815	2,764996
0,000000	0,000000	45,688200	95429,199219	21,248426	2,817352	2,799727	2,794986
0,000000	0,000000	45,708856	95427,425782	21,202414	2,818263	2,800592	2,796142
0,000000	0,000000	45,643137	95431,550782	22,084522	2,843124	2,826690	2,821227
0,000000	0,000000	45,562158	95428,273437	22,047241	2,843241	2,826807	2,821637
0,000000	0,000000	45,478998	95439,921876	23,071749	2,871055	2,855861	2,852089
0,000000	0,000000	45,411799	95437,121094	23,041901	2,870988	2,855105	2,851505
0,000000	0,000000	45,345636	95447,960938	24,128773	2,898140	2,884746	2,882701
0,000000	0,000000	45,329584	95458,464844	25,068495	2,949160	2,907073	2,931433
0,000000	0,000000	45,338770	95455,769532	25,062016	2,946568	2,904999	2,928417
15,000000	-90,000000	45,439218	95362,406251	17,970720	2,753438	2,728787	2,653910
15,000000	-80,000000	45,514719	95358,640625	17,980156	2,757777	2,717704	2,650592
15,000000	-70,000000	45,570597	95353,695312	17,999361	2,766377	2,709800	2,660695
15,000000	-60,000000	45,607461	95351,886719	18,015718	2,781088	2,696329	2,674029
15,000000	-50,000000	45,613946	95350,242187	18,012392	2,786091	2,688183	2,688736
15,000000	-40,000000	45,590921	95348,917969	18,032446	2,791108	2,670997	2,708686
15,000000	-30,000000	45,556849	95348,292969	18,030315	2,793751	2,656443	2,722942
15,000000	-20,000000	45,513605	95345,722657	18,028534	2,796058	2,641676	2,735607
15,000000	-10,000000	45,455698	95343,859375	18,030588	2,795541	2,627756	2,743822
15,000000	0,000000	45,325113	95344,976563	18,013062	2,796456	2,615002	2,753223
15,000000	10,000000	45,244638	95344,527344	18,002371	2,793458	2,607993	2,761129
15,000000	20,000000	45,172724	95343,234375	18,009352	2,785037	2,601328	2,773720
15,000000	30,000000	45,078943	95338,328126	17,992210	2,779895	2,603648	2,778576
15,000000	40,000000	45,019464	95335,242188	17,991755	2,774903	2,609707	2,783298
15,000000	50,000000	44,962243	95334,933594	17,982855	2,771609	2,614509	2,792874
15,000000	60,000000	44,905634	95335,152344	17,990334	2,762117	2,625492	2,792212
15,000000	70,000000	44,827570	95337,566407	18,000151	2,752850	2,643162	2,789500
15,000000	80,000000	44,772913	95338,621094	17,985977	2,746020	2,659314	2,788318
15,000000	90,000000	44,714426	95339,210938	17,991560	2,741444	2,669147	2,788681

Abbildung 40: Struktur der Kalibrierdaten

5.4 Auswertung der Kalibrierung

Die Auswertung der Kalibrierdaten erfolgt mit dem dafür vorgesehenen Matlab-Programm. Das Programm benötigt als Input das Text-File, welches bei der Kalibrierung abgespeichert wurde. Zusätzlich müssen noch einige Werte in der Benutzeroberfläche eingegeben werden:

- Name_Textfile: Diese Variable enthält den Namen des Text-Files mit den Kalibrierdaten
- Tref: Referenztemperaturen der drei Sensoren. Diese können aus der Hardwarekonfiguration entnommen werden.
- Alpha20-Werte: Sind auf der Verpackung der Sonde zu finden, siehe Abbildung 35.

```

1 - clear all;
2
3 %File mit den Daten aus der Kalibrierung importieren
4 - Name_Textfile='Kalibrierung_PundYFaktor.txt';
5 - [Pitch_Angle,Yaw_Angle,Totaltemperatur,Umgebungsdruck,Geschwindigkeit,Sensor_1,Sensor_2,Sensor_3]
6
7 %Definieren der Temperaturparameter Referenztemperatur und der
8 %Alphawerte der drei Sensoren
9 - Tref_1=45.35;
10 - Tref_2=45.35;
11 - Tref_3=45.35;
12 - alpha20_1=0.46/100;
13 - alpha20_2=0.47/100;
14 - alpha20_3=0.45/100;
15
16 %Definieren der Transformationsmatrix vom Sensorkoordinatensystem ins
17 %Probenkoordinatensystem
18 - PTM=[0.57735,0.57735,0.57735;0.707107,-0.707107,6.12323*10^(-17);0.408248,0.408248,-0.816496];
19

```

Abbildung 41: Eingabe Benutzeroberfläche Auswertung der Kalibrierung

Nach der Eingabe der Daten in die Benutzeroberfläche kann das Programm ausgeführt werden. Der Output des Programms dient gleichzeitig als Input für das Programm zur Umrechnung der Spannung in Geschwindigkeit. Beispielhaft ist der Output des Programms in Abbildung 42 angeführt.

```

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
Kalibrierkonstanten:
Sensor 1
1797.0014
-24513.9061
133492.0028
-362719.3166
491782.7165
-266175.6603

Sensor 2
3223.2280
-43014.1777
229301.6725
-610336.7469
811144.4228
-430609.6220

Sensor 3
3223.2280
-43014.1777
229301.6725
-610336.7469
811144.4228
-430609.6220

Sensor 1
Pitch- und Yaw-Faktor und Winkelwert(k1,h1,alpha1)
0.5421
0.8767
56.1947

Sensor 2
Pitch- und Yaw-Faktor und Winkelwert(k2,h2,alpha2)
0.2887
1.0886
54.2638

Sensor 3
Pitch- und Yaw-Faktor und Winkelwert(k3,h3,alpha3)
0.4355
1.1580
56.5833

Referenztemperaturen:
45.3500
45.3500
45.3500

alpha20-werte:
0.004600
0.004700
0.004500

```

Abbildung 42: Output Auswertung Kalibrierung

5.5 Kalibrierung des Luftheritzers

Die Kalibrierung des Luftheritzers wurde bei einer Temperatur von 45,35°C durchgeführt, da dieser Wert der Referenztemperatur der Hardwarekonfiguration entspricht.

Die Geschwindigkeitskalibrierung erfolgte bei der oben genannten Temperatur und einem Geschwindigkeitsbereich von 0-15m/s. Der Geschwindigkeitsbereich von 0-15 m/s wurde dabei in 30 Punkte unterteilt.

Die Winkelkalibrierung wurde bei einer konstanten Geschwindigkeit von 7m/s durchgeführt.

6 Messung

Um die Funktionen der verschiedenen Programme und der Hardware zu überprüfen, wurde eine Messung der Strömung eines Lüfterhitzers durchgeführt. Die Leistung des Lüfters beträgt ca. 6kW, was zu einer Temperatur der Strömung von ca. 45°C führt. Im Folgenden soll der Aufbau und die Durchführung der Messung erläutert werden. Des Weiteren wird die Durchführung der Umrechnung der Spannungen in die Geschwindigkeitskomponenten erklärt. Schlussendlich wird die Messung mit jener Messung, welche mit der Dantec Software durchgeführt wurde, verglichen und die zeitaufgelöste Auswertung in einem ausgewählten Punkt gezeigt.

6.1 Aufbau der Messung

Der grundsätzliche Messaufbau ist in Abbildung 43 dargestellt. Bei der Messung des Geschwindigkeitsfeldes des Lüfterhitzer handelt es sich um eine instationäre Messung der Strömung. Um die Messung zeitaufgelöst auswerten zu können, wurde zusätzlich zu den Spannungen für die Geschwindigkeitsermittlung ein Referenzsignal zur Deduktion der Wellenumdrehung aufgezeichnet. Um dieses Signal zu erhalten, wurde eine Reflexionslichtschranke, welche bei Conrad bestellt wurde, verwendet. Diese Lichtschranke wurde auf der Hinterseite des Lüfterhitzers angebracht und detektiert das Vorbeilaufen der Schaufeln. Die Spannungsversorgung des Reflexionssensors wurde mit einem Netzteil gewährleistet, welches eine Gleichspannung von 5,6V zur Verfügung stellte. Das Signal des Sensors wurde über ein Oszilloskop auf den A-D-Wandler geleitet. Auf dem Oszilloskop konnte die Aktivität des Sensors zeitgleich mitverfolgt werden.

Zusätzlich zum Triggersignal wurde die Temperatur aufgezeichnet. Dazu wurde ein Thermistor verwendet, welcher im CTA-System enthalten ist.



Abbildung 43: Aufbau der Messung

Die Positionierung des Sensors erfolgte, wie in der Turbine, mit einer am Institut vorhandenen Traversierung, welche die radiale Position sowie die Winkelstellung vorgeben kann. Die Höhe der Traversierung wurde so gewählt, dass sich die Sonde in der Mitte des Strömungsfeldes befindet. Die Abbildung 44 zeigt die Anordnung der gewählten Punkte und Linien.

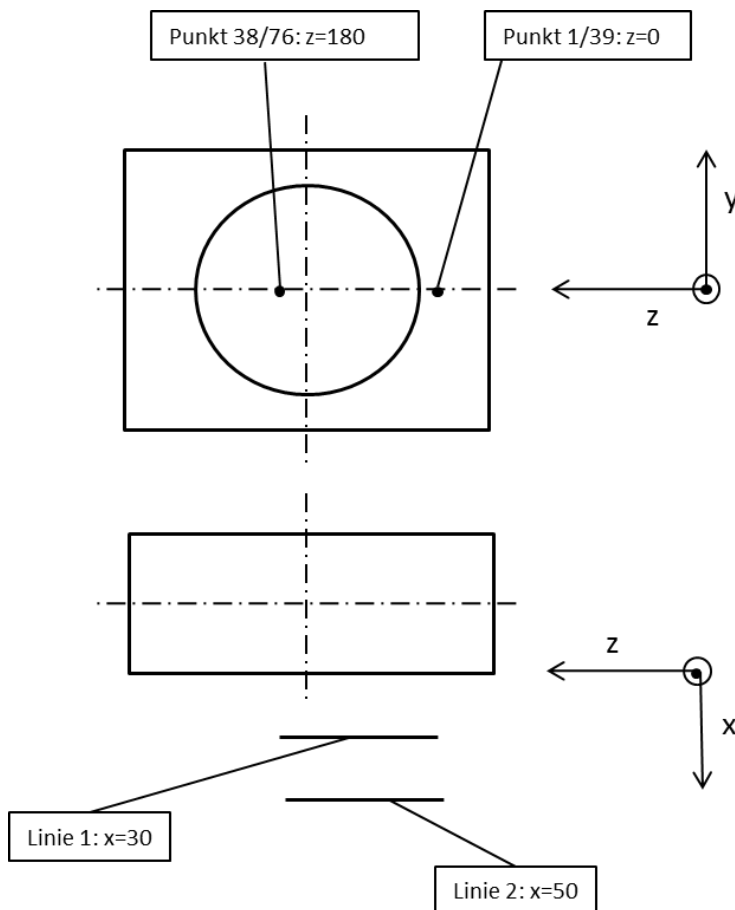


Abbildung 44: Anordnung der gewählten Punkte und Linien bei der Messung

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Genauigkeit der Messung ist die Ausrichtung der Sonde. Bei der Kalibrierung wurde der Quader am Ende des Sondenschafts als Positionsreferenz angebracht, welcher möglichst horizontal ausgerichtet wurde. Die Sonde wird nun um 90° im Vergleich zur Kalibrierung gedreht damit die Anströmrichtung des Luftherhitzers jener der Kalibrierung entspricht. Die Winkelstellung der Sonde wird so lange angepasst, bis sich die entsprechende plane Fläche des Quaders wieder in möglichst horizontaler Position befindet. Nachdem eine möglichst genaue Ausrichtung gefunden wurde, wurde der Sensor zusätzlich um einen Winkel von 25° gedreht, damit sich die Strömung des Luftherhitzers im Akzeptanzbereich der Sonde befindet. Die zusätzlich hinzugefügte Winkelstellung von 25° muss bei der Auswertung der Spannungsdaten durch die Verwendung einer Drehmatrix berücksichtigt werden.

6.2 Durchführung der Messung

Insgesamt wurden bei der Messung des Strömungsfeldes des Luftherhitzers zwei Linien gemessen. Dabei wurde bei jeder Linie der Abstand der Sonde zum Gitter des Luftherhitzers um 20 mm erhöht. Die erste Linie besaß einen Abstand von 30 mm, die zweite Linie einen Abstand von 50 mm.

Bei jedem Punkt der Linie wurde der radiale Abstand der Sonde vom Mittelpunkt des Luftherhitzers um 5 mm variiert. Der erste Punkt wurde außerhalb des Strömungsfeldes gewählt, der letzte Punkt wurde einige Millimeter über der Hälfte gewählt, um sicher zu gehen, dass das gesamte Strömungsfeld vermessen wird. Insgesamt wurden somit 38 Punkte pro Linie gemessen.

In jedem Punkt wurden 400 000 Samples mit einer Rate von 50 kHz eingelesen.

6.3 Umrechnung der Spannungen in Geschwindigkeiten

Zum Umrechnen der Spannungen in die entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten wird jenes Programm verwendet, welches in Kapitel 4.4 beschrieben wurde.

Um das Programm korrekt anwenden zu können, müssen folgende Daten in die Benutzeroberfläche eingegeben werden, siehe Abbildung 45:

- „Name_Kalibrierdaten“: Diese Variable definiert den Namen des Text-Files, welches die Auswertung der Kalibrierung enthält.
- „Name_Messfile“: Die Variable „Name_Messfile“ definiert den Namen der Text-Files, welche die Spannungen der Messung enthalten. Das Labview-Programm zur Messung gibt dabei jedes Text-File mit demselben Namen aus. Der einzige Unterschied im Namen der Text-Files ist die Laufvariable am Ende des Namens. Diese Laufvariable muss bei der Eingabe des Namens weggelassen werden, wie in Abbildung 45 gezeigt. Das Matlab-Programm ergänzt diese Laufvariable automatisch.
- „Name_Ausgabe“: Diese Variable definiert die Namen der Text-Files, welche am Ende der Umrechnung ausgegeben werden. Zusätzlich zu dem Namen, welcher mit der Variable „Name_Ausgabe“ definiert wird, wird automatisch eine Laufvariable am Ende des Namens angehängt.
- „Anzahl“: Diese Variable definiert die Anzahl der umzuwandelnden Text-Files.
- „a“: Die Variable „a“ definiert das Overheat Ratio, welches aus der Hardwarekonfiguration zu entnehmen ist.


```
1 - clear all;
2
3 %Definieren der Namen der Textfiles
4 - Name_Kalibrierdaten='Auswertung_Daten_Kalibrierung.txt';
5 - Name_Messfile='Messung_Labview_';
6 - Name_Ausgabe='Messung_Labview_Geschwindigkeit_';
7
8 %festlegen der Anzahl der umzurechnenden files
9 - Anzahl=164;
10
11 %Festlegen des overheat ratios
12 - a=0.8;
```

Abbildung 45: Eingabe Programm Umrechnung der Spannungen in Geschwindigkeiten

Nachdem die Eingabe in die Benutzeroberfläche beendet ist, kann das Programm ausgeführt werden. Das Programm rechnet dann automatisch alle im Ordner vorhandenen Text-Files um.

6.4 Verifizierung der Messergebnisse

Um die Ergebnisse der selbst geschriebenen Programme zu verifizieren, wurde die Messung und Kalibrierung zum einen mit dem selbst geschriebenen Programmen durchgeführt, zum anderen mit der von Dantec zur Verfügung gestellten Software. Die Durchführung der Messung und Kalibrierung mit der von Dantec bereitgestellten Software wurde wie in Anhang 1 erläutert durchgeführt.

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurde das arithmetische Mittel der Messwerte in jedem Punkt der Linien gebildet. Die Abbildung 46, die Abbildung 47 und die Abbildung 48 zeigen die Ausgabe der Mittelwerte für die erste Linie.

Die blaue Linie in den Abbildungen entspricht dabei den Messwerten, welche mit der selbst geschriebenen Software aufgezeichnet wurden, die orange Linie jenen mit der von Dantec zur Verfügung gestellten Software.

Jene Bereiche, die grau hinterlegt sind, sind jene Messpunkte bei denen sich die Strömung zum Teil außerhalb des akzeptierten Messbereichs der Sonde befand. Die Dantec-Software und das selbst geschriebene Programm zur Auswertung behandeln diese Bereiche unterschiedlich, was zu Ergebnissen führt, die nicht vergleichbar sind.

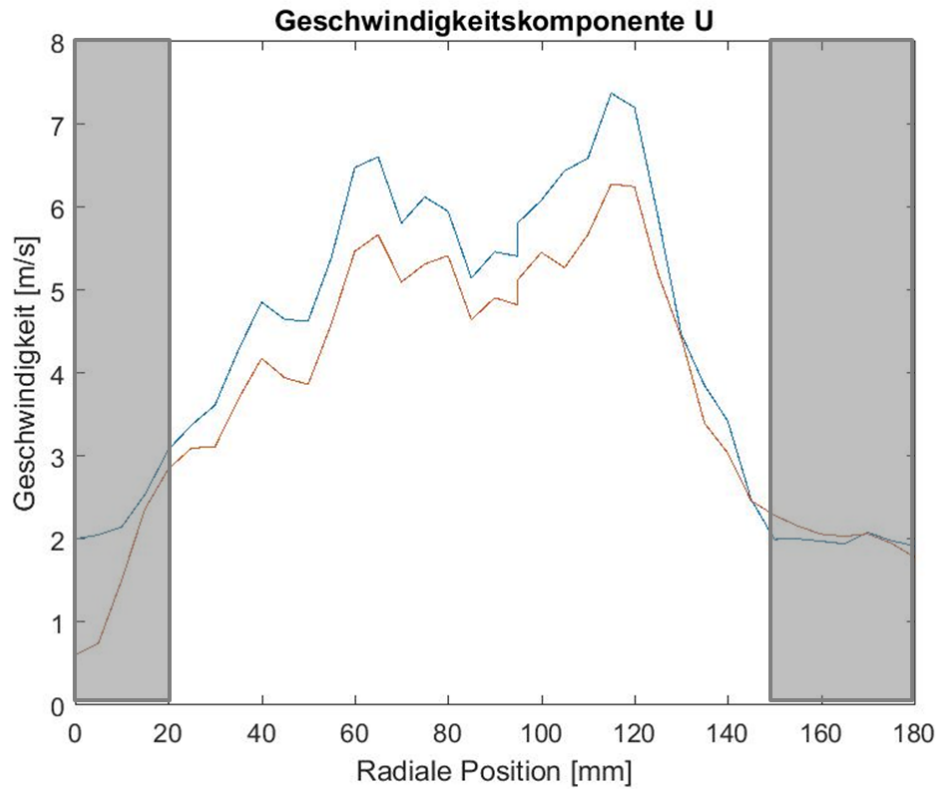


Abbildung 46: Vergleich Mittelwert Geschwindigkeitskomponente U

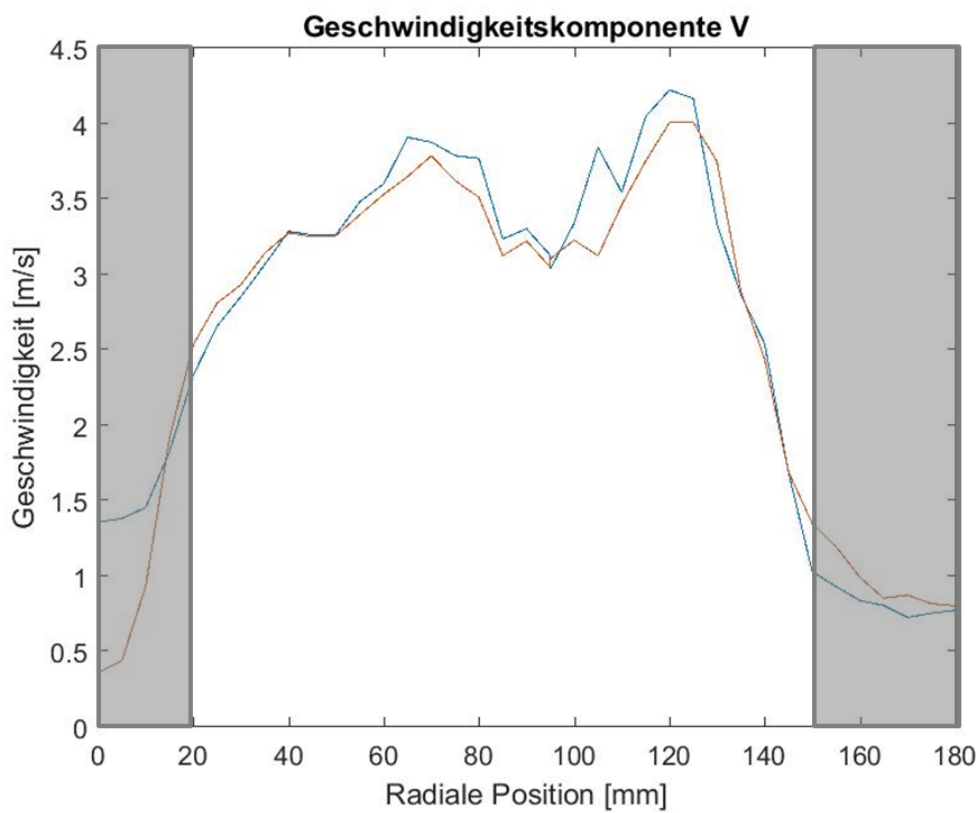


Abbildung 47: Vergleich Mittelwert Geschwindigkeitskomponente V

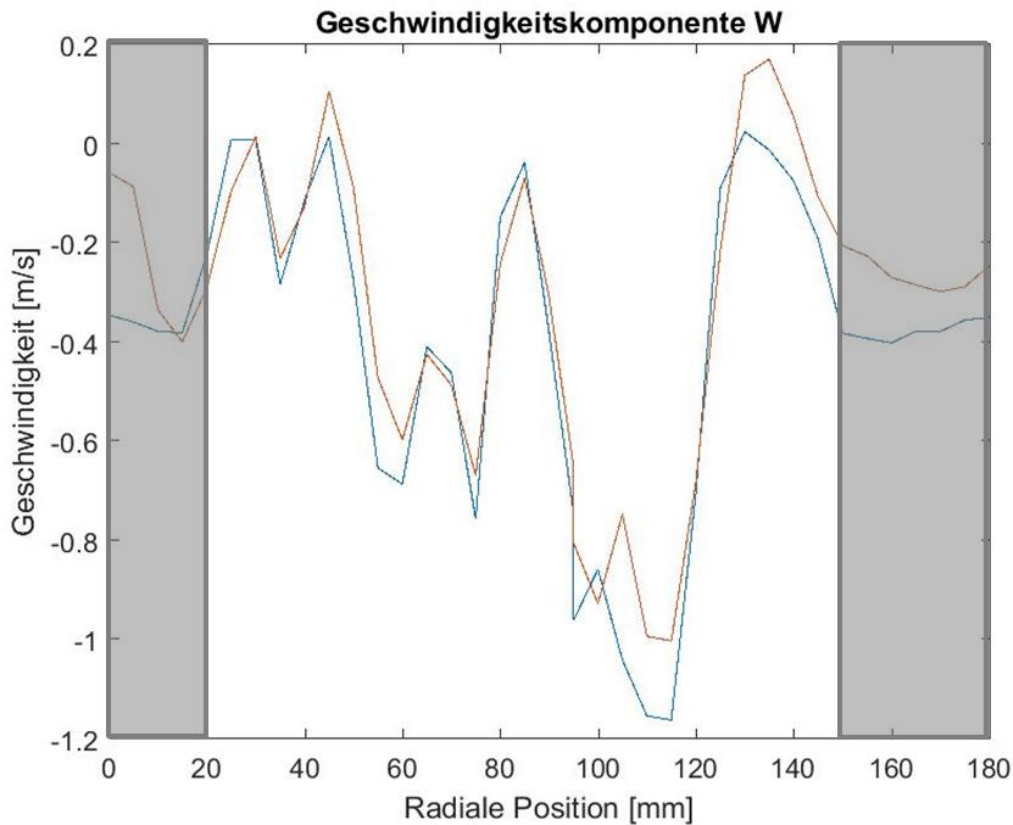


Abbildung 48: Vergleich Mittelwert Geschwindigkeitskomponente W

Der Offset, welcher in den Abbildungen zu sehen ist, lässt sich aus mehrere Gründe erklären. Zum Ersten führt die StreamWare Pro Software von Dantec bei der Winkelkalibrierung keine Korrektur des Fehlers, welcher aufgrund von Temperaturschwankungen entsteht, durch. Das selbst geschriebene Matlab-Programm, welches die Kalibrierung auswertet, führt eine solche Korrektur durch. Zweitens wurden die beiden Kalibrierungen bei sehr geringen Geschwindigkeiten im Kalibrierkanal durchgeführt. Dadurch hat zusätzlich zur erzwungenen Konvektion durch die Strömung auch die natürliche Konvektion einen Einfluss auf den Wärmeübergang am Draht. Dieser Effekt erhöht die Ungenauigkeit der Kalibrierung. (E.Jorgensen, 2002)

Zuletzt ist noch zu erwähnen, dass nicht bekannt ist, wie konstant die Leistung und damit die Strömung ist, welche der Luftherhitzer bereitstellt. Da die Messung einer Linie etwas Zeit in Anspruch nimmt, liegen die Messungen der verglichenen Linien zeitlich auseinander.

6.5 Auswertung der Messergebnisse

Die instationäre Auswertung der Messdaten wurde mit dem Programm durchgeführt, welches in Kapitel 4.5 beschrieben wurde. Beispielhaft wurde die Auswertung für den Punkt mit der Radialen Position von 110 mm und einem Abstand von 30 mm zum Gitter des Luftherhitzers durchgeführt. Für den Triggerlevel wurde ein Wert von -1,2 V gewählt. Die gesamte Rotorumdrehung wurde in 2048 Samples unterteilt.

6.5.1 Phasengemittelte Geschwindigkeitsverteilung über eine Rotorumdrehung

Zur Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung wurden alle Punkte, welche dieselbe zeitliche Grundlage besitzen, das heißt, welche bei der gleichen Winkelstellung des Rotors auftreten, gemittelt. Die Abbildung 49 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung der Geschwindigkeitskomponente U, welche der Axialgeschwindigkeit des Luftherzigers entspricht.

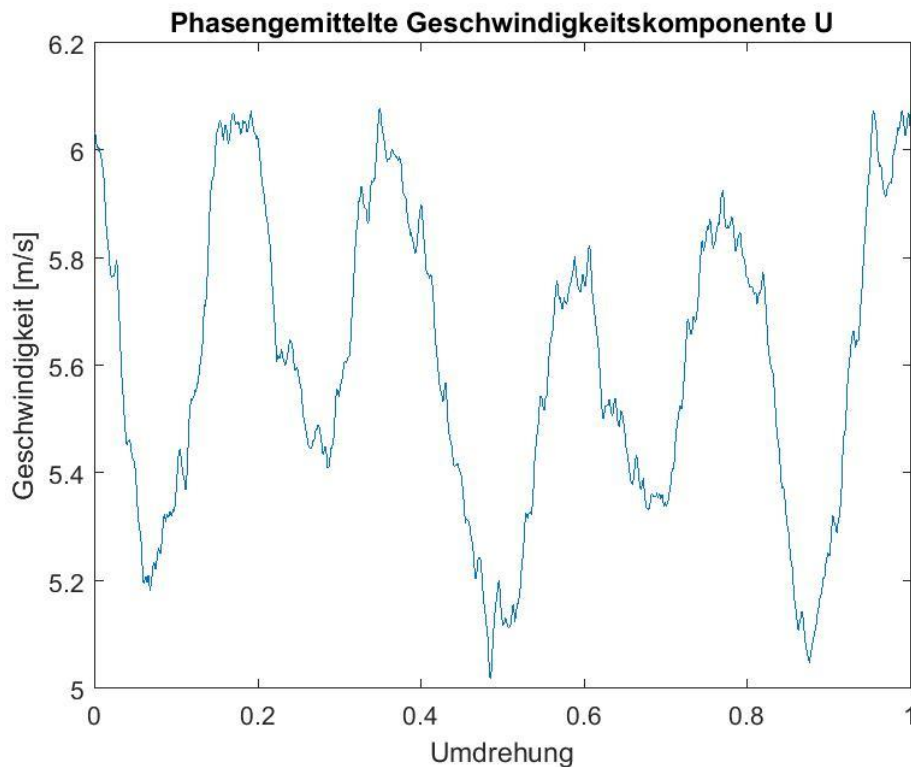


Abbildung 49: Phasengemittelte Geschwindigkeitskomponente U für eine Rotorumdrehung

Die weiteren Geschwindigkeitskomponenten V und W entsprechen den Radialgeschwindigkeiten. Diese beiden Geschwindigkeitskomponenten sind in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt.

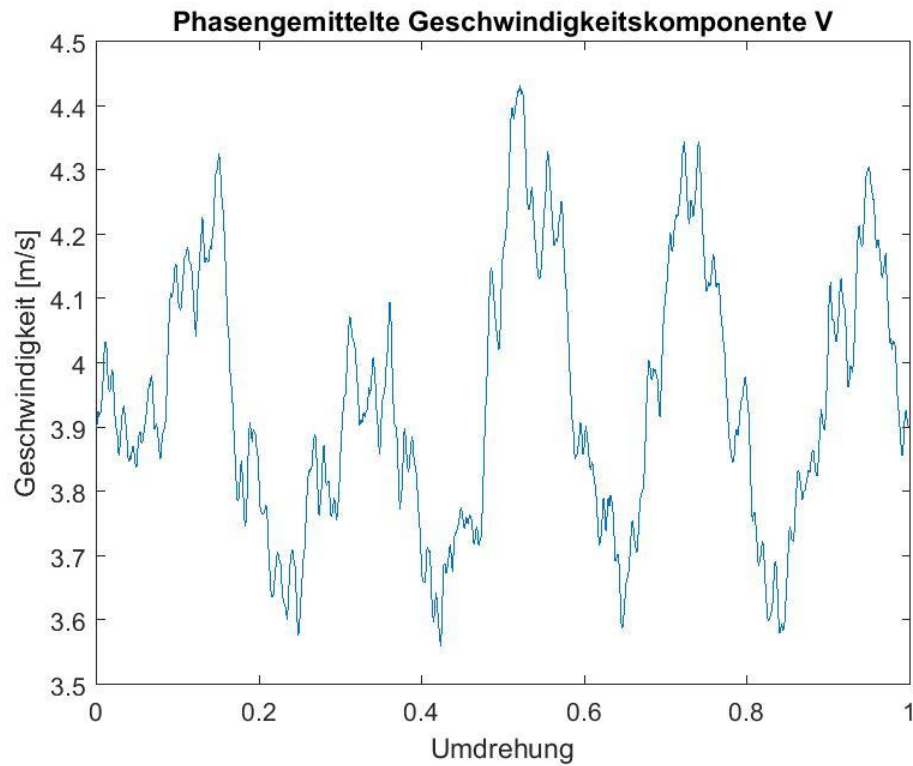


Abbildung 50: Phasengemittelte Geschwindigkeitskomponente V für eine Rotorumdrehung

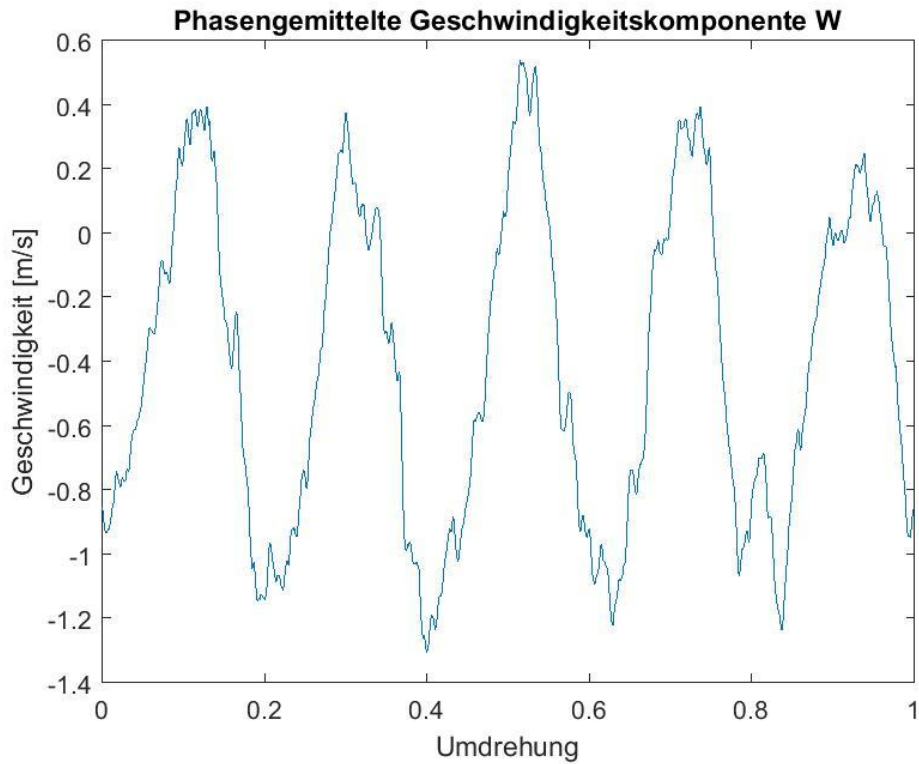


Abbildung 51: Phasengemittelte Geschwindigkeitskomponente W über eine Rotorumdrehung

6.5.2 Betrag der phasengemittelten Geschwindigkeit über eine Rotorumdrehung

Neben den phasengemittelten Geschwindigkeitskomponenten U, V und W aus Kapitel 6.5.1 wurde darüber hinaus noch der phasengemittelte Betrag der Geschwindigkeit berechnet. Zur Berechnung des Betrags wurde die Gleichung 6.1 verwendet.

$$U_{\text{Betrag}} = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (6.1)$$

Aus dem phasengemittelten Betrag der Geschwindigkeit kann durch die Bildung der Summe und durch eine anschließende Division durch die Anzahl der Punkt ein Mittelwert des Betrages der Geschwindigkeit für die Rotorumdrehung berechnet werden, welcher benötigt wird, um den Turbulenzgrad zu bestimmen.

$$U_{\text{Mean}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n U_{\text{Betrag},i} \quad (6.2)$$

Abbildung 52 zeigt den phasengemittelten Betrag der Geschwindigkeit sowie den gemittelten Betrag der Geschwindigkeit über eine Rotorumdrehung.

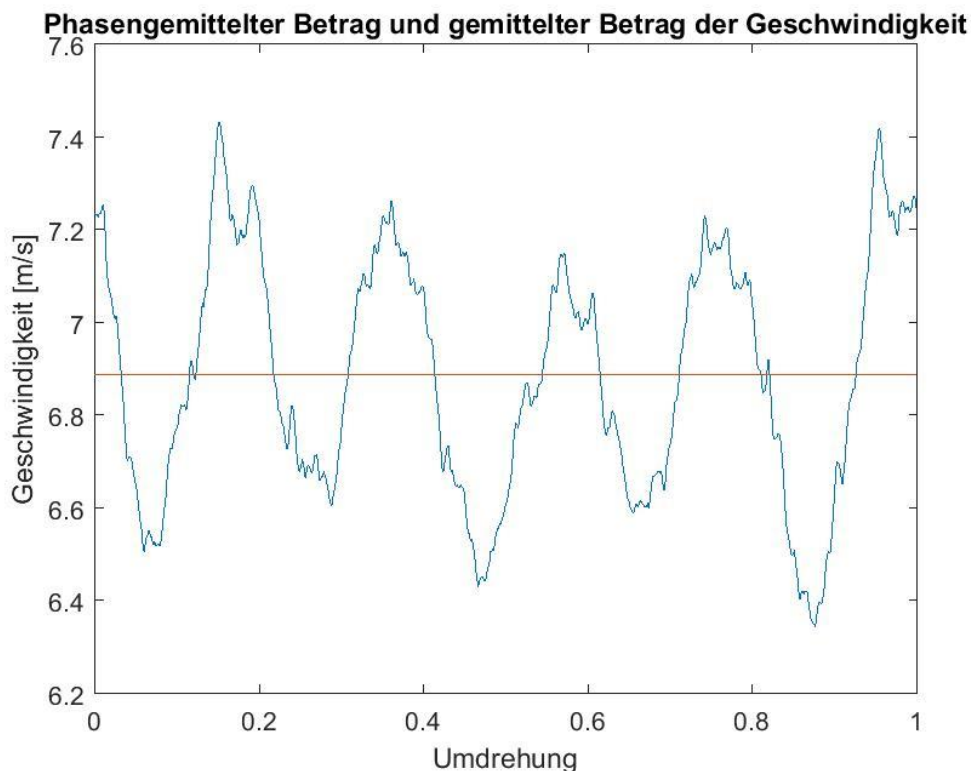


Abbildung 52: Phasengemittelter Betrag der Geschwindigkeit und gemittelter Betrag der Geschwindigkeit über eine Rotorumdrehung

6.5.3 Phasengemittelter Turbulenzgrad über eine Rotorumdrehung

Anschließend wurde die phasengemittelte Turbulenzverteilung über eine Rotorumdrehung bestimmt. Dazu wurden die gemittelten Schwankungsgrößen bei jeder Rotorstellung bestimmt, wie in Kapitel 4.5 erläutert. Aus diesen Größen wurde anschließend mit Gleichung 1.1 der Turbulenzgrad errechnet. (E.Jorgensen, 2002)

$$T_U = \frac{1}{U_{mean}} * \sqrt{\frac{1}{3} * (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} \quad (1.1)$$

Abbildung 53 zeigt die phasengemittelte Verteilung des Turbulenzgrades über eine Rotorumdrehung.

Neben dem phasengemittelten Turbulenzgrad wurde auch jener phasengemittelte Drehwinkel der Strömung berechnet, welcher durch den projizierenden Anteil der Geschwindigkeit in der x-z-Ebene und dem Richtungsvektor x eingeschlossen wird. Zur Berechnung wurde die Gleichung 6.3 verwendet.

$$\omega = \arctan \frac{W}{U} \quad (6.3)$$

Der Verlauf des phasengemittelten Drehwinkels über eine Rotorumdrehung ist in Abbildung 54 dargestellt.

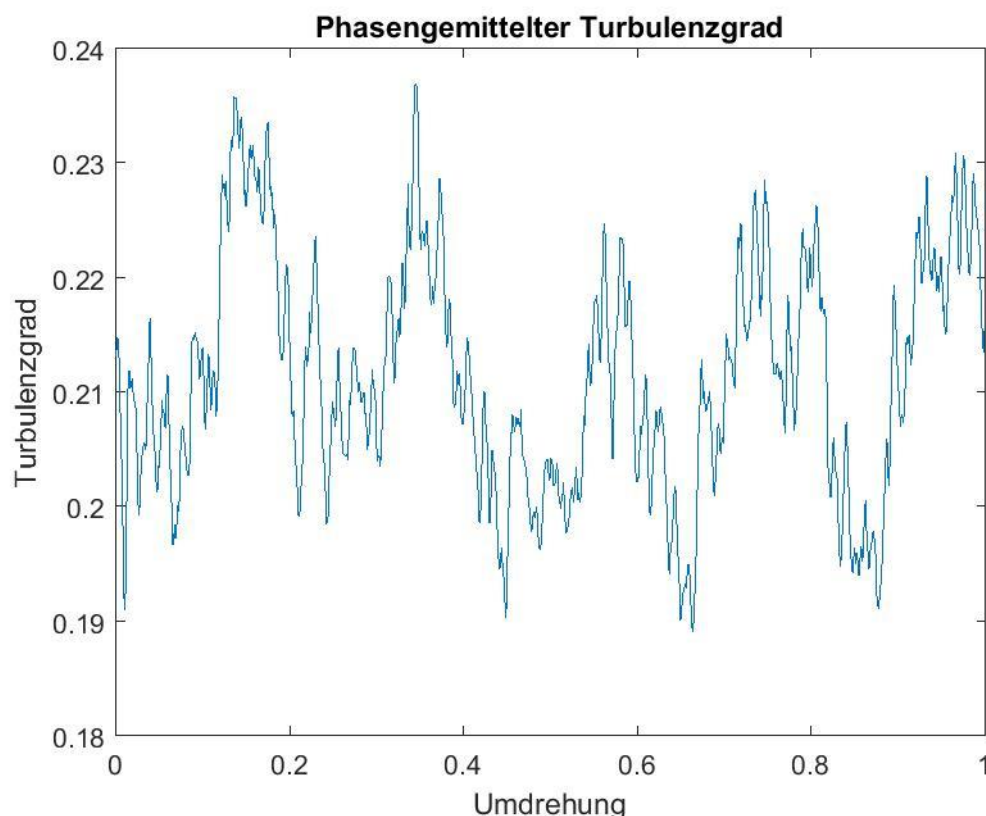


Abbildung 53: Phasengemittelter Turbulenzgrad über eine Rotorumdrehung

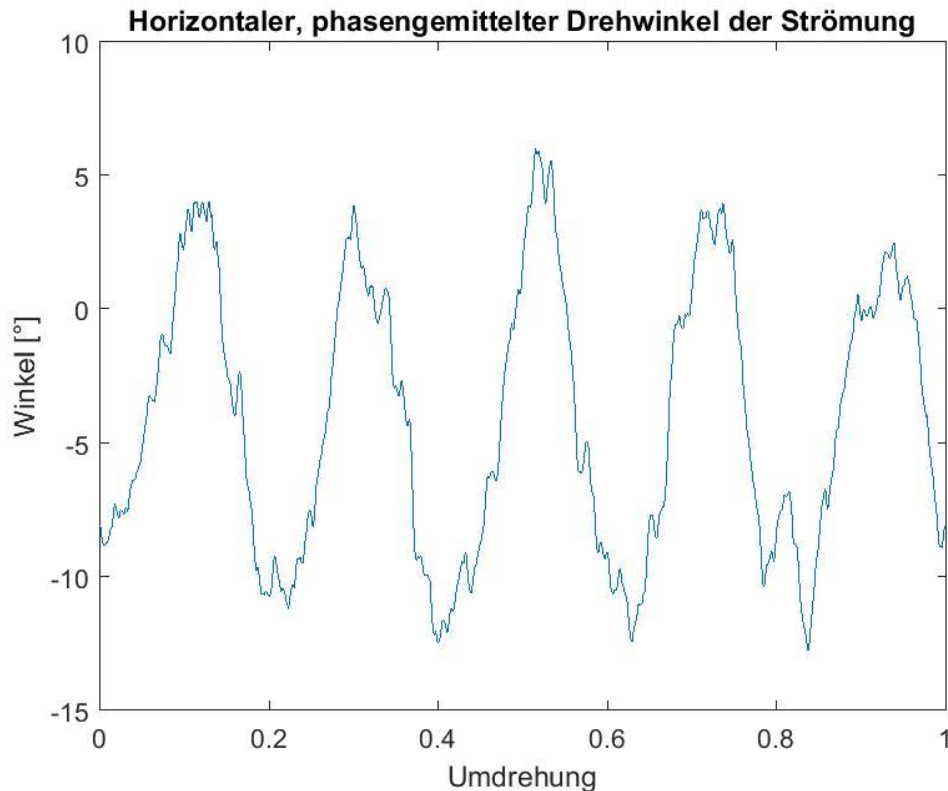


Abbildung 54: Horizontaler, phasengemittelter Drehwinkel, ω , der Strömung

In den Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51 ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit in der freien Strömung deutlich ansteigt. Insgesamt sind pro Rotorumdrehung fünf Geschwindigkeitsspitzen erkennbar. Diese Zahl entspricht genau der Anzahl an Rotorblättern des Lüfters.

Das Strömungsfeld hinter einem solchen Lüfter ist prinzipiell durch Schaufelnachläufe und Geschwindigkeitsvariationen von Druck- zu Saugseite der Schaufeln geprägt. Üblicherweise tritt in den Nachläufen eine erhöhte Turbulenz infolge der Wirbelablösung an den Hinterkanten auf. Bei diesem Heizgerät sind zusätzlich Heizspiralen Stromab des Laufrades angeordnet, welche ebenso Nachläufe produzieren.

In Abbildung 53 und Abbildung 54 ist ersichtlich, dass der phasengemittelte Turbulenzgrad immer beim gleichen Wert des phasengemittelten, horizontalen Drehwinkels der Strömung ansteigt. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei der Anströmung der Heizspulen mit einem bestimmten Winkel der Nachlauf einer solchen Heizspule den Messpunkt trifft.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Hitzdrahtanemometrie eine flexible und zuverlässige Möglichkeit zur zeitaufgelösten Messung von Strömungen in Turbinen darstellt. Um die Messung jedoch korrekt durchführen zu können, ist ein grundlegendes Wissen über die Mechanismen des Wärmetransports eines solchen Messgerätes notwendig. Die Arbeit liefert dazu ausreichend Informationen, vor allem über die Messung mit einem 3W-Sensor, welcher am Institut vorhanden ist.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Bereitstellung von entsprechender Hardware und Software mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Für die Kalibrierung muss Druckluft mit entsprechender Temperatur zur Verfügung gestellt werden, was die Konstruktionen eines eigenen Drucklufferhitzers notwendig gemacht hat. Auch der Sondenschaft musste für die Anwendung in der Turbine adaptiert werden.

Die Aufnahme der Daten bei der Messung und die Kommunikation mit der Traversierung wurde mittels eines eigens dafür programmierten Labview-Programms gelöst. Bei der Messung selbst ist darauf zu achten, dass sich die Anströmwinkel der Strömung immer im akzeptieren Bereich der Sonde befinden. Bei Bedarf muss die Sonde gedreht werden, um eine erfolgreiche Messung zu ermöglichen.

Nachdem das instationäre Spannungssignal aufgezeichnet wurde, ist die Umrechnung mittels Massenstromdichte in die drei Geschwindigkeitsrichtungen der nächste notwendige Schritt. Die Umrechnung wurde mit entsprechenden Programmen gelöst, welche in Matlab programmiert wurden, was eine hohe Flexibilität zur Folge hat, da die Programme je nach Bedarf sehr einfach abgeändert und angepasst werden können.

Zuletzt wurde die Funktion der geschaffenen Software und Hardware in einer Initialmessung, welche den Bedingungen einer Messung in der Turbine möglichst nahe simulieren sollte, überprüft und verifiziert.

Literaturverzeichnis

- Electronic tutorials*. (29. 11 2017). Abgerufen am 29. 11 2017 von http://www.electronicstutorials.ws/filter/filter_2.html
- Dantec Dynamics: Turn Measurement into Knowledge*. (15. 1 2018). Abgerufen am 15. 1 2018 von <https://www.dantecdynamics.com/streamline-research-cta-system>
- Dantec dynamics: turn measurements into knowledge, 3W-Probe*. (29. 11 2018). Abgerufen am 29. 11 2017 von https://www.dantecdynamics.com/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=496&virtuemart_category_id=22&Itemid=389
- Grundlagen der Leistungselektronik*. (17. 1 2018). Abgerufen am 17. 1 2018 von <http://www.vcb.de/vcb-contentb/mechatronik/basiswissen/gllt/gllt01q01/14600.html>
- Wärmekapazität von Gasen*. (17. 2 2018). Abgerufen am 17. 2 2018 von <http://www.unternehmensberatung-babel.de/industriegase-lexikon/industriegase-lexikon-n-bis-z/spezifische-waermekapazitaet-von-gasen/index.html>
- Bruun, H. H. (1995). *HOT-WIRE ANEMOMETRY: PRINCIPLES AND SIGNAL ANALYSIS*. Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press.
- Conrad. (17. 1 2018). *Conrad*. Abgerufen am 17. 1 2018 von <https://www.conrad.de/de/leistungsregler-baustein-kemo-m204-230-vac-1418809.html>
- Dynamics, D. (2017). *StreamWare Pro: Installation and User Guide*.
- Dynamics, D. (2018, 3 19). *Dantec Dynamics*. Retrieved 3 19, 2018, from Sensorelement 55R97: https://www.dantecdynamics.com/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=496&virtuemart_category_id=22&Itemid=415
- Dynamics, D. (2018, 1 15). *Dantec Dynamics: Turn Measurement into Knowledge*. Retrieved 1 15, 2018, from CTA System: <https://www.dantecdynamics.com/streamline-research-cta-system>
- Dynamics, D. (2018, 1 15). *Dantec Dynamics: Turn Measurement into Knowledge*. Retrieved 1 15, 2018, from <https://www.dantecdynamics.com/news-events-category/trade-in-trade-up-cta>
- Dynamics, D. (2018, 1 15). *Dantec Dynamics: Turn Measurements into Knowledge*. Retrieved 1 15, 2018, from https://www.dantecdynamics.com/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=496&virtuemart_category_id=22&Itemid=389
- Dynamics, D. (2018, 1 15). *Dantec Dynamics: Turn Measurements into Knowledge*. Retrieved 1 15, 2018, from Probe 55R97: https://www.dantecdynamics.com/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=496&virtuemart_category_id=22&Itemid=389
- Dynamics, D. (2018, 3 23). Decomposition of Tri-axial probe voltages into U,V and W.
- E.Jorgensen, F. (2002). *How to measure turbulence with hot-wire-anemometers-a practical guide*. Dantec Dynamics.

- Instruments, N. (2018, 1 15). *National Instruments: Support*. Retrieved 1 15, 2018, from <http://www.ni.com/de-at/support/model.pci-6133.html>
- Küng, R. (29. 11 2017). *A-D und D-A Wandler*. Abgerufen am 29. 11 2017 von https://home.zhaw.ch/hhrt/EK2/AD_DA_Wandler/AD_Wandler_v2_2.pdf
- Kurten, H. K. (2011). *Untersuchung der Auswertung von instationären Hitzdraht- und Heißfilm-Sonden im Bezug auf verwendete statistische Verfahren zur Datenreduktion*. RWTH, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Strahlenantriebe und Turbomaschinen.
- Matlab. (2018, 2 26). *Polyfit*. Retrieved 2 26, 2018, from <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>
- Simens. (31. 3 2018). *Messtechnik*. Abgerufen am 31. 3 2018 von <https://w1.siemens.ch/buildingtechnologies/ch/de/service/know-how/Documents/Messtechnik.pdf>
- Wischnewski, B. (3. 4 2018). *Peace Software*. Abgerufen am 3. 4 2018 von <http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft.html>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messaufbau Turbine.....	2
Abbildung 2: Single Channel digital Measurement System (Bruun, 1995).....	5
Abbildung 3: Offset- und Gain Fehler (Küng, 2017)	7
Abbildung 4: Schaltung CC-Mode (Bruun, 1995)	10
Abbildung 5: CT-Mode (Bruun, 1995)	11
Abbildung 6: Einfluss der Temperatur auf das Spannungssignal (Bruun, 1995).....	18
Abbildung 7: Sensor- und Sonden-Koordinatensystem einer HDA-Sensors (Bruun, 1995) ..	23
Abbildung 8: Dreh- und Kippwinkel eines HDA-Sensors (Bruun, 1995).....	25
Abbildung 9: StreamLine Pro System (Dynamics, Dantec Dynamics: Turn Measurement into Knowledge, 2018)	26
Abbildung 10: 3W-Sensor 55R97 mit Kennzeichnung des Pitch- und Yaw-Angles (Dantec dynamics: turn measurements into knowledge, 3W-Probe, 2018).....	28
Abbildung 11: PCI-6133 (Instruments, 2018)	28
Abbildung 12: Automatische Kalibriergerät (Dynamics, Dantec Dynamics: Turn Measurement into Knowledge, 2018).....	29
Abbildung 13: Pitch/Yaw Manipulator.....	30
Abbildung 14: Druckluftheritzer mit schematischer Skizze des Aufbaus.....	31
Abbildung 15: Vereinfachtes thermodynamisches System	32
Abbildung 16: Schaltung Druckluftheritzer	33
Abbildung 17: Kemo M204 230V/AC (Conrad, 2018)	35
Abbildung 18: Sondenschaft Dantec	35
Abbildung 19: neu gefertigter Sondenschaft	36
Abbildung 20: Sondenhalterung	37
Abbildung 21: Ablauf Programm Kalibrierung	39
Abbildung 22: Plot des Vergleichs der Geschwindigkeiten U_{cal} für den Sensor 1	44
Abbildung 23: Plot des relativen Fehlers für den Sensor 1	44
Abbildung 24: Fehler und Fitting der Winkelkalibration	48
Abbildung 25: Ablauf Programm zur Messung.....	50
Abbildung 26: Interpolation Triggerlevel.....	54
Abbildung 27: Aufbau des Kalibriersystems	57
Abbildung 28: Anschluss Druckluft an das Kalibriersystem	58

Abbildung 29: Anschluss Luftmassenstroms an den Kalibrierkanal	59
Abbildung 30: Einspannung Sondenhalterung in den Pitch- und Yaw Manipulator	59
Abbildung 31: Positionierung der Sonde in der Sondenhalterung (Pitch-Angle=0, Yaw-Angle=0)	60
Abbildung 32: BNC-Kabel CTA-System	61
Abbildung 33: Anschluss BNC-Kabel an das CTA-System	61
Abbildung 34: Benutzeroberfläche Eingabe der Parameter	63
Abbildung 35: Sondenverpackung	64
Abbildung 36: Überprüfen eingestellter Widerstand	65
Abbildung 37: Benutzeroberfläche Durchführung Kalibrierung	65
Abbildung 38: Picht-Angle: 15°, Yaw-Angle: -90°	66
Abbildung 39: Picht-Angle: 15°, Yaw-Angle: -70°	67
Abbildung 40: Struktur der Kalibrierdaten	68
Abbildung 41: Eingabe Benutzeroberfläche Auswertung der Kalibrierung	68
Abbildung 42: Output Auswertung Kalibrierung	69
Abbildung 43: Aufbau der Messung	70
Abbildung 44: Anordnung der gewählten Punkte und Linien bei der Messung	71
Abbildung 45: Eingabe Programm Umrechnung der Spannungen in Geschwindigkeiten	73
Abbildung 46: Vergleich Mittelwert Geschwindigkeitskomponente U	74
Abbildung 47: Vergleich Mittelwert Geschwindigkeitskomponente V	74
Abbildung 48: Vergleich Mittelwert Geschwindigkeitskomponente W	75
Abbildung 49: Phasengemittelte Geschwindigkeitskomponente U für eine Rotorumdrehung	76
Abbildung 50: Phasengemittelte Geschwindigkeitskomponente V für eine Rotorumdrehung	77
Abbildung 51: Phasengemittelte Geschwindigkeitskomponente W über eine Rotorumdrehung	77
Abbildung 52: Phasengemittelter Betrag der Geschwindigkeit und gemittelter Betrag der Geschwindigkeit über eine Rotorumdrehung	78
Abbildung 53: Phasengemittelter Turbulenzgrad über eine Rotorumdrehung	79
Abbildung 54: Horizontaler, phasengemittelter Drehwinkel, ω , der Strömung	80
Abbildung 55: : Startbenutzeroberfläche	92
Abbildung 56: Eingabefenster für Name und Zielort	92
Abbildung 57: Eingabefenster Autor und Name	93
Abbildung 58: Systemkonfiguration Startfenster	93

Abbildung 59: Einrichten Messsystem	94
Abbildung 60: Systemkonfiguration nach dem Einrichten des Messsystems	94
Abbildung 61: Sensorverpackung	95
Abbildung 62: Systemkonfiguration nach Einrichten des Sensors	95
Abbildung 63: Fertige Systemkonfiguration.....	96
Abbildung 64: Hardwarekonfiguration	96
Abbildung 65: Overheat Ajustment.....	97
Abbildung 66: Calibrator Unit setzen.....	98
Abbildung 67: Geschwindigkeitskalibrierung Grundeinstellungen.....	99
Abbildung 68: Einspannung Sensor	100
Abbildung 69: Hauptfenster Geschwindigkeitskalibrierung	100
Abbildung 70: Ablauf Geschwindigkeitskalibrierung.....	101
Abbildung 71: Fehleranalyse.....	101
Abbildung 72: Daten Geschwindigkeitskalibrierung	102
Abbildung 73: Startfenster Winkelkalibrierung	103
Abbildung 74: Hauptfenster Winkelkalibrierung	104
Abbildung 75: Winkelkalibrierung nach Durchführung	105
Abbildung 76: Manipulation der Werte der Winkel	105
Abbildung 77: Error Analysis öffnen	106
Abbildung 78: Verläufe Winkelkalibrierung.....	107
Abbildung 79: Conversion Setup.....	107
Abbildung 80: 3D Probe Reduction Options.....	107
Abbildung 81: Conversion Level.....	108
Abbildung 82: Run online und StreamLine Automatic Calibrator Tool	108
Abbildung 83: Run Measurement.....	109
Abbildung 84: Run Measurement Setup	110
Abbildung 85: Run Measurement Hardware Setup.....	110
Abbildung 86: Run Measurement Probe Positioning Setup	111
Abbildung 87: Run Measurement A-D-Device Setup	111
Abbildung 88: Run Measurement Scheduling Setup.....	112
Abbildung 89: Export Data Hauptmenü.....	113
Abbildung 90: Export Data Probes	113

Abbildung 91: Export Data Options	114
Abbildung 92: Programm zur Kalibrierung: Initialisierung	116
Abbildung 93: Programm zur Kalibrierung: Eingabe der Parameter Front Panel.....	117
Abbildung 94: Programm zur Kalibrierung: Eingabe der Parameter Block Diagramm.	117
Abbildung 95: Control.vi	118
Abbildung 96: Programm zur Kalibrierung: Einstellen des Widerstands	119
Abbildung 97: Programm zur Kalibrierung: Einstellen der SC- und CTA-Parameter	120
Abbildung 98: Set_CTA_and_SC_Parameter.vi	121
Abbildung 99: Programm zur Kalibrierung: Befehl zur Aktivierung der Brücke Block-Diagramm.....	122
Abbildung 100: Programm zur Kalibrierung: Befehl zur Aktivierung der Brücke Front Panel	122
Abbildung 101: Programm zur Kalibrierung: Aktivierung der Brücke	123
Abbildung 102: Programm zur Kalibrierung: Erstellen des Text-Files.....	123
Abbildung 103: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten Front Panel.....	124
Abbildung 104: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Warten auf Befehl zum Start der Kalibrierung.....	125
Abbildung 105: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Messung der relevanten Parameter.....	125
Abbildung 106: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Spannungsmessung	126
Abbildung 107: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Erneute Messung der Parameter und Mittelung dieser Werte	127
Abbildung 108: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Warten auf Eingabe für weiteres Vorgehen	128
Abbildung 109: Programm zur Kalibrierung: Brücke deaktivieren.....	128
Abbildung 110: Programm zur Kalibrierung: Session beenden.....	129
Abbildung 111: Programm zur Messung: Initialisierung	130
Abbildung 112: Programm zur Messung: Daten einlesen: Front Panel	131
Abbildung 113: Daten_Probe.vi.....	132
Abbildung 114: Programm zur Messung: Daten einlesen: Block Diagramm.....	132
Abbildung 115: Programm zur Messung: Export Basic Data: Block Diagramm.....	133
Abbildung 116: Programm zur Messung: Spannungen einlesen: Front Panel.....	134

Abbildung 117: Programm zur Messung: Spannungen einlesen: Spannungen einlesen: Befehl Messung starten und Brücke aktivieren	135
Abbildung 118: Programm zur Messung: Spannungen einlesen: Spannungen einlesen: Messung der Spannungen und schreiben von diesen in ein Text-File.....	136
Abbildung 119: Measurement_Final.vi: Start Measurement	137
Abbildung 120: Measurement_Final.vi: Messung der Spannungen und weiterer Parameter	138
Abbildung 121: Measurement_Final.vi: Globale Variable „Next Move allowed“ auf True setzen“.....	139
Abbildung 122: Measurement_Final.vi: Globale Variable “Start Measurement” auf False setzen.....	139
Abbildung 123: Struktur der Kalibrierdaten bei alternativer Auswertemethode	160
Abbildung 124: Kennfeld der 3D-Kalibrierung (Kurten, 2011)	162
Abbildung 125: Alternative Auswertung: Fehler und Vergleich Massenstromdichten	163
Abbildung 126: Darstellung dimensionsloser Kennzahlen	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Genauigkeit des einfachen und erweiterten Potenzgesetzes für Geschwindigkeiten im Bereich 5-50 m/s (Bruun, 1995)	22
Tabelle 2: Genauigkeit der Polynom Gleichung verschiedenen Grades für Geschwindigkeiten im Bereich 5-50 m/s (Bruun, 1995)	23

Anhang

Anhang 1: Anleitung zur Durchführung der Messung im StreamWare Pro.....	91
Anhang 2: Vis Programm zur Kalibrierung	115
Anhang 3: Vis Programm zur Messung	130
Anhang 4: Matlab Code Auswertung Kalibrierung mit Pitch-und Yaw-Faktoren	141
Anhang 5: Matlab Code Umrechnung der Spannungsdaten in Geschwindigkeitsdaten mittels Pitch- und Yaw-Faktoren.....	157
Anhang 6: Alternative Kalibrier- und Auswertemethode.....	160
Anhang 7: Matlab Code Auswertung der Kalibrierung mit dimensionslosen Kennzahlen (Alternative Auswertemethode)	165
Anhang 8: Umrechnung der Spannungsdaten in Geschwindigkeitsdaten mit dimensionslosen Kennzahlen (Alternative Auswertemethode).....	174
Anhang 9: Matlab Code Instationäre Auswertung:	176

Anhang 1: Anleitung zur Durchführung der Messung im StreamWare Pro

Die Messung mit Hilfe des Programms StreamWare Pro erweist sich als einfache und sichere Methode, um die Geschwindigkeitsermittlung mittels CTA durchzuführen. Der große Nachteil des Programms besteht darin, dass die Traversierung manuell erfolgen muss, da die Traversierung nicht kompatibel mit dem Programm ist und dass die Verarbeitung von großen Datenmengen relativ schwierig und aufwendig ist. Bei wenig aufwendigen Messungen mit einer geringen Anzahl an Messpunkten wird jedoch empfohlen, die Messung mittel StreamWare Pro Software durchzuführen.

Die Arbeitsschritte in der Software können in fünf Punkte Unterteilt werden:

- Anlegen eines Projekts
- Systemkonfiguration
- Hardwarekonfiguration
- Calibrator Unit setzen
- Geschwindigkeitskalibrierung
- Winkelkalibrierung
- Überprüfen der Einstellungen mittels „Run online“
- Messung
- Export Data

Um einen reibungsfreien Ablauf des Programms zu garantieren, wird empfohlen die Schritte in der oben angeführten Reihenfolge durchzuführen.

Anlegen eines Projekts

Nach dem Öffnen der StreamWare Pro Software erscheint die in Abbildung 55 dargestellte Benutzeroberfläche.

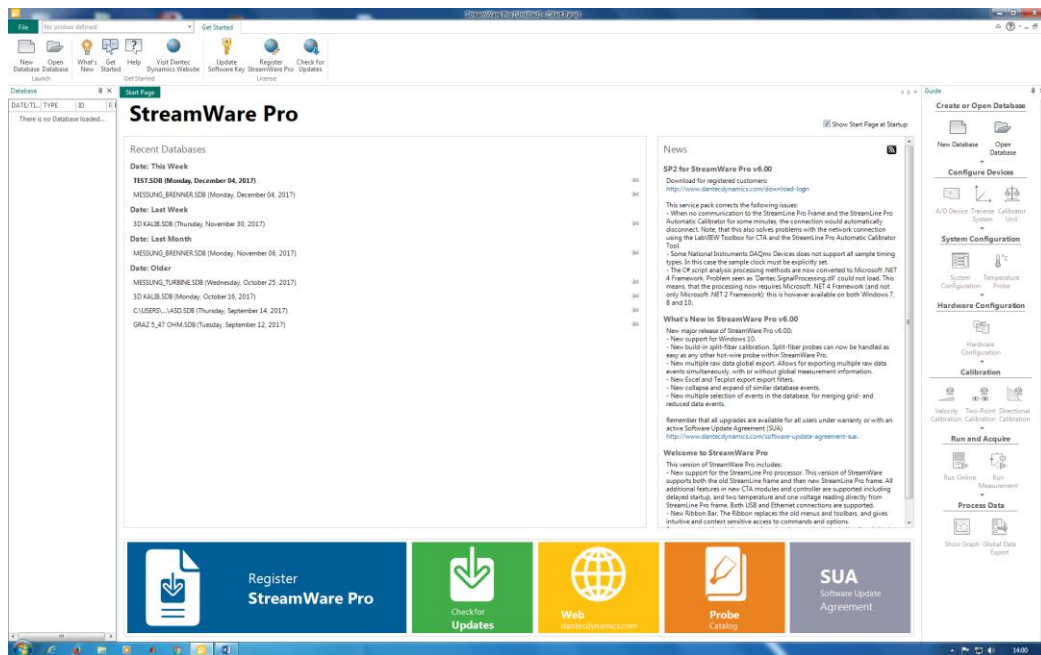


Abbildung 55: : Startbenutzeroberfläche

Um ein neues Projekt anzulegen, muss im oberen linken Eck der Button „New Database“ gedrückt werden. Nach dem Drücken dieses Buttons erscheint das Fenster, welches in Abbildung 56 dargestellt ist. In diesem Fenster muss der Name des Projekts und der Speicherzielort eingegeben werden.

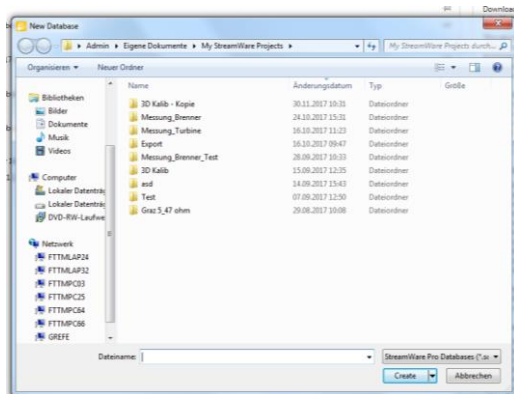


Abbildung 56: Eingabefenster für Name und Zielort

Nach der Bestätigung mittels Ok Button erscheint ein weiteres Fenster, welches in Abbildung 57 dargestellt ist. In diesem Fenster kann der Autor und der Projekt ID Name eingegeben werden.

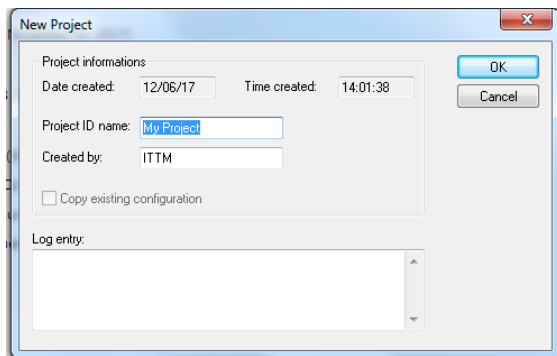


Abbildung 57: Eingabefenster Autor und Name

Nach dem erneuten Bestätigen mittel Ok Taste ist das Projekt erstellt.

Systemkonfiguration

Nachdem ein Projekt angelegt wurde, fragt das Programm automatisch, ob man eine Systemkonfiguration durchführen möchte. Sollte dies nicht der Fall sein oder die Systemkonfiguration soll zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden, kann diese auch in der Leiste auf der rechten Seite des Bildschirms gestartet werden.

Nach dem Start der Systemkonfiguration erscheint das Fenster aus Abbildung 58

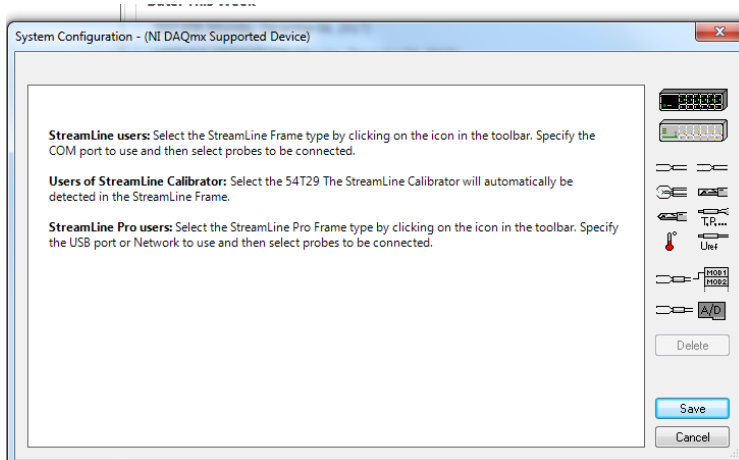


Abbildung 58: Systemkonfiguration Startfenster

Messsystem einrichten

Der erste Schritt der Systemkonfiguration ist das Einrichten des Messsystems. Dazu wird der in Abbildung 59 eingekreiste Button gedrückt.

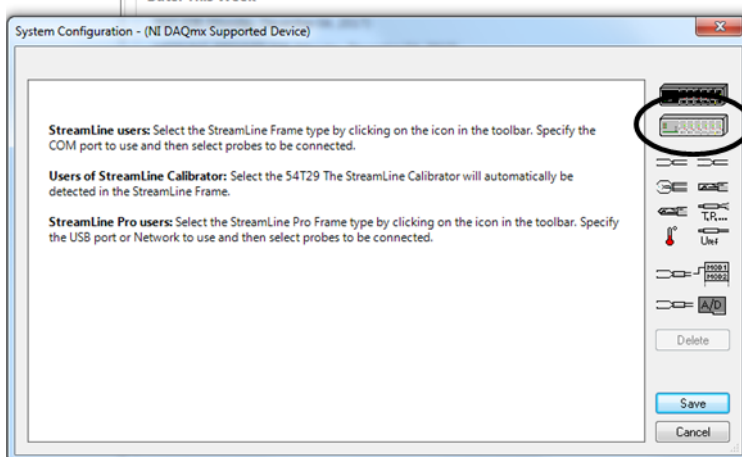


Abbildung 59: Einrichten Messsystem

Im nächsten Fenster wird die voreingestellte Auswahl mit Ok bestätigt und das Messsystem ist eingerichtet.

Sensor einrichten

Nach dem Einrichten des Messsystems sollte die Systemkonfiguration ähnlich aussehen wie in Abbildung 60 ersichtlich.

Um nun die 3W-Sonde einzurichten, wird auf den markierten Button in Abbildung 60 geklickt. Im darauffolgenden Fenster sind alle Sensoren aufgelistet, die in der Datenbank der Software gespeichert sind. Der am Institut verwendete Sensor wird mit „55R97 new“ ausgewählt. Durch die Bestätigung mit Ok wird die Auswahl übernommen.

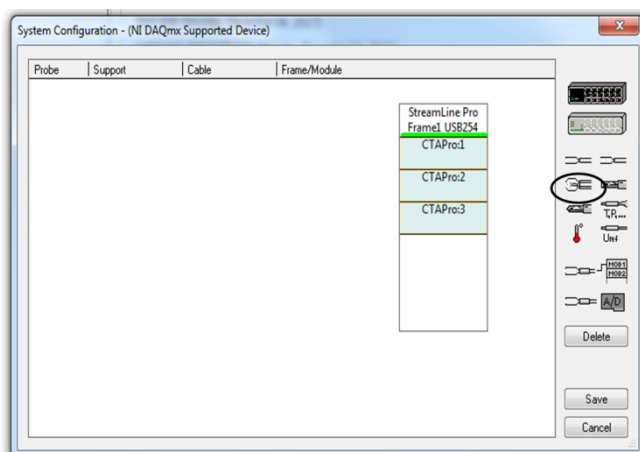


Abbildung 60: Systemkonfiguration nach dem Einrichten des Messsystems

Im darauffolgenden Fenster wird die Auswahl 55H27 getätigt und wieder mit Ok bestätigt. Im nächsten Schritt wird eine Kabellänge von 4 Metern ausgewählt und wieder mit Ok bestätigt. Zuletzt müssen noch die spezifischen Widerstände der einzelnen Sensoren eingegeben werden. Diese α -Werte findet man auf dem Deckel der Sensorverpackung wie in Abbildung 61 ersichtlich.



Abbildung 61: Sensorverpackung

Nach der erneuten Bestätigung mit Ok ändert sich die Benutzeroberfläche der Systemkonfiguration wie in Abbildung 62 dargestellt.

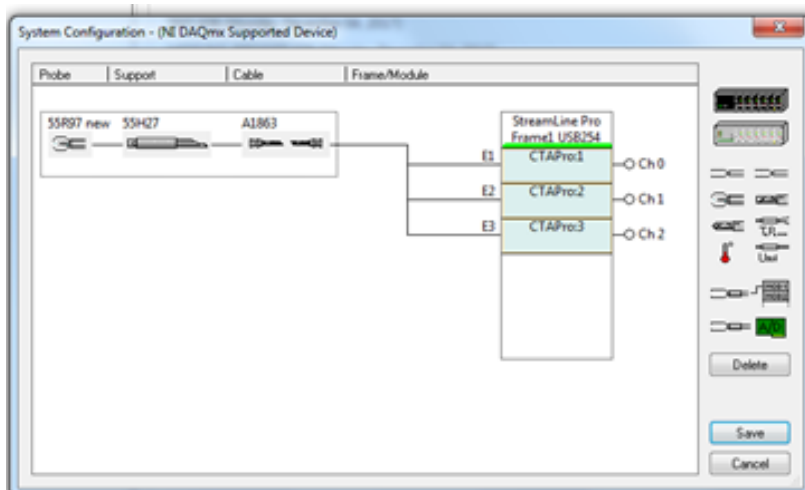


Abbildung 62: Systemkonfiguration nach Einrichten des Sensors

Temperatursensor einrichten

Der letzte Schritt der Systemkonfiguration besteht darin, den Temperatursensor einzurichten. Diese wird durch das Klicken auf das rote Thermometersymbol am rechten Rand des Fensters ausgeführt. Das Temperatursymbol wird dann automatisch mit dem dazugehörigen Eingang verbunden.

Nachdem alle Schritte erfolgreich durchgeführt wurden, sollte die Systemkonfiguration, wie in Abbildung 63 abgebildet, aussehen.

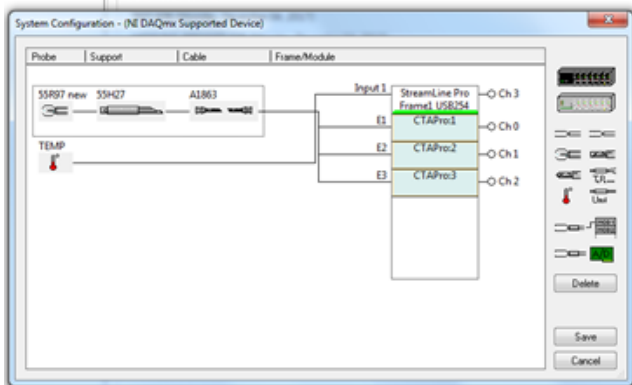


Abbildung 63: Fertige Systemkonfiguration

Durch das Klicken auf den „Save“ Button wird die Systemkonfiguration abgeschlossen. Nachdem das Fenster geschlossen wurde, wird vom Programm gefragt, ob man eine Temperaturkorrektur hinzufügen möchte. Dies wird bestätigt und in dem sich darauffolgend öffnenden Fenster der Temperatursensor ausgewählt. Ob die Systemkonfiguration erfolgreich abgeschlossen wurde, ist daran erkenntlich, ob im Hauptmenü, auf der rechten Seite des Bildschirms, die Systemkonfiguration mit einem grünen Hacken versehen worden ist. Ist dies der Fall, wurde das System erfolgreich eingerichtet.

Hardwarekonfiguration

Nach dem Einrichten der Temperaturkorrektur fragt das Programm automatisch, ob man eine Hardwarekonfiguration durchführen möchte. Dies wird mit ja bestätigt. Alternativ kann die Hardwarekonfiguration auch mit dem entsprechenden Button am rechten Bildschirmrand gestartet werden.

Nach einer kurzen Ladezeit erscheint das in Abbildung 64 dargestellte Fenster.

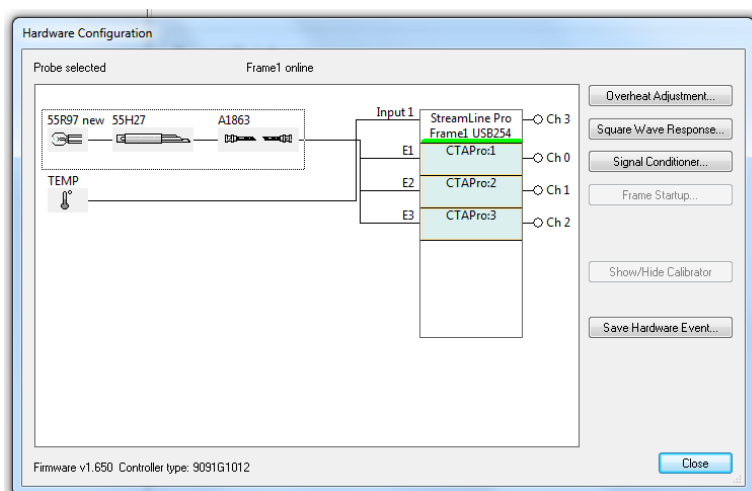


Abbildung 64: Hardwarekonfiguration

Um die Widerstände der einzelnen Kabel und Sensoren auszumessen, muss auf Overheat Adjustment geklickt werden. Das Fenster, welches nach dem Klick erscheint, ist in Abbildung 65 ersichtlich.

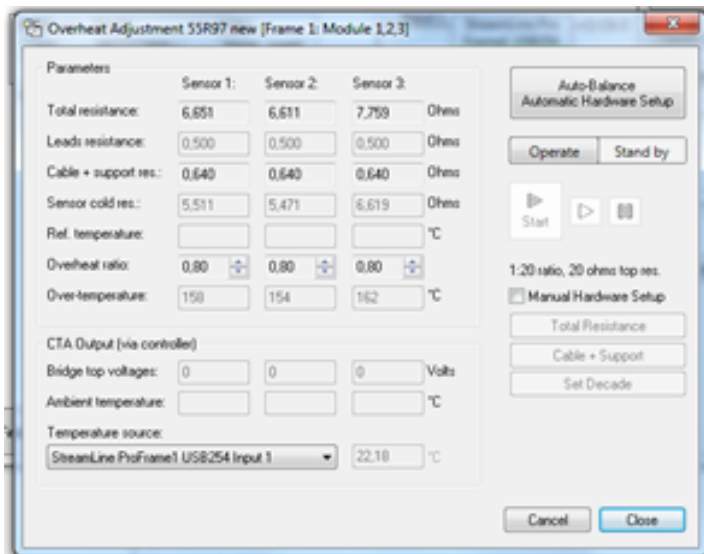


Abbildung 65: Overheat Adjustment

Sollte bei der Messung eine höhere Temperatur als die Umgebungstemperatur erwartet werden, ist es wichtig, diese in diesem Fenster einzustellen. Dies kann entweder manuell geschehen oder durch die Auswahl eines entsprechenden Temperatursensors. Die Messung der Widerstände kann mit dem Button Auto-Balance gestartet werden.

Nachdem die Messung der Widerstände beendet wurde, kann mit „Close“ das Fenster geschlossen werden. Auch das Fenster aus Abbildung 64 kann geschlossen werden.

Durch das Schließen der beiden Fenster fragt das Programm, ob das Hardware-Setting gespeichert werden soll. Dies wird mit „Ja“ bestätigt und im Anschluss wird das Hardware-Setting auf Nachfrage auf „Current default“ gesetzt.

Nach erfolgreicher Durchführung dieser Schritte erscheint das Hardware-Setting in der linken Spalte mit fetten Buchstaben. Die fetten Buchstaben bedeuten, dass das Setting auf „Current default“ gesetzt wurde und bei der Umrechnung in die Geschwindigkeit verwendet wird.

Wie bereits bei der Systemkonfiguration erwähnt, kann man anhand des grünen Hackens im Hauptmenü erkennen, ob die Einstellungen erfolgreich durchgeführt wurden.

Kalibrator Einheit setzen

In diesem Schritt muss dem System mitgeteilt werden, welche Einheit es zur Kalibrierung der Sonde verwenden kann. Da mit dem System ein automatischer Kalibrierkanal mitgeliefert wurde, wird dieser auch verwendet. Dazu wird, das in Abbildung 66 markierte Symbol am rechten Bildschirmrand gedrückt. Danach öffnet sich das, ebenfalls in Abbildung 66 ersichtliche Feld, in dem der „Automatic Calibrator“ ausgewählt werden soll. Durch die Bestätigung mit Ok wird dieser in die Software übernommen und das markierte Symbol aus Abbildung 66 wird mit einem grünen Hacken versehen.

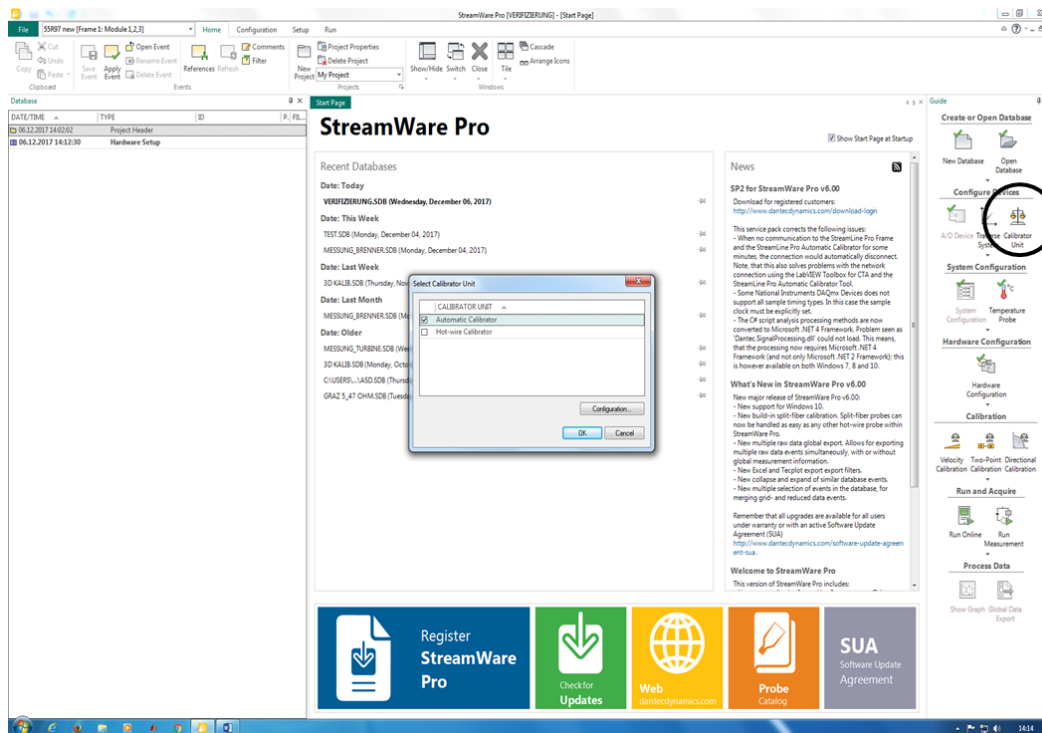


Abbildung 66: Calibrator Unit setzen

Geschwindigkeitskalibrierung

Bei der Geschwindigkeitskalibrierung wird ein Zusammenhang zwischen der Spannung am Ausgang des A-D-Wandlers und der im Kalibrierkanal eingestellten Geschwindigkeit hergestellt.

Die Geschwindigkeitskalibrierung wird in der Software wieder mittels Klick auf das entsprechende Symbol am rechten Bildschirmrand gestartet. Nach dem Klick öffnet sich das in Abbildung 67 gezeigte Feld.

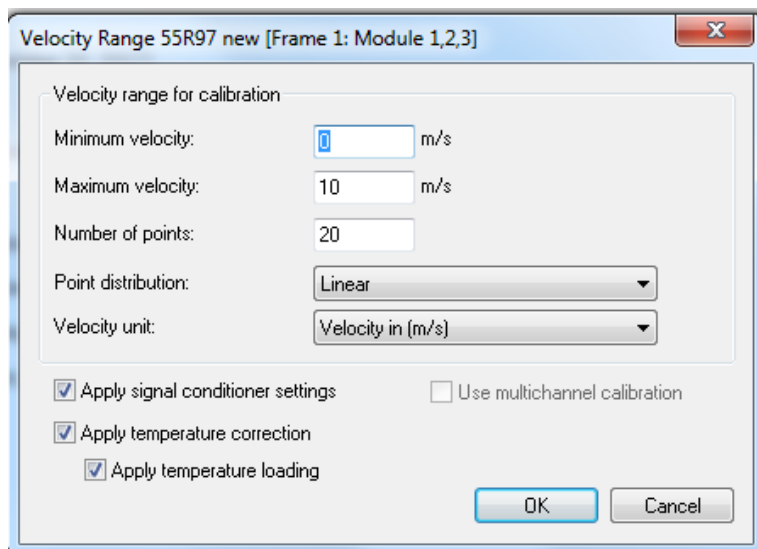


Abbildung 67: Geschwindigkeitskalibrierung Grundeinstellungen

Die Schranken für die Geschwindigkeit, das heißt die maximale und minimale Geschwindigkeit, müssen immer an die zu erwartende Geschwindigkeit des Experiments angepasst werden. Wichtig ist, dass sich alle bei der Messung auftretenden Geschwindigkeiten innerhalb des gewählten Bereichs befinden. Die Anzahl der Kalibrierpunkte ist frei wählbar, jedoch empfiehlt sich eine Auswahl zwischen zwanzig und dreißig Punkten. Die restlichen Einstellungen können, so wie in Abbildung 67 abgebildet, übernommen werden. (E.Jorgensen, 2002)

Nach der Bestätigung mittels Ok Button erscheint ein Fenster, welches angibt, welche Düse für diesen Geschwindigkeitsbereich geeignet ist. Die Düse mit der entsprechenden Nummer muss auf das dafür vorgesehene Gewinde am oberen Ende des Kalibrierkanals aufgeschraubt werden.

Wird in diesem Fenster auf die Düse geklickt, öffnet sich das eigentlich Hauptfenster für die Geschwindigkeitskalibrierung, aus Abbildung 69. Das kleinere, obere Fenster zeigt die Aktivität der Kalibriereinheit, das untere Größere Fenster die gesamten Kalibrierpunkte.

Der Sensor muss wie in Abbildung 68 in der dafür vorgesehenen Vorrichtung über dem Ausgang des Kalibrierkanals eingespannt werden. Die Ausrichtung des Sensors sollte nach Möglichkeit durch eine Konstruktion am Schaft, zum Beispiel ein rechteckiger Würfel, gekennzeichnet werden, um zu garantieren, dass der Sensor bei der Messung und Kalibrierung gleich ausgerichtet ist.



Abbildung 68: Einspannung Sensor

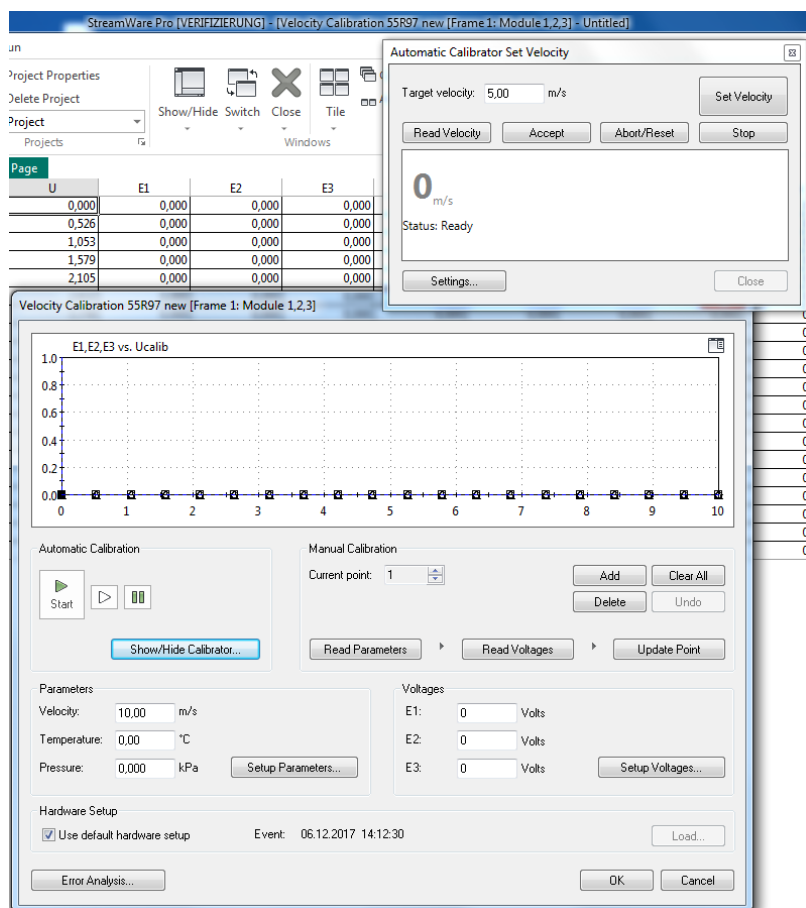


Abbildung 69: Hauptfenster Geschwindigkeitskalibrierung

Nach der korrekten Einspannung und Ausrichtung des Sensors kann auf „Start“ geklickt werden. Im nächsten Fenster kann noch ausgewählt werden, ob ein, mehrere oder alle Punkte kalibriert werden sollen.

Das Programm führt die gesamte Kalibrierung automatisch durch. Je nach Anzahl der Punkt kann dies einige Zeit in Anspruch nehmen. Wie weit die Kalibrierung vorgeschritten ist, ist an dem Graph im oberen Bereich des Fensters ersichtlich. Ist ein Punkt kalibriert, wird dieser

nach oben gezogen, wie in Abbildung 70 gezeigt. Am Ende des Kalibriervorgangs müssen alle Punkte nach oben gezogen worden sein.

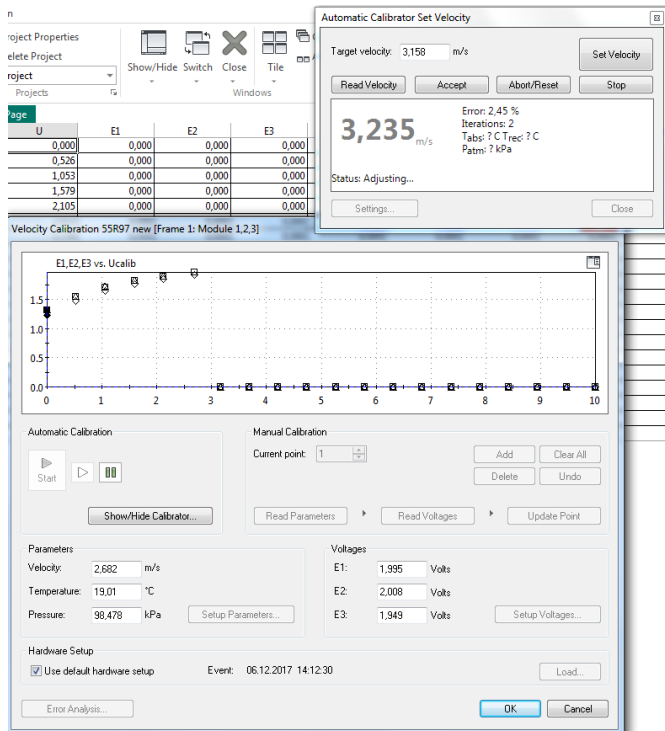


Abbildung 70: Ablauf Geschwindigkeitskalibrierung

Die Software bietet auch die Möglichkeit der Fehleranalyse. Diese wird geöffnet, indem der Button „Error Analysis“ im linken unteren Eck gedrückt wird. Das Fenster, welches sich dann öffnet, wird in Abbildung 71 gezeigt. In diesem Fenster gibt es die Möglichkeit, die Fehler in jedem Punkt zu analysieren.

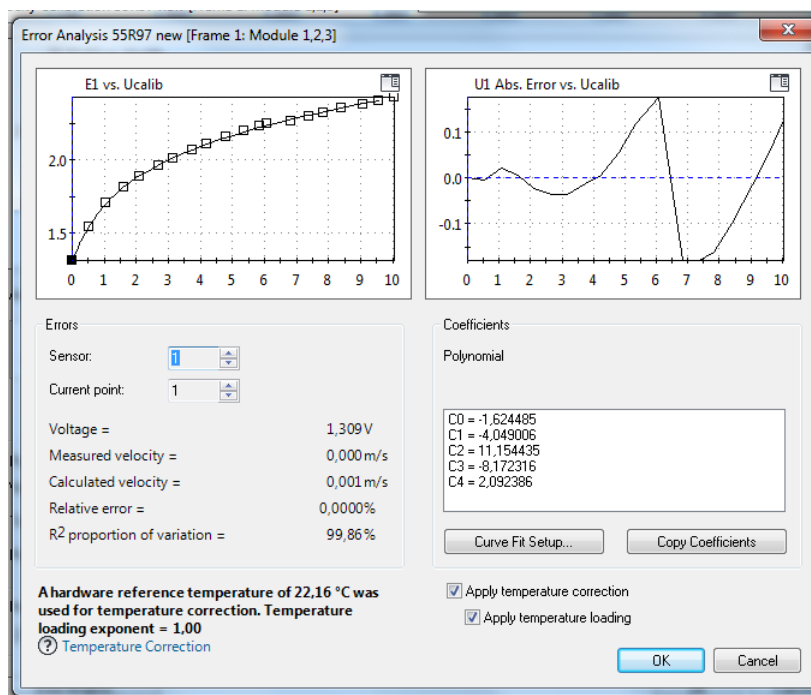


Abbildung 71: Fehleranalyse

Ist man mit einem Kalibrierpunkt nicht zufrieden, kann dieser im vorherigen Fenster nachkalibriert werden.

Bei zufriedenstellender Kalibrierung könne alle Fenster geschlossen werden und im Hauptmenü erscheint eine Tabelle mit allen aufgenommenen Daten der Kalibrierung, wie in Abbildung 72 ersichtlich.

DATE/TIME	TYPE	ID	E1	E2	E3	T(C)	PI(Pa)	E1corr	E2corr	E3corr	U1calc	U2calc	U3calc	
06.12.2017 14:02:02	Project Header		0.000	1.309	1.324	1.227	0.000	0.000	1.309	1.324	1.227	0.001	0.001	0.001
06.12.2017 14:02:02	Project Header		0.532	1.568	1.590	1.496	18.985	98.484	1.541	1.562	1.470	0.515	0.515	0.516
06.12.2017 14:12:30	Hardware Setup		1.056	1.724	1.753	1.639	19.997	98.477	1.704	1.723	1.630	1.065	1.064	1.062
			1.602	1.845	1.859	1.794	19.001	98.476	1.813	1.827	1.763	1.630	1.608	1.609
			2.116	1.933	1.936	1.874	19.007	98.477	1.890	1.902	1.842	2.090	2.093	2.092
			2.682	1.995	2.008	1.940	19.008	98.478	1.961	1.973	1.915	2.640	2.642	2.640
			3.100	2.049	2.061	2.004	19.014	98.482	2.013	2.025	1.969	3.118	3.120	3.120
			3.745	2.107	2.120	2.064	19.014	98.477	2.071	2.083	2.028	3.726	3.728	3.728
			4.214	2.149	2.161	2.106	19.020	98.481	2.112	2.124	2.070	4.212	4.212	4.212
			4.816	2.199	2.212	2.157	19.027	98.477	2.161	2.174	2.120	4.871	4.868	4.871
			5.365	2.240	2.254	2.200	19.034	98.481	2.202	2.215	2.162	5.485	5.475	5.487
			5.833	2.272	2.287	2.232	19.038	98.485	2.233	2.248	2.194	5.995	5.987	5.996
			6.071	2.288	2.302	2.247	19.043	98.488	2.289	2.293	2.239	6.252	6.241	6.253
			6.839	2.311	2.326	2.271	19.045	98.488	2.272	2.287	2.232	6.665	6.661	6.666
			7.278	2.340	2.356	2.300	19.053	98.486	2.300	2.316	2.261	7.206	7.211	7.196
			7.815	2.364	2.381	2.324	19.051	98.484	2.324	2.340	2.284	7.689	7.684	7.670
			8.412	2.395	2.414	2.355	19.054	98.475	2.355	2.372	2.315	8.320	8.300	8.320
			9.053	2.428	2.445	2.387	19.049	98.479	2.387	2.404	2.346	9.039	9.056	9.036
			9.574	2.453	2.469	2.412	19.045	98.473	2.411	2.428	2.371	9.624	9.598	9.625
			10.045	2.475	2.491	2.434	19.039	98.471	2.433	2.449	2.392	10.139	10.151	10.170

Abbildung 72: Daten Geschwindigkeitskalibrierung

Diese Daten werden gespeichert, indem die Tabelle geschlossen wird. Das Programm fragt dann, ob die Kalibrierung gespeichert werden soll, was der Fall ist. Des Weiteren sollte die Kalibrierung als „Current Default“ gesetzt werden, wie bereits bei der Hardwarekonfiguration durchgeführt. Nach diesen Einstellungen wird die Geschwindigkeitskalibrierung bei der Umrechnung verwendet.

Winkelkalibrierung

Mit der Winkelkalibrierung wird die genaue Geometrie des Sensors ermittelt. Ziel der Kalibrierung ist die Ermittlung der „Pitch“ und „Yaw“ Faktoren, die für diese Geometrie charakteristisch sind. Mithilfe dieser Faktoren kann die Geschwindigkeit der einzelnen Sensoren auf das Sensorkoordinatensystem umgerechnet werden.

Durchführung der Winkelkalibrierung

Die Winkelkalibrierung wird, wie auch die Geschwindigkeitskalibrierung zuvor, auf der rechten Seite des Bildschirms mit dem Button „Directional Calibration“ gestartet. Nachdem der Button geklickt wurde öffnet sich das Fenster, welches in Abbildung 73 abgebildet ist.



Abbildung 73: Startfenster Winkelkalibrierung

Die Einstellungen sollten wie in Abbildung 73 eingestellt werden. Nur beim Feld „expected constant velocity“ muss eine Abschätzung über die erwartete Geschwindigkeit bei der Messung getroffen und diese in das entsprechende Feld eingetragen werden.

Beim nächsten Fenster, das sich öffnet, muss wieder, wie bereits aus der Geschwindigkeitskalibrierung bekannt, die entsprechende Düse am Kalibrierkanal installiert und bestätigt werden. Nach der Bestätigung stellt der Kalibrierkanal automatisch die zuvor eingegebene Geschwindigkeit im Freistrah ein.

Nachdem die Geschwindigkeit eingestellt wurde, öffnet sich ein Fenster, das dem der Geschwindigkeitskalibrierung ähnelt. Dieses Fenster ist in Abbildung 74 ersichtlich.

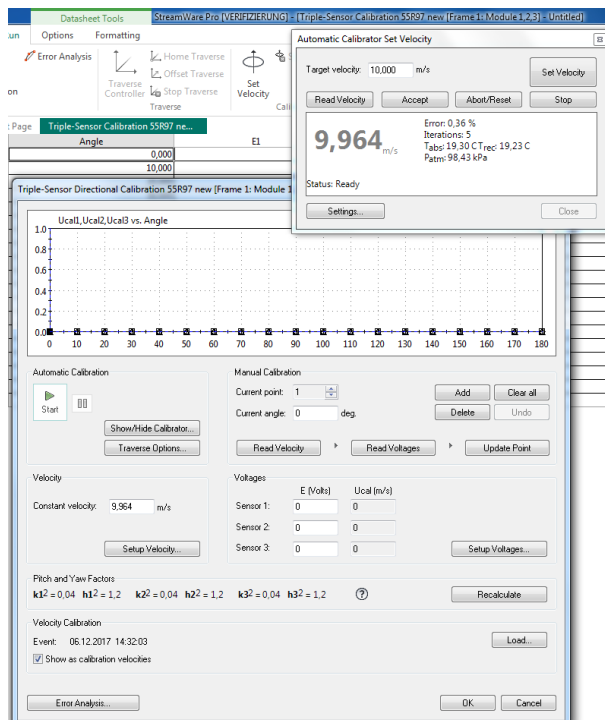


Abbildung 74: Hauptfenster Winkelkalibrierung

Der Sensor muss nun wieder in der entsprechenden Vorrichtung über dem Kalibrierkanal positioniert werden, wie bereits in Abbildung 68 zu sehen war. Wichtig ist dabei, dass die Halterung des am weitesten hervorstehenden Drahtes in Strömungsrichtung ausgerichtet ist. Zusätzlich müssen beide Winkelanzeigen am automatischen Kalibriergerät auf null gestellt werden.

Um die Kalibrierung zu starten, muss wieder der Start Button gedrückt werden. Im darauffolgenden Fenster muss die manuelle Kalibrierung eingestellt und dann den weiteren Anweisungen der Fenster Folge geleistet werden. Zum besseren Verständnis soll noch erwähnt werden, dass es sich bei dem „Pitch-Angle“ um jenen Winkel handelt der ein Kippen des Sensors ermöglicht. Der „Yaw-Angle“ ermöglicht die Drehung des Sensors von 0-360°. Des Weiteren muss gesagt werden, dass nach der zweiten Winkeleinstellung eine Fehlermeldung erscheint. Diese Fehlermeldung kann übergangen werden, da die Software nur für axial angeströmte Sensoren programmiert wurde und es sich bei dem Sensor 55R97 um einen cross flow Sensor handelt. Dieser Fehler wird mit den noch folgenden Einstellungen ausgeglichen.

Nach Beendigung der Kalibrierung sollt das Fenster dem aus Abbildung 75 ähneln.

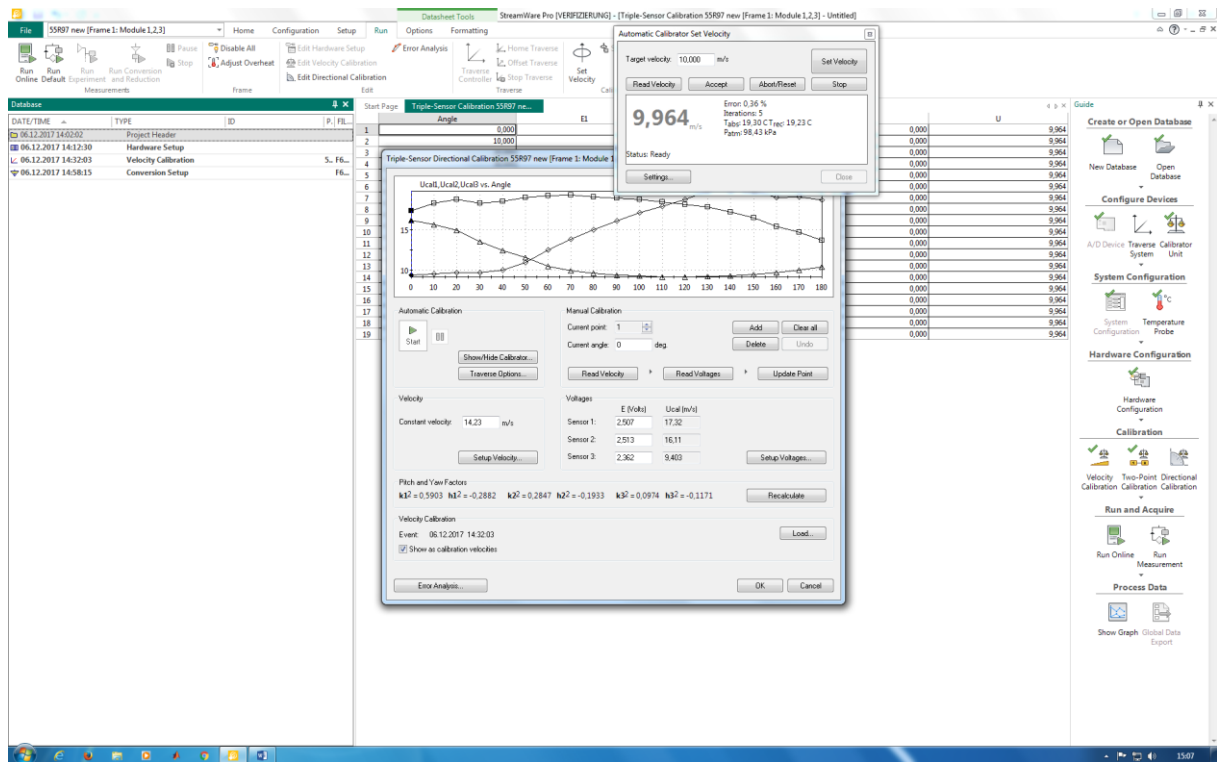


Abbildung 75: Winkelkalibrierung nach Durchführung

Das Fenster wird geschlossen und die Werte in der Tabelle des Hauptfensters wie bei der Geschwindigkeitskalibrierung gespeichert.

Nach der Speicherung erscheint die Kalibrierung am linken Rand des Bildschirms, wo sie durch einen Doppelklick wieder geöffnet werden kann.

Da das Programm die Kalibrierung eines cross flow Sensors eigentlich nicht durchführen kann, muss die erstellt Tabelle manipuliert werden. Dies geschieht dadurch, dass die Werte der Winkel, wie in Abbildung 76 ersichtlich, abgeändert werden.

Start Page	Triple-Sensor Calibration 55R97 ne...						
	Angle	E1	E2	E3	U		
1	-90,000	2,246	2,258	2,120	5,803		
2	-80,000	2,252	2,253	2,122	5,803		
3	-70,000	2,250	2,242	2,119	5,803		
4	-60,000	2,252	2,235	2,125	5,803		
5	-50,000	2,255	2,227	2,136	5,803		
6	-40,000	2,256	2,218	2,147	5,803		
7	-30,000	2,257	2,208	2,160	5,803		
8	-20,000	2,257	2,197	2,172	5,803		
9	-10,000	2,256	2,187	2,182	5,803		
10	0,000	2,257	2,182	2,193	5,803		
11	10,000	2,255	2,176	2,202	5,803		
12	20,000	2,252	2,171	2,206	5,803		
13	30,000	2,245	2,169	2,209	5,803		
14	40,000	2,237	2,170	2,208	5,803		
15	50,000	2,232	2,174	2,209	5,803		
16	60,000	2,226	2,181	2,208	5,803		
17	70,000	2,218	2,187	2,205	5,803		
18	80,000	2,210	2,196	2,203	5,803		
19	90,000	2,201	2,204	2,199	5,803		

Abbildung 76: Manipulation der Werte der Winkel

Durch das erneute Schließen der Tabelle kann die nun veränderte Tabelle als Winkelkalibrierung abgespeichert werden, indem, wie zuvor, die Nachfrage ob die Datei gespeichert werden soll, bestätigt wird.

Überprüfung der Winkelkalibrierung

Zur Überprüfung der Winkelkalibrierung muss die zuvor gespeicherte Tabelle durch Doppelklick am rechten Bildschirmrand wieder geöffnet werden. Unter dem Reiter „Datasheet Tools“ findet sich der Button „Error Analysis“ mit dem das bekannte Fenster von Abbildung 77 wieder geöffnet werden kann.

Als nächster Schritt müssen die Pitch- und Yaw Faktoren aktualisiert werden. Dies geschieht, indem man im Fenster von Abbildung 77 auf „Recalculate“ klickt. Dadurch ändern sich die Werte von h^2 und k^2 links daneben.

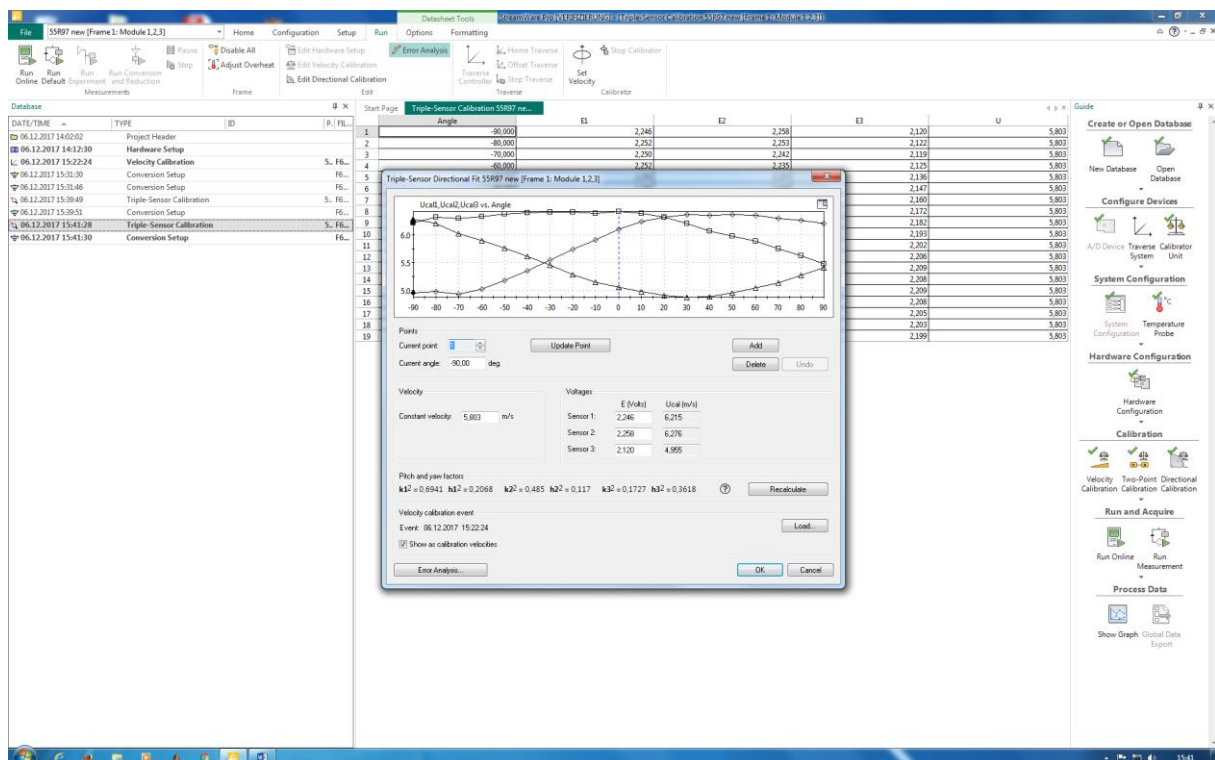


Abbildung 77: Error Analysis öffnen

Durch das Klicken auf den sich im unteren linken Eck befindlichen, Button „Error Analysis“ wird die Fehleranalyse geöffnet.

Bei der Fehleranalyse ist wichtig, auf den Verlauf der Kurven zu achten. Die Punkte sind jene Werte, welche bei der Kalibrierung ermittelt wurden, die durchgezogene Linie eine Musterlösung der Datenbank. Wichtig dabei ist weniger, ob sich die Punkte direkt auf der Linie befinden, als der gleichmäßige Verlauf der Kurven. Diese sollen eine ähnliche Krümmung aufweisen. Beispielhaft sollten die Verläufe der drei Sensoren wie in Abbildung 78 aussehen.



Abbildung 78: Verläufe Winkelkalibrierung

Sollte dies der Fall sein, kann die Fehleranalyse geschlossen werden.

Einstellungen Conversion Setup

Bei der Erstellung der Winkelkalibrierung wird auch immer automatisch ein Conversion Setup erstellt. Dieses wird durch einen Doppelklick auf das entsprechende Setup am linken Bildschirmrand geöffnet.

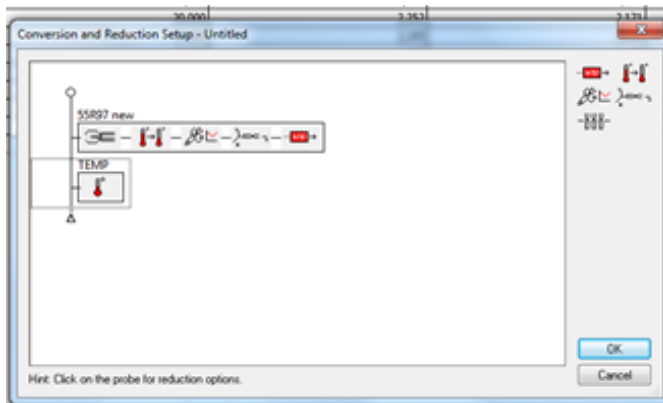


Abbildung 79: Conversion Setup

Das Fenster, welches sich nach dem Doppelklick öffnet, sieht wie jenes aus Abbildung 79 aus. Danach muss doppelt auf das Symbol mit dem Sensor geklickt werden und es öffnet sich das Fenster aus Abbildung 80.

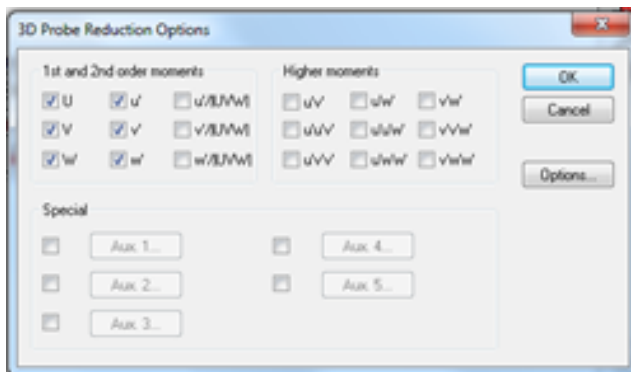


Abbildung 80: 3D Probe Reduction Options

Durch einen Klick auf „Options“ öffnet sich das gesuchte Fenster aus Abbildung 81.

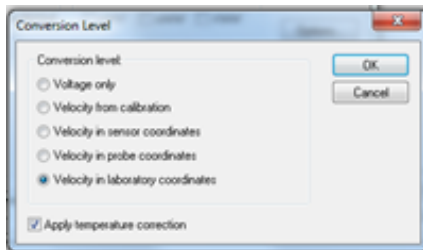


Abbildung 81: Conversion Level

In diesem Fenster muss die Einstellung auf „Velocity in laboratory coordinates“ geändert werden. Nachdem diese Einstellung getätigt wurde, können die Fenster wieder geschlossen werden.

Überprüfen der Einstellungen mittels „Run online“

Die Funktion „Run online“ bietet die Möglichkeit, die Geschwindigkeit in Echtzeit anzuzeigen. Diese Funktion wird, wie alle anderen Funktionen, am rechten Bildschirmrand mit dem entsprechenden Symbol geöffnet. Das Fenster, welches sich dann öffnet, ist in Abbildung 82 abgebildet.

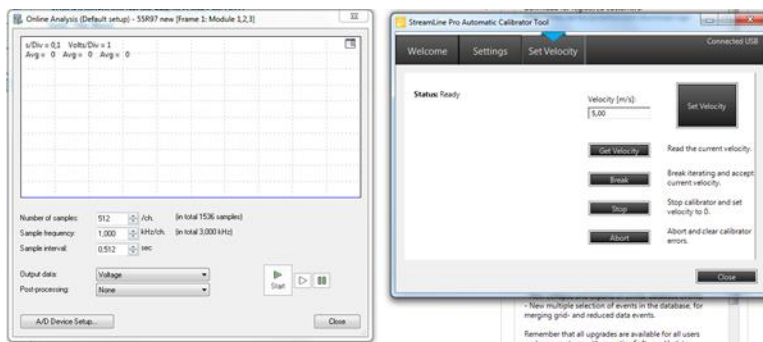


Abbildung 82: Run online und StreamLine Automatic Calibrator Tool

Zusätzlich empfiehlt es sich, das Programm StreamLine Atomic Calibrator Tool zu öffnen. Mit Hilfe dieses Programms ist es möglich, die Geschwindigkeit im Kalibriergerät manuell einzustellen, um einen Vergleichswert für die Messung mit Run online zu haben.

Um nun die Messung mit der eingestellten Geschwindigkeit vergleichen zu können, muss der Sensor noch in der Nullposition positioniert werden. Die Nullposition befindet sich bei einem „Yaw-Angle“ von 90° und einem „Pitch-Angle“ von Null Grad.

In dieser Position sollte bei einer eingestellten Geschwindigkeit von zum Beispiel 5 m/s die U-Komponente der gemessenen Geschwindigkeit ebenfalls ungefähr 5 m/s anzeigen.

Messung

Die Messung in der Software kann über zwei verschiedene Funktionen ausgeführt werden: „Run Experiment“ und „Run Measurement“.

Run Experiment

Die Funktion „Run Experiment“ ist deutlich umfangreicher als die Funktion „Run Measurement“ und bietet eine Vielzahl von Einstellungen. Sollte eine kompatible Traversierung vorhanden sein, so kann diese Funktion eine Steuerung dieser Traversierung ermöglichen. Im Rahmen dieser Anleitung wird jedoch nicht genauer auf diese Funktion eingegangen, sondern auf den StreamWare Pro Installation und User Guide verwiesen, in dem die verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten nachzulesen sind.

Run Measurement

Die Funktion „Run Measurement“ besteht aus einem vorgefertigtem Messablauf, bei dem nur mehr wenige Einstellungen zu tätigen sind, um eine erfolgreiche Messung durchzuführen. Die Funktion wird geöffnet, indem auf das entsprechende Symbol am rechten Bildschirmrand geklickt wird. Nach dem Klicken öffnet sich das Fenster aus Abbildung 83.

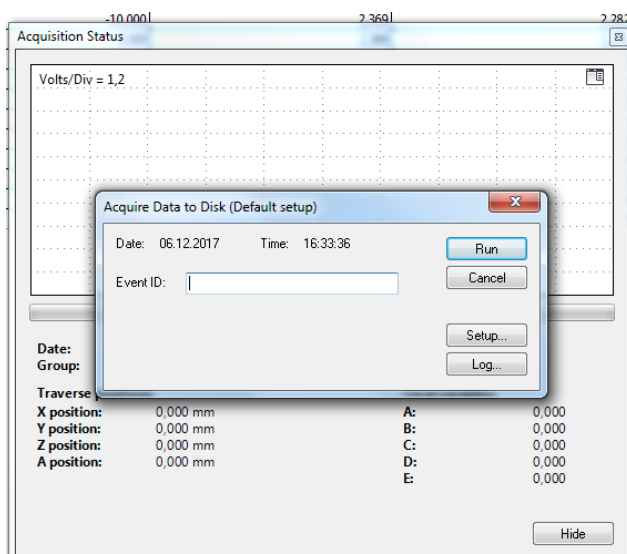


Abbildung 83: Run Measurement

Um Änderungen bzw. Einstellungen am Messablauf durchzuführen, muss der Button „Setup“ geklickt werden. Das sich dann öffnende Fenster wird in Abbildung 84 gezeigt.

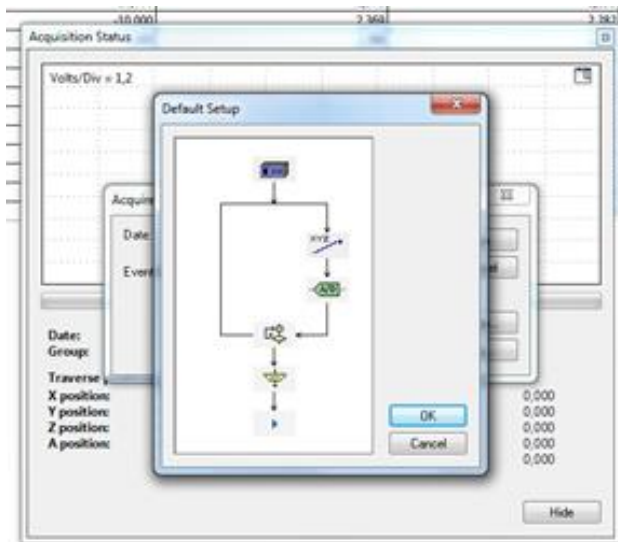


Abbildung 84: Run Measurement Setup

Die verschiedenen Symbole bieten verschiedene Einstellungsmöglichkeiten, die je nach Bedarf angepasst werden können. Die nachfolgend gezeigten Einstellungen können als Vorlage verwendet werden und ermöglichen eine erfolgreiche Messung mit dem Programm. Im Folgenden werden die Einstellungen beim obersten Symbol beginnend bis zum untersten Symbol besprochen.

Hardware Setup

Das Hardware Setup wird durch das Klicken auf das oberste Symbol geöffnet. Zuerst ist in dem Fenster aus Abbildung 85 zu überprüfen, ob das gewünschte Hardware Setup, welches vor der Kalibrierung durchgeführt wurde, verwendet wird. Dies geschieht mittels des Datums in der obersten Zeile. Sollte dort nicht das gewünschte Setup hinterlegt sein, kann dieses mit „Load“ geändert werden.



Abbildung 85: Run Measurement Hardware Setup

Die Einstellungen unter der Überschrift „Options“ sollten so wie in Abbildung 85 gewählt werden, das heißt bei „Enable internalt offset compensation“ und „Enable thermal equalirium delay“ sollte ein Häkchen gemacht werden. Durch Klicken des Ok Buttons wird das Hardware Setup bestätigt

Probe Positioning Setup

Beim Probe Positioning Setup aus Abbildung 86 bieten sich aufgrund der fehlenden Traversierung nur zwei Einstellungsmöglichkeiten, „Do nothing“ oder „Display prompt to input form keyboard“.



Abbildung 86: Run Measurement Probe Positioning Setup

Bei der Einstellung „Do nothing“ führt das Programm alle Messpunkt ohne Unterbrechung hintereinander aus. Das heißt, es gibt keine Möglichkeit zwischen den einzelnen Messpunkten die Messung kurz anzuhalten.

Die Einstellung „Display prompt to input form keyboard“ hingegen ermöglicht die manuelle Eingabe der Position der Sonde zwischen jedem Messpunkt. Die Messung wird während der Eingabe angehalten, was auch eine manuelle Traversierung der Sonde ermöglicht.

A-D-Device Setup

Das A-D-Device Setup wird hauptsächlich genutzt, um die Sampling Frequenz und die Anzahl der Samples einzustellen. Das dazugehörige Fenster ist in Abbildung 87 dargestellt.

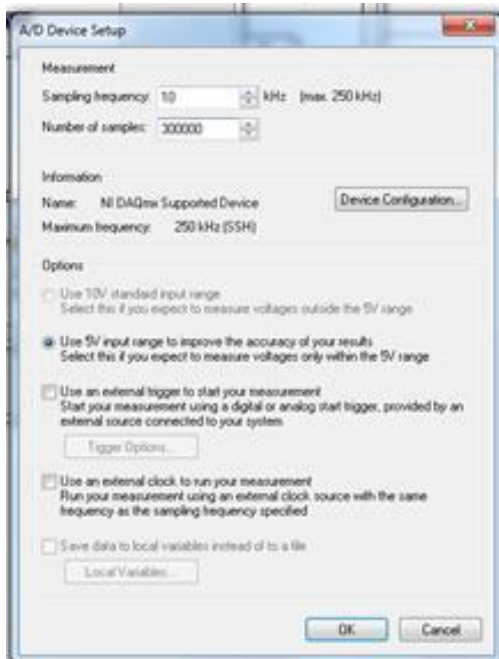


Abbildung 87: Run Measurement A-D-Device Setup

Die Einstellungen unter der Überschrift Options betreffen Einstellungen bezüglich eines externen Triggers. Diese Einstellungen erscheinen jedoch nur sinnvoll, falls eine

automatische Traversierung verwendet wird. Da am Institut keine Traversierung vorhanden ist, welche kompatibel mit der Software ist, können diese Einstellungen übergangen werden.

Scheduling Setup

Die in Abbildung 88 ersichtlichen Einstellungen des Scheduling Setup betreffen Einstellungen bezüglich der Anzahl der Messpunkte und deren Startpunkt. Zuerst muss die Anzahl der Punkte festgelegt werden. Diese kann von unendlich vielen Punkten bis hin zu einem Punkt gewählt werden. Für die Einstellung „Grid dependant“ muss zuerst ein Traversiergitter erstellt werden. Über dieses Gitter wird dann die Anzahl der Punkt bestimmt.

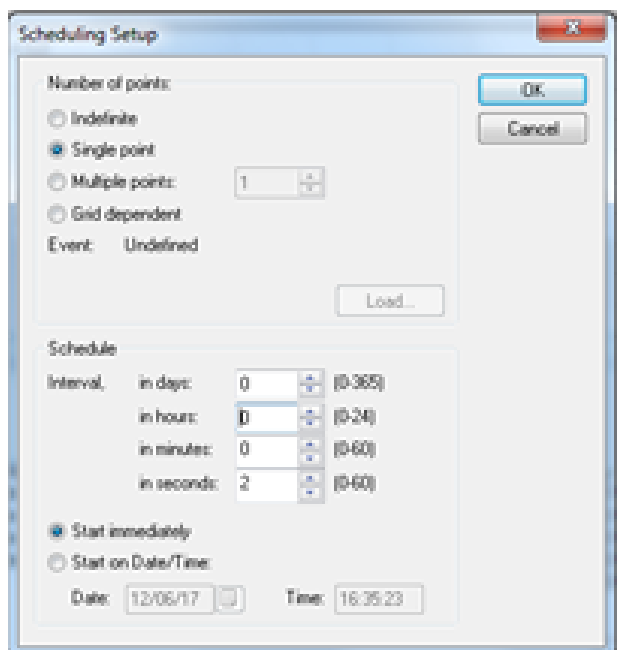


Abbildung 88: Run Measurement Scheduling Setup

Des Weiteren können noch Intervalle definiert werden und der genaue Startzeitpunkt der Messung festgelegt werden.

Messdurchführung

Um die Messung schlussendlich durchzuführen, müssen die Einstellungsfenster geschlossen und im Fenster aus Abbildung 83 auf „Run“ geklickt werden. Die Messung wird anschließend automatisch, entsprechend der getätigten Einstellungen, durchgeführt.

Export Data

Nachdem die Messung abgeschlossen wurde, erscheint der Datensatz am linken Bildschirmrand, wie in Abbildung 89 ersichtlich.

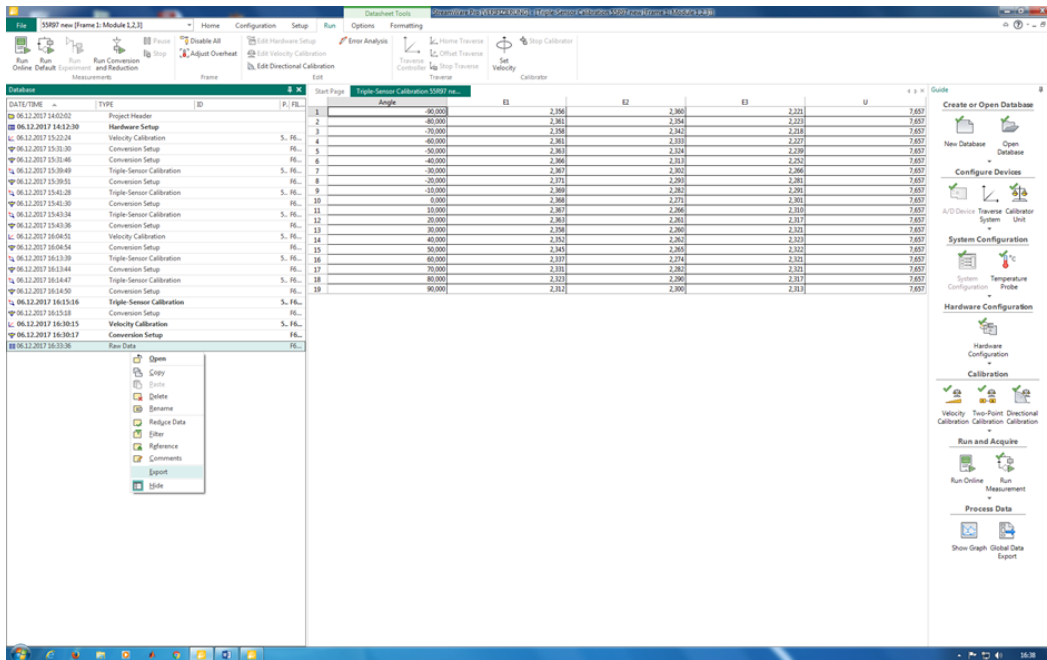


Abbildung 89: Export Data Hauptmenü

In diesem Hauptmenü wird mittels rechtsklick auf die entsprechenden Messergebnisse das Untermenü geöffnet. Dort findet sich der Befehl Export, welcher gedrückt werden muss. Danach öffnet sich das Fenster aus Abbildung 90.

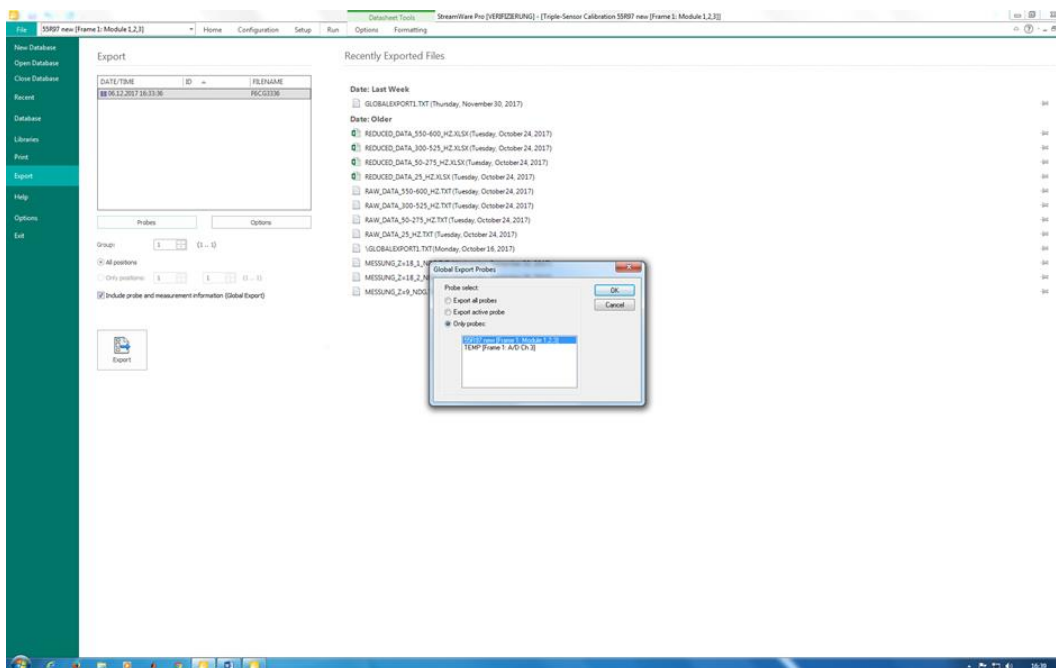


Abbildung 90: Export Data Probes

Für die richtige Ausgabe der Daten müssen mehrere Einstellungen durchgeführt werden. Als erstes muss ausgewählt werden, von welchem Sensor die Daten ausgegeben werden sollen. Zur Auswahl stehen der Temperatursensor sowie die Hitzdrahtsonde. Das Fenster in dem diese Einstellung getätigt werden kann ist in Abbildung 90 ersichtlich und wird durch einen Klick auf den Button „Probes“ geöffnet.

Als nächstes muss noch festgelegt werden, in welcher Form bzw. in welchem Koordinatensystem die Daten ausgegeben werden sollen. Das Fenster aus Abbildung 91 wird mit dem Button Options geöffnet.

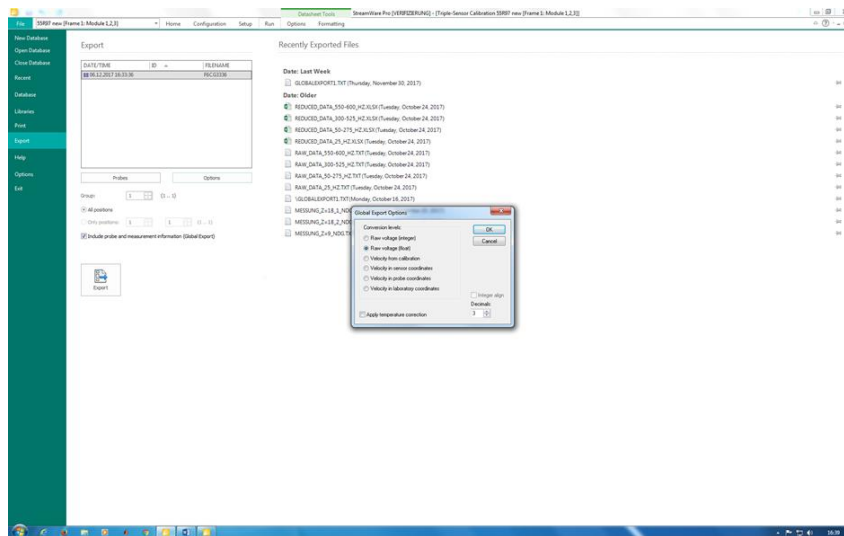


Abbildung 91: Export Data Options

Meistens wird die Geschwindigkeit in Laborkoordinaten gesucht. Die Ausgabe dieser Geschwindigkeit wird mit der Einstellung „Velocity in laboratory coordinates“ getätigt.

Nach Bestätigung dieser Einstellungen muss noch auf „Export“ geklickt werden, um die Daten zu exportieren. Folglich öffnet sich ein Fenster zur Eingabe des Speicherdateipfades und des Dateityps, wie auch aus anderen Programmen bekannt.

Der Export der Daten kann, je nach Dateigröße, einige Zeit in Anspruch nehmen.

Anhang 2: Vis Programm zur Kalibrierung

Bei der Kalibrierung war es notwendig, ein Programm zu schreiben, welches mit dem Kalibrierkanal und dem CTA-System kommuniziert und die relevanten Parameter aufzeichnet und diese in einem Text-File abspeichert.

Das Programm wurde mit Labview geschrieben und kann in folgende Teilbereiche unterteilt werden:

- Initialisierung
- Eingabe der Parameter
- Einstellen des Widerstands
- Einstellen der SC- und CTA-Parameter
- Befehl zur Aktivierung der Brücke
- Aktivierung der Brücke
- Erstellen des Text-Files
- Einlesen der Kalibrierdaten
- Brücke deaktivieren
- Session beenden

Parallel zu den oben beschriebenen Teilbereichen, welche hintereinander in einer „Flat Sequence“ ablaufen, läuft eine Schleife, die die Aktivität der Brücke aktualisiert.

Initialisierung

Die Initialisierung muss zu Beginn jedes Programms durchgeführt werden, sollte eine Kommunikation mit dem CTA-System stattfinden. Wird das Vi „Initialize_allProbes.vi“ aus Abbildung 92 aufgerufen, führt dieses die Initialisierung für alle drei Drähte des Sensors hintereinander durch.

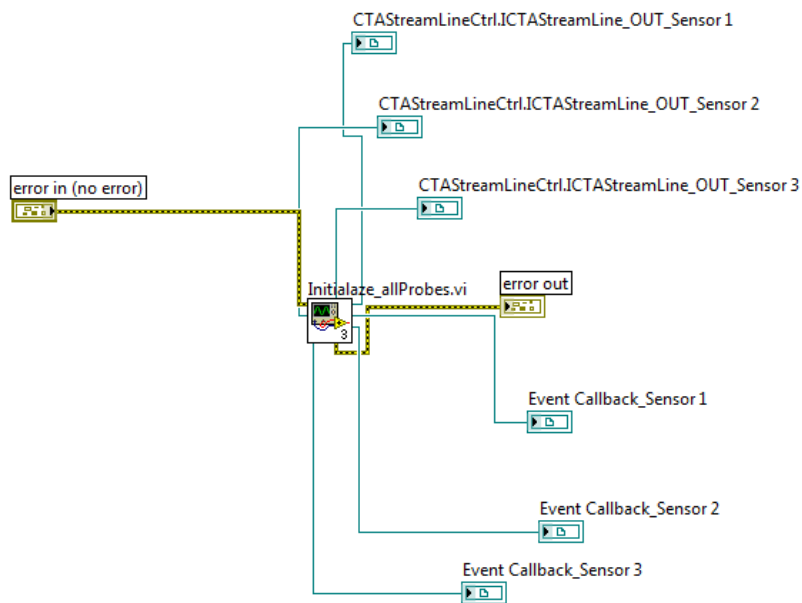


Abbildung 92: Programm zur Kalibrierung: Initialisierung

Der Output des Vis muss als Input für die weiteren Befehle verwendet werden, die mit dem CTA-System kommunizieren.

Eingabe der Parameter

Der Abschnitt Eingabe der Parameter umfasst alle relevanten Parameter des CTA-Systems, die die Spannung am Ausgang des A-D-Wandlers beeinflussen. Dazu zählen unter anderem die verschiedenen Widerstände, Einstellungen bezüglich der SC-Unit und die Einstellung verschiedener Filter. Die Oberfläche zur Eingabe der Parameter wird im Labview als „Front Panel“ bezeichnet und ist in Abbildung 93 dargestellt.

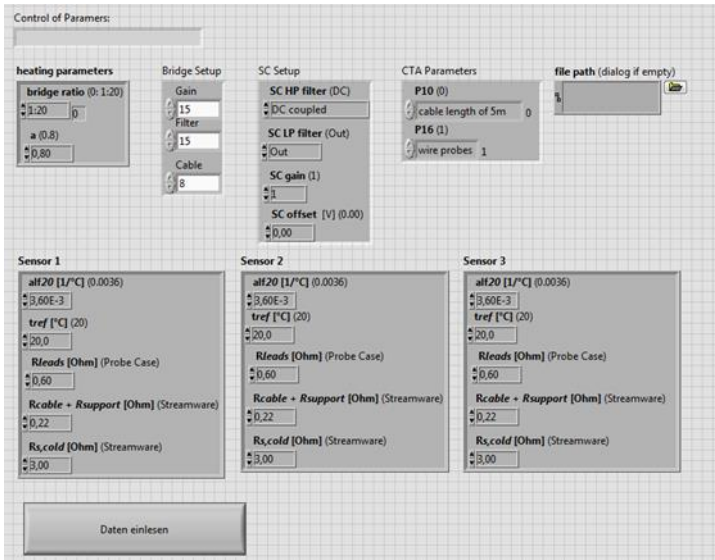


Abbildung 93: Programm zur Kalibrierung: Eingabe der Parameter Front Panel

Die Eingabe der Parameter wird mit dem Button „Daten einlesen“ beendet. Nachdem dieser Button gedrückt wurde, werden die Parameter vom Programm übernommen. Das dazugehörige Block Diagramm ist in Abbildung 94 dargestellt.

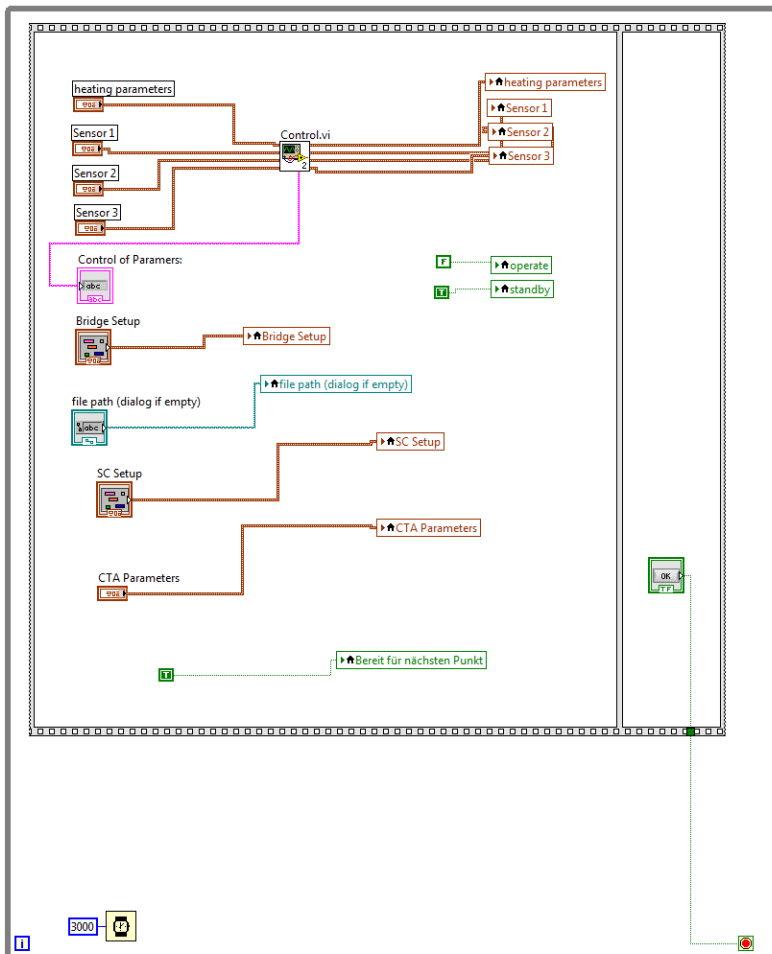


Abbildung 94: Programm zur Kalibrierung: Eingabe der Parameter Block Diagramm.

Bei dem Block Diagramm fällt auf, dass die Parameter der Sensoren eins bis drei und die „Heating Parameter“ das „Control.vi“ passieren müssen.

Control.vi

Dieses Vi kontrolliert die Eingabe der Parameter und vergleicht diese mit vorgegebenen Schranken. Dies soll vor einer falschen Eingabe der Parameter schützen. Sollten sich die Werte der eingegebenen Parameter nicht in den vorgegebenen Schranken befinden, wird dies im Feld „Control of Parameters“ aus Abbildung 93 für kurze Zeit angezeigt und anschließend wird der „falsche“ Wert durch einen vorgegebenen Standardwert abgeändert. Die Schranken der verschiedenen Parameter können aus Abbildung 95 entnommen werden.

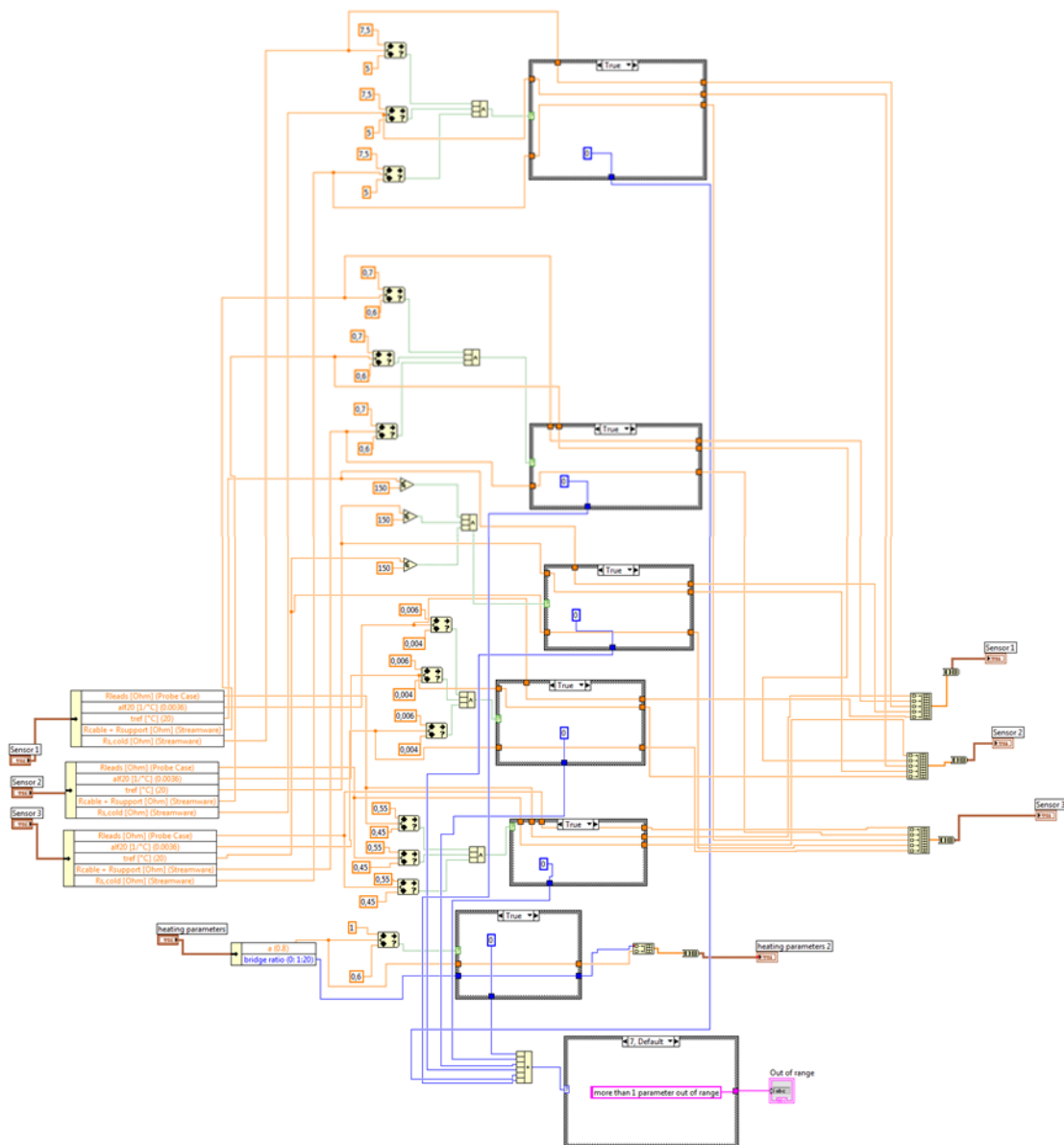


Abbildung 95: Control.vi

Einstellen des Widerstands

Nachdem der Button „Daten einlesen“ gedrückt wurde, wird automatisch der Befehl zum Einstellen des Widerstands im CTA-System aufgerufen. Das dazugehörige Block Diagramm ist in Abbildung 96 dargestellt.

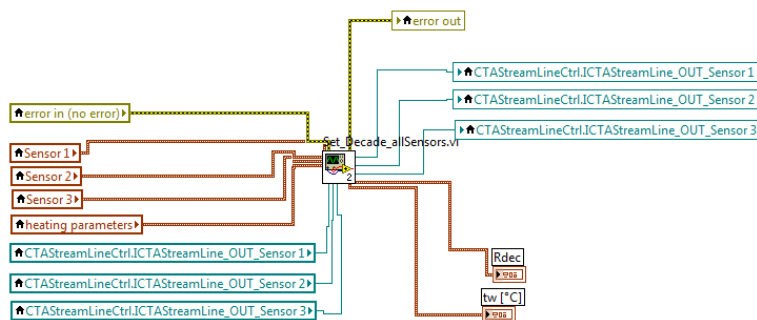


Abbildung 96: Programm zur Kalibrierung: Einstellen des Widerstands

Zusätzlich zur Kommunikation mit dem CTA-System berechnet dieses Vi den Widerstand R_{dec} aus den drei Eingegebenen Widerständen aus Abbildung 93.

Berechnung des Widerstandes R_{dec}

R_{dec} wird als Decade-Widerstand bezeichnet und ist jener Widerstand, der die Temperatur des Drahtes bei aktivierter Brücke festlegt. Zur Berechnung dieses Widerstandes muss zuerst der Widerstand $R_{s,hot}$ berechnet werden. (Dynamics, StreamWare Pro: Installation and User Guide, 2017)

$$R_{s,hot} = (1 + a) * R_{s,cold} \quad (11.1)$$

Zum Widerstand $R_{s,hot}$ müssen noch die weiteren Widerstände des Systems addiert werden.

$$R_{overh} = R_{s,hot} + R_{cable} + R_{support} + R_{leads} \quad (11.2)$$

Zuletzt muss der Widerstand R_{overh} noch mit dem „Bridge Ratio“ multipliziert werden.

$$R_{dec} = BR * R_{overh} \quad (11.3)$$

Einstellen der SC- und CTA-Parameter

Als nächster Schritt folgt die Einstellung der SC- und CTA Parameter. Dieser Schritt folgt automatisch nach Beendigung der Einstellung des Widerstands. Das Block-Diagramm ist in Abbildung 97 dargestellt.

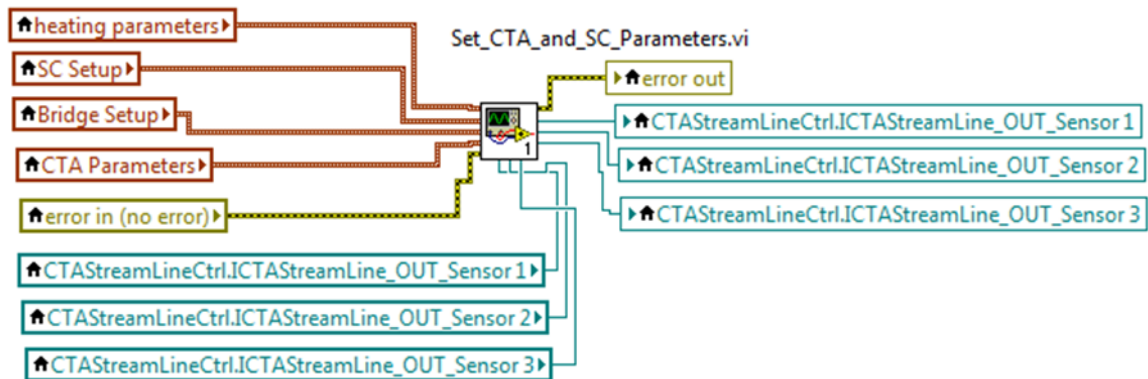


Abbildung 97: Programm zur Kalibrierung: Einstellen der SC- und CTA-Parameter

Um die Einstellungen dieses Vi genauer zu betrachten, ist es notwendig, eine Ebene tiefer zu blicken und das Vi „Set_CTA_and_SC_Parameter.vi zu öffnen.

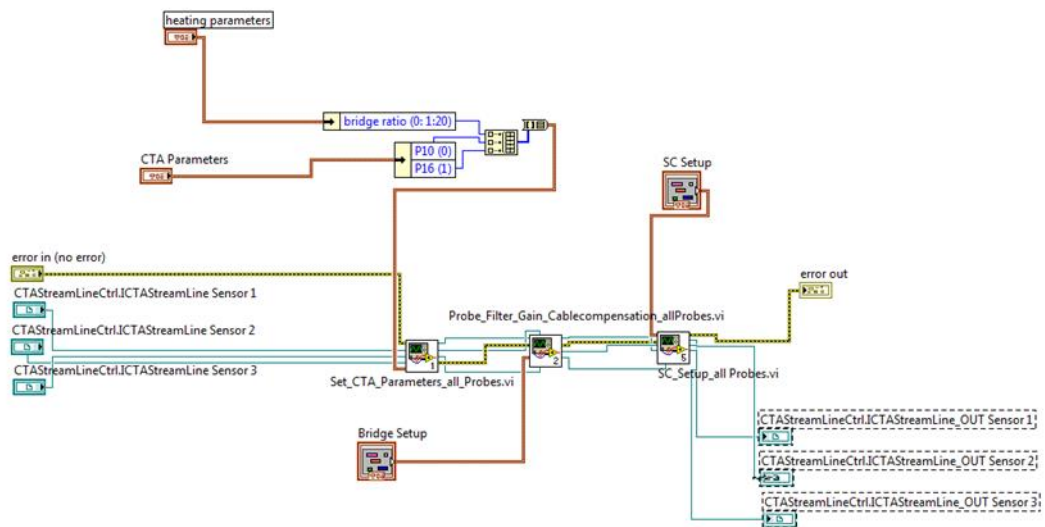


Abbildung 98: Set_CTA_and_SC_Parameter.vi

Das dazugehörige Block-Diagramm aus Abbildung 98 zeigt, dass Parameter für das CTA-System, Filter und Gain Parameter und SC-Parameter eingestellt werden. Zu den Einstellungen des CTA-Systems zählen unter anderem die Kabellänge und der Sensortyp. Die weiteren Vis führen Einstellungen bezüglich der Signal-Conditioning-Unit und verschiedene Kompensations- und Filtereinstellungen durch.

Befehl zur Aktivierung der Brücke

Dieser Abschnitt enthält ein sehr einfaches Block-Diagramm, welches in Abbildung 99 abgebildet ist. Die Schleife, welche das automatische Weiterlaufen des Programm kurz stoppt, ist notwendig, dass vor dem Betätigen des Buttons „Brücke aktivieren“, aus Abbildung 100, der Widerstand R_{dec} zur Sicherheit überprüft werden kann.

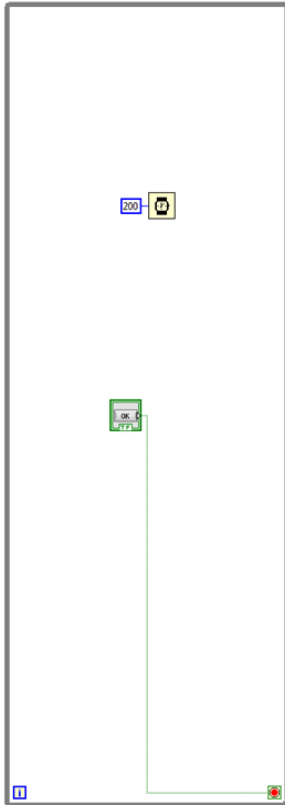


Abbildung 99: Programm zur Kalibrierung: Befehl zur Aktivierung der Brücke Block-Diagramm

The front panel interface is displayed on a grid background. It is divided into two main sections: 'Rdec' and 'tw [°C]'.
Under 'Rdec', there are three sensor calibration fields:
- Sensor 1 [Ohm]: 0,000
- Sensor 2 [Ohm]: 0,000
- Sensor 3 [Ohm]: 0,000
Under 'tw [°C]', there are three sensor calibration fields:
- Sensor 1: 0,000
- Sensor 2: 0,80000
- Sensor 3: 0,80000
Below these fields is a large grey button labeled 'Brücke aktivieren'.
At the bottom, there are two status indicators:
- 'operate' with a red circular light indicator.
- 'standby' with a red circular light indicator.

Abbildung 100: Programm zur Kalibrierung: Befehl zur Aktivierung der Brücke Front Panel

Sollten die Werte von R_{dec} für die drei Sensoren den gewünschten Werten aus der Hardwarekonfiguration entsprechen, kann der Button „Brücke aktivieren“ gedrückt werden. Nach der erfolgreichen Aktivierung leuchtet das Licht neben dem Textfeld „operate“ grün.

Aktivierung der Brücke

Nachdem im vorhergehenden Schritt die Erlaubnis zur Aktivierung der Brücke erteilt wurde, wird der Schritt zur Aktivierung der Brücke automatisch ausgeführt. Das Vi, welches in Abbildung 101 gezeigt wird, aktiviert die Brücke aller drei Sensoren.

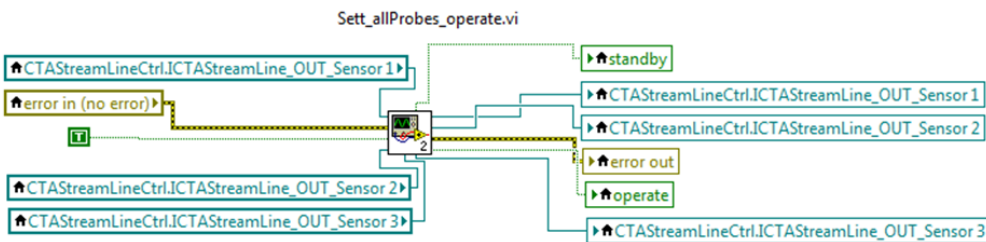


Abbildung 101: Programm zur Kalibrierung: Aktivierung der Brücke

Erstellen des Text-Files

In diesem Abschnitt wird das Text-File, in welchem die Ergebnisse der Kalibrierung abgespeichert werden und die dazugehörige Kopfzeile erstellt. Dazu muss eine Anordnung im Block-Diagramm wie in Abbildung 102 erstellt werden.

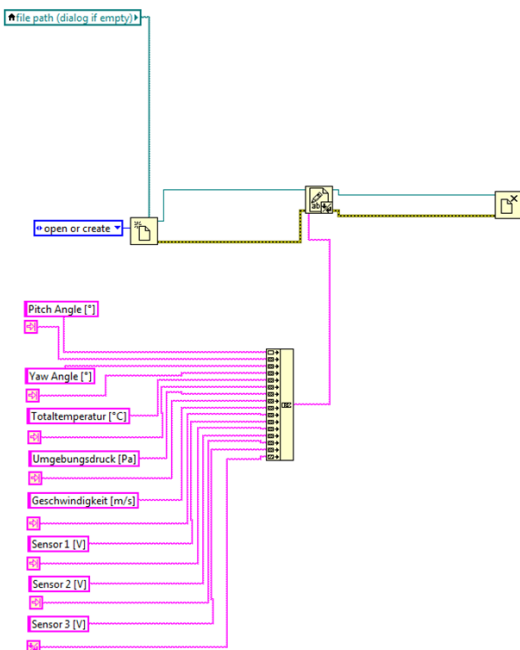


Abbildung 102: Programm zur Kalibrierung: Erstellen des Text-Files

Einlesen der Kalibrierdaten

Der eigentliche Kalibrierprozess findet in diesem Abschnitt des Programms statt. Die notwendigen Ein- bzw. Ausgaben sind in im Front Panel aus Abbildung 103 ersichtlich.

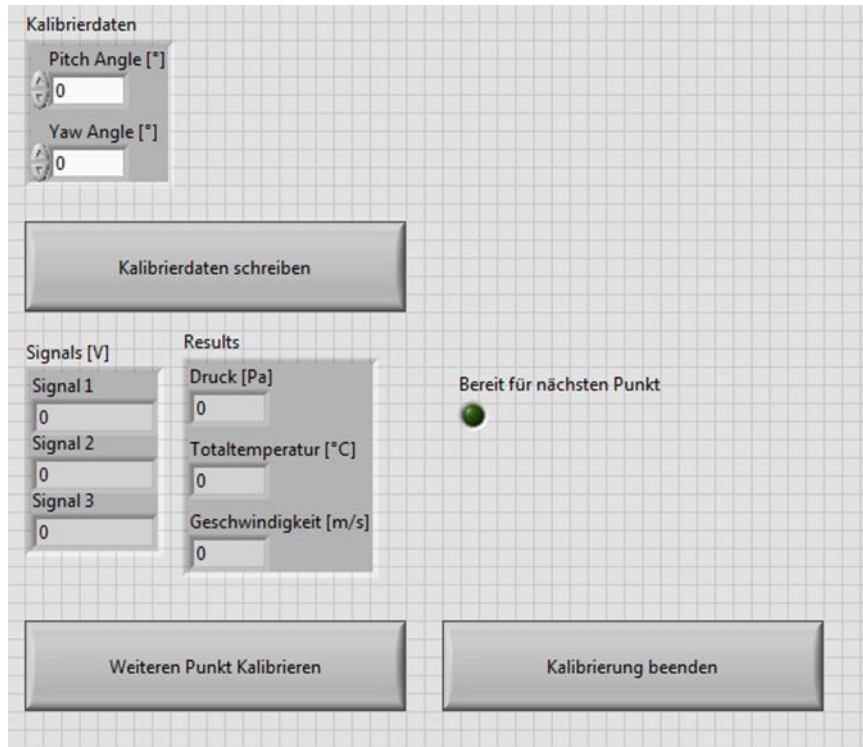


Abbildung 103: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten Front Panel

Die Vis dieses Schrittes sind in einer weiteren Flat Sequence innerhalb der äußeren Flat Sequence angeordnet und können in die fünf nachfolgenden Schritte unterteilt werden:

- Warten auf Befehl zum Start der Kalibrierung
- Messung der relevanten Parameter
- Spannungsmessung
- Erneute Messung der Parameter und Mittelung dieser Werte
- Warten auf Eingabe für weiteres Vorgehen

Warten auf Befehl zum Starten der Kalibrierung

Bevor die Kalibrierung mit dem Button „Kalibrierdaten schreiben“ gedrückt wird und damit die Kalibrierung ausgelöst wird, müssen die beiden Winkel aus Abbildung 103 eingegeben werden. Das Programm übernimmt diese beiden Werte und schreibt diese in das Text-File. Durch das Drücken des Buttons wird die Schleife in Abbildung 104 beendet und die Kalibrierung gestartet.

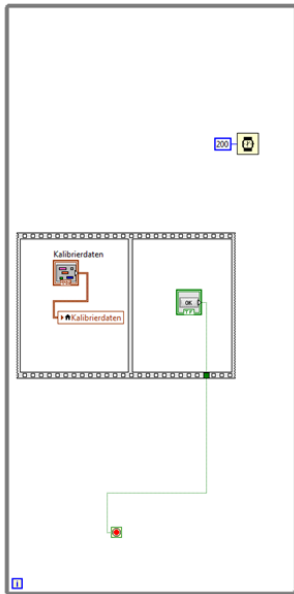


Abbildung 104: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Warten auf Befehl zum Start der Kalibrierung

Messung der relevanten Parameter

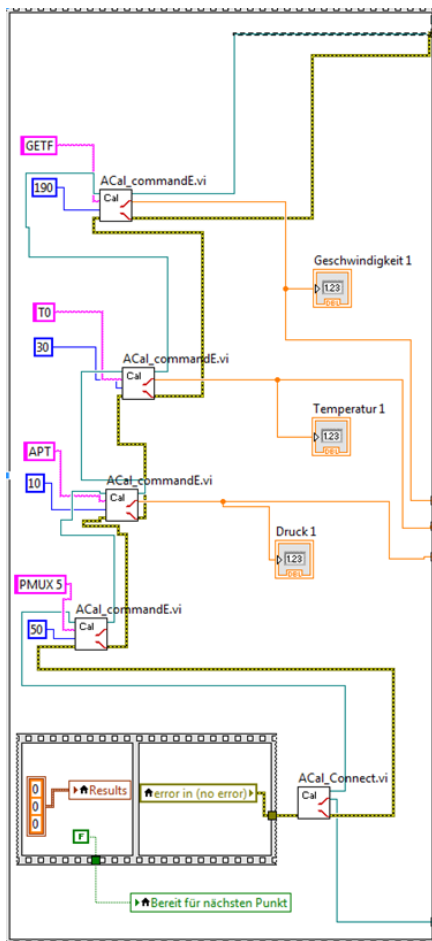


Abbildung 105: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Messung der relevanten Parameter

In diesem Abschnitt werden die Totaltemperatur, die Geschwindigkeit und der atmosphärische Druck, welcher dem statischen Druck entspricht, vom Kalibrierkanal abgefragt. Wie bereits beim CTA-System erwähnt, muss auch die Kommunikation mit dem Kalibrierkanal aktiviert werden. Dies wird durch das Vi „ACal_Connect.vi, wie in Abbildung 105, ausgeführt.

Spannungsmessung

Die Spannungsmessung erfolgt mittels DAQ-Assistent. Für die Messung wurde eine Samplerate von 10kHz bei einer Anzahl von 100000 Samples gewählt. Die Samplerate und die Anzahl der Samples wurden als Konstanten definiert. Bei Bedarf müssen diese Konstanten im Block-Diagramm aus Abbildung 106 geändert werden. Nach der Aufnahme der Daten werden diese gemittelt und im Front Panel ausgegeben.

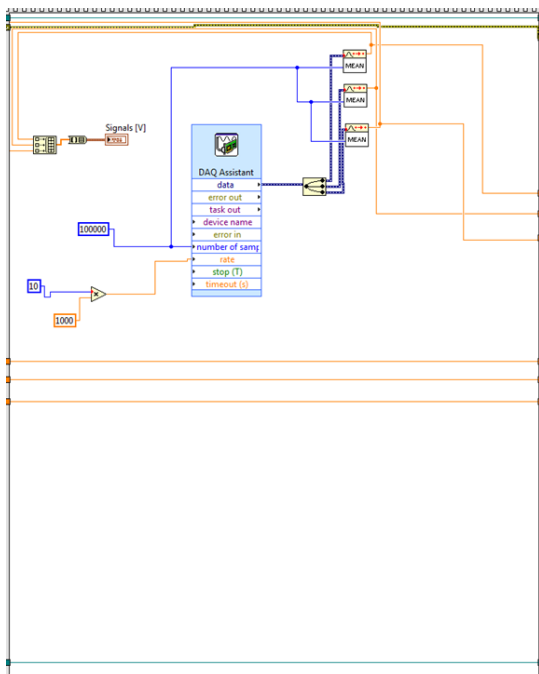


Abbildung 106: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Spannungsmessung

Erneute Messung der Parameter und Mittelung dieser Werte

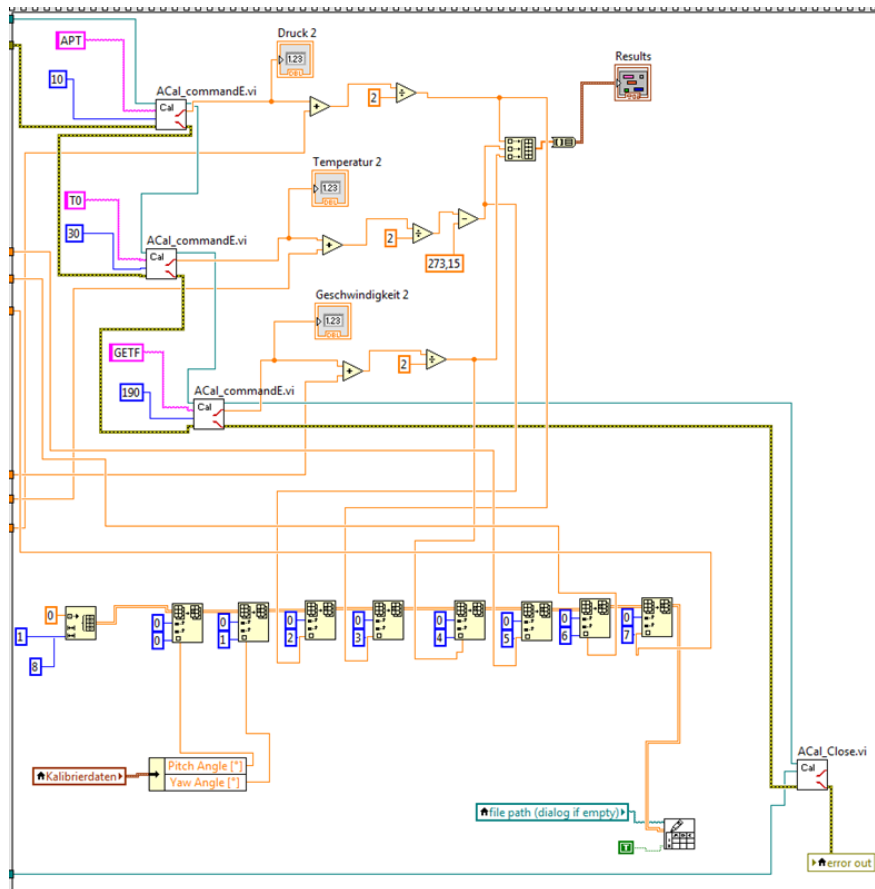


Abbildung 107: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Erneute Messung der Parameter und Mittelung dieser Werte

Nachdem die Spannungsmessung abgeschlossen wurde, folgt ein erneutes Einlesen der Totaltemperatur, der atmosphärischen Temperatur und der Geschwindigkeit. Diese Werte werden mit den zuvor ermittelten Werten addiert und durch zwei dividiert, um den Mittelwert zu berechnen. Alle erhaltenen Werte werden anschließend in das zuvor erstellte Text-File gespeichert. Schlussendlich muss die Kommunikation mit dem Kalibrierkanal noch beendet werden, was durch das Vi „ACal_Close.vi“ ausgeführt wird, welches in Abbildung 107 ersichtlich ist.

Warten auf Eingabe für weiteres Vorgehen

In diesem Schritt muss dem Programm mitgeteilt werden, welcher Schritt als nächstes durchgeführt werden soll. Zur Auswahl steht das Programm zu beenden oder den nächsten Punkt zu kalibrieren. Die entsprechende Schleife aus Abbildung 108 wird je nach Befehl beendet.

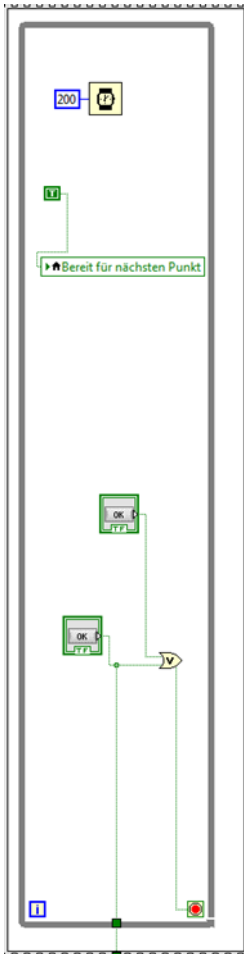


Abbildung 108: Programm zur Kalibrierung: Einlesen der Kalibrierdaten: Warten auf Eingabe für weiteres Vorgehen

Brücke deaktivieren

Das in Abbildung 109 abgebildete Vi ist ident mit jenem aus Abbildung 101 zur Aktivierung der Brücke. Der einzige Unterschied besteht in der Eingabe eines „False Booleans“.

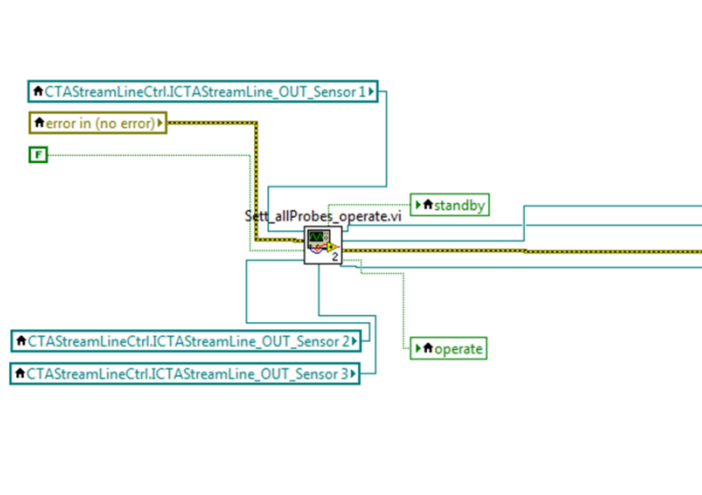


Abbildung 109: Programm zur Kalibrierung: Brücke deaktivieren

Session beenden

Die Kommunikation des Programms mit dem CTA-System muss im letzten Schritt des Programms beendet werden. Dies wird durch das Vi „End_Session_allProbes.vi“ siehe Abbildung 110, ausgeführt.

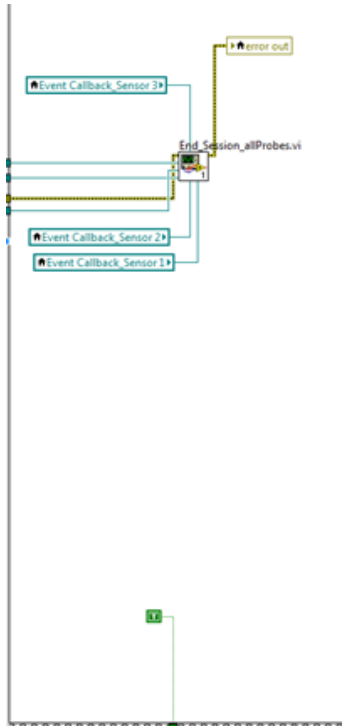


Abbildung 110: Programm zur Kalibrierung: Session beenden

Anhang 3: Vis Programm zur Messung

Das Programm zur Messung wurde ebenfalls wie das Programm zur Kalibrierung im Labview programmiert. Die grundsätzliche Struktur, welche dafür sorgt, dass die Schritte hintereinander ablaufen, ist eine Flat Sequence. Das Programm zur Messung kann in folgende Teilschritte unterteilt werden:

- Initialisierung
- Daten einlesen
- Export Basic Data
- Einstellen des Widerstands
- Einstellen der SC- und CTA-Parameter
- Spannungen einlesen
- Brücke deaktivieren und Session beenden

Initialisierung

Wie schon aus dem Programm zur Kalibrierung aus Anhang 2 bekannt, muss, um mit dem CTA-System kommunizieren zu können, die Kommunikation zuerst initialisiert werden. Das entsprechende Vi aus Abbildung 111 wird wie folgt angeordnet:

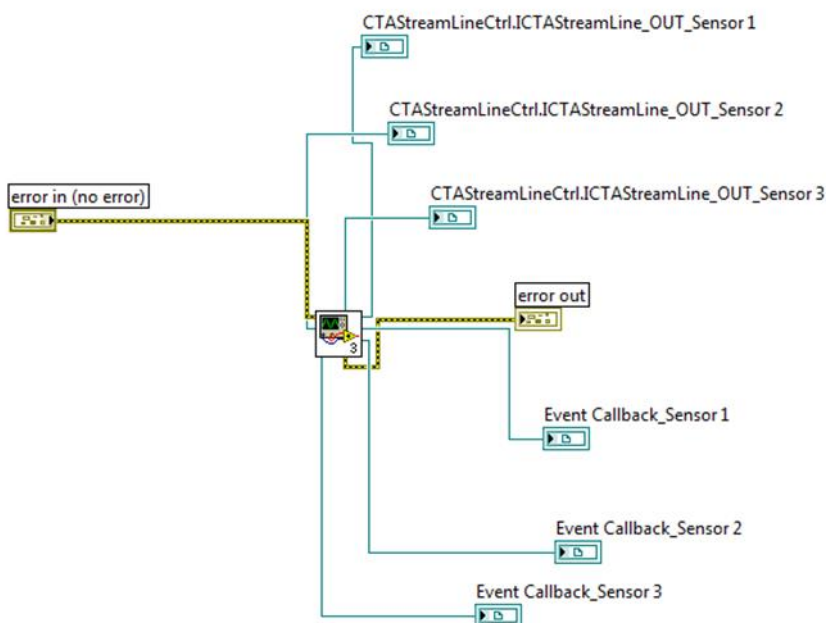


Abbildung 111: Programm zur Messung: Initialisierung

Daten einlesen

Die Eingabe der Daten bei der Messung ist im Vergleich zum Einlesen der Daten bei der Kalibrierung deutlich umfangreicher wie in Abbildung 112 ersichtlich. Diese Daten sind jedoch für die Messung nicht alle relevant. Die relevanten Daten sind dieselben wie aus dem Programm zur Kalibrierung. Trotzdem empfiehlt es sich alle Daten einzugeben, weil diese im Nachhinein in einem Text-File zusammengefasst und ausgegeben werden und damit eine Zusammenfassung über getätigten Einstellungen bietet.

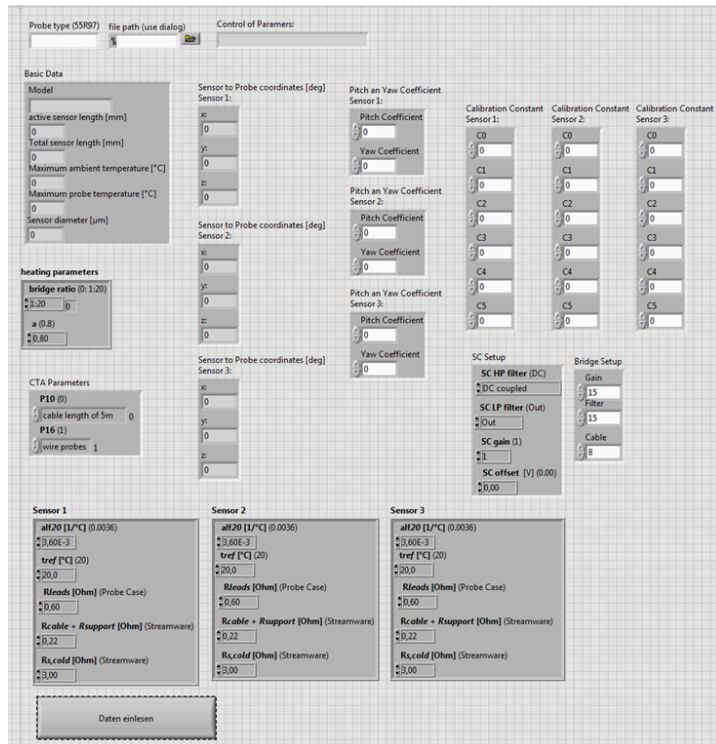


Abbildung 112: Programm zur Messung: Daten einlesen: Front Panel

Zusätzlich erkennt man im Block Diagramm aus Abbildung 114 zwei zusätzlich Vi. Das erste Vi ist bereits aus dem Programm zur Kalibrierung bekannt und dient zur Kontrolle der eingegebenen Parameter. Dieses Vi wurde in Anhang 2 bereits genauer beschrieben. Das zweite ersichtliche Vi, „Daten_Probe“, stellt eine Art Datenbank dar. Wird in das Feld „Probe Type“ aus Abbildung 112 der entsprechende Sensortyp 55R97 eingegeben, füllt sich ein Teil der darunter stehenden Textfelder automatisch mit Daten des Sensors. Das Block Diagramm dieses Vi ist in Abbildung 113 abgebildet.

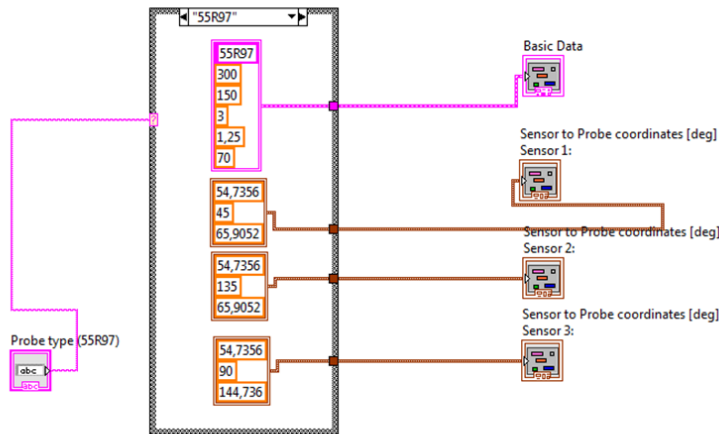


Abbildung 113: Daten_Probe.vi

Die Daten, welche automatisch aufgefüllt werden, entsprechen zum einen den Daten über Geometrie und Temperaturgrenzen des Sensors und zum anderen den Winkeln, um das Sensor-Koordinatensystem in das Sonden-Koordinatensystem zu drehen.

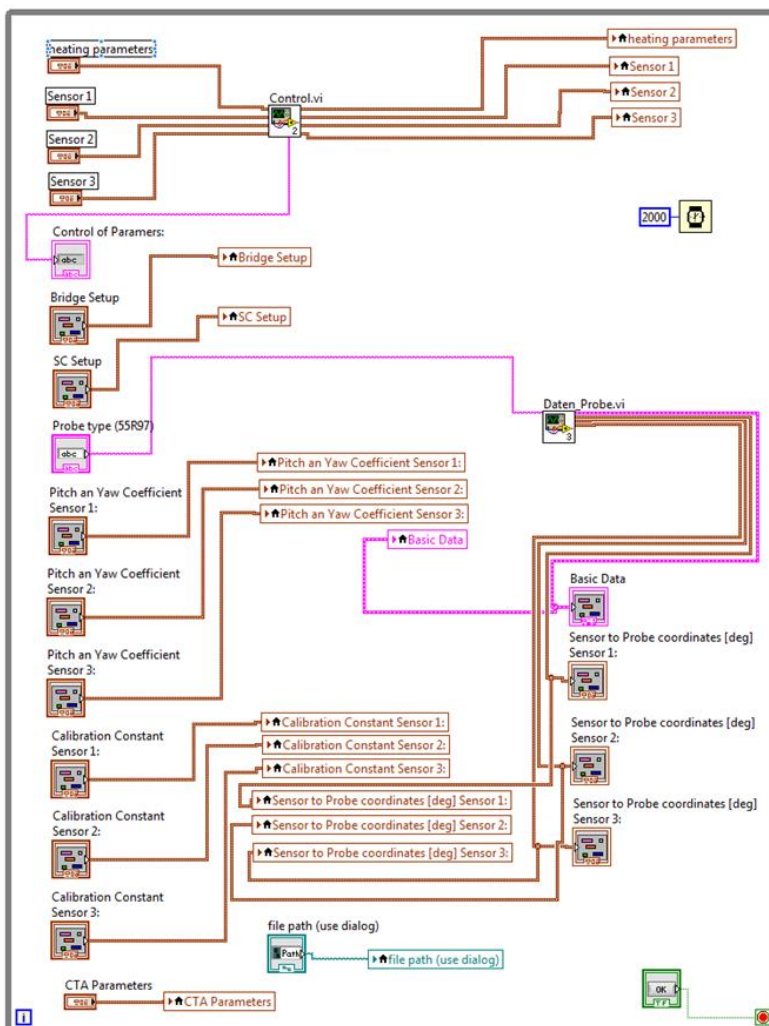


Abbildung 114: Programm zur Messung: Daten einlesen: Block Diagramm

Export Basic Data

Das Vi „export_basic_Data.vi“ aus Abbildung 115 fasst alle eingegebenen Parameter und Daten in einem Text-File zusammen und gibt diese am entsprechenden, mit dem File Path eingegebenen Ort, aus.

Zusätzlich wird in diesem Schritt die aktuelle Aktivität des Sensors aktualisiert.

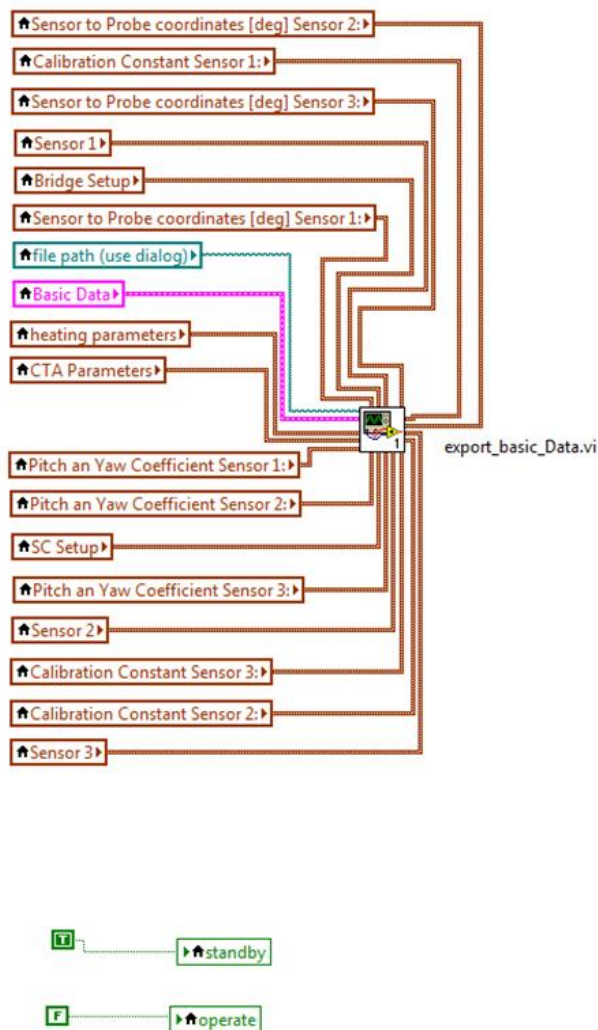


Abbildung 115: Programm zur Messung: Export Basic Data: Block Diagramm

Einstellen des Widerstands, der CTA- und der SC-Parameter

Die Einstellungen, welche in diesen zwei Schritten getätigt werden, wurden bereit im Programm zur Kalibrierung verwendet und beschrieben. Dazu wurden die gleichen Vis wie in Anhang 2 in die Programmierung implementiert.

Spannungen einlesen

Dieser Abschnitt des Programms ist der Hauptteil bzw. jener Teil, in dem die eigentliche Messung stattfindet. Das Front Panel wird in Abbildung 116 gezeigt. Diese Abbildung zeigt zwei Graphen, die eine Spektralanalyse nach jedem gemessenen Punkt für die drei Sensoren ausgeben.

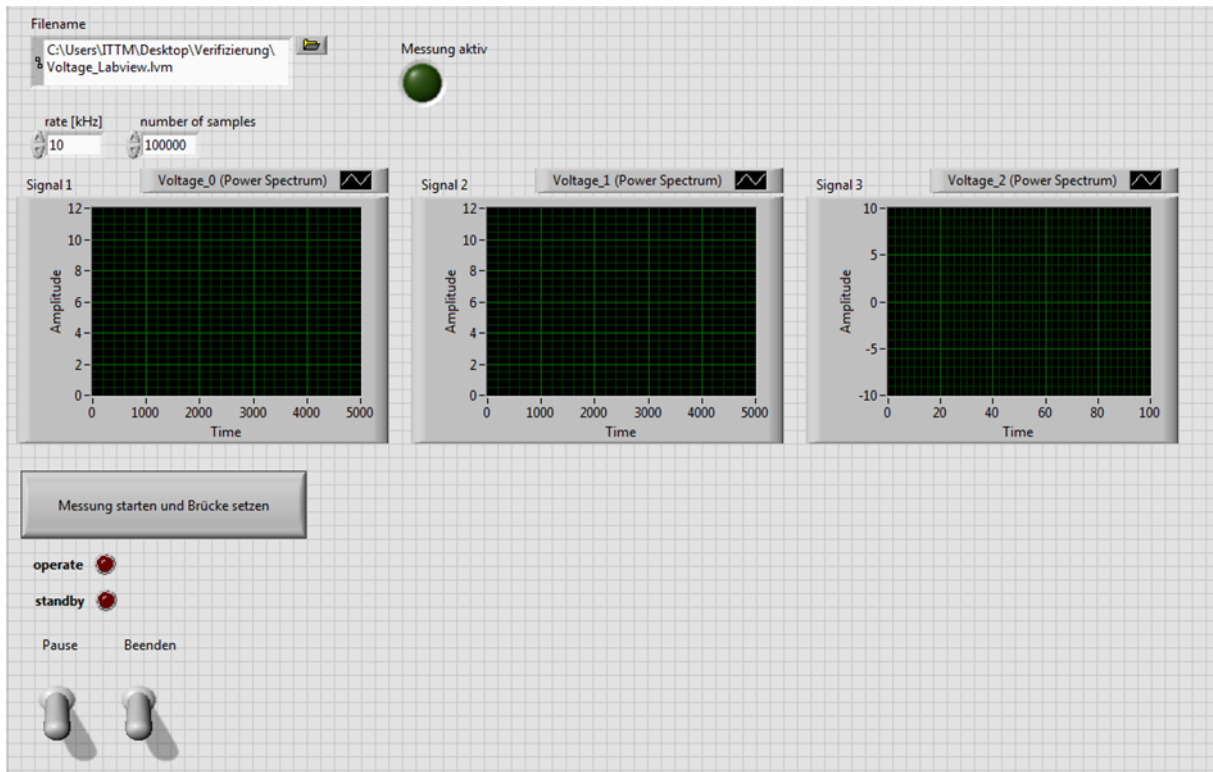


Abbildung 116: Programm zur Messung: Spannungen einlesen: Front Panel

Der Schritt kann in mehrere Teilschritte unterteilt werden, die erneut in einer Flat Sequence angeordnet sind:

- Befehl Messung starten und Brücke aktivieren
- Brücke aktivieren
- Messung der Spannungen und schreiben von diesen in ein Text File
- Brücke deaktivieren

Befehl Messung starten und Brücke aktivieren

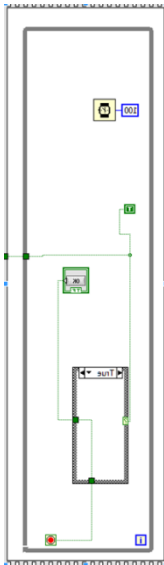


Abbildung 117: Programm zur Messung: Spannungen einlesen: Spannungen einlesen: Befehl Messung starten und Brücke aktivieren

Die Schleife, welche in Abbildung 117 gezeigt wird, dient dazu, das Programm für eine gewünschte Zeit anzuhalten, um die Werte der Widerstände überprüfen zu können. Sollten diese Werte in Ordnung sein, kann die Schleife mit dem Button „Messung starten und Brücke setzen“ aus Abbildung 116 beendet werden.

Brücke aktivieren

Zur Aktivierung der Brücke wurde jenes Vi verwendet, welches auch im Programm zur Kalibrierung verwendet und in Anhang 2 gezeigt wurde.

Messung der Spannungen und Schreiben von diesen in ein Text File

Die eigentliche Messung findet in dem Sub Vi „Measurement_Final.vi“ statt. Dieses Vi ist in Abbildung 118 dargestellt. Aus diesem Grund ist es notwendig, dieses Vi genauer zu betrachten.

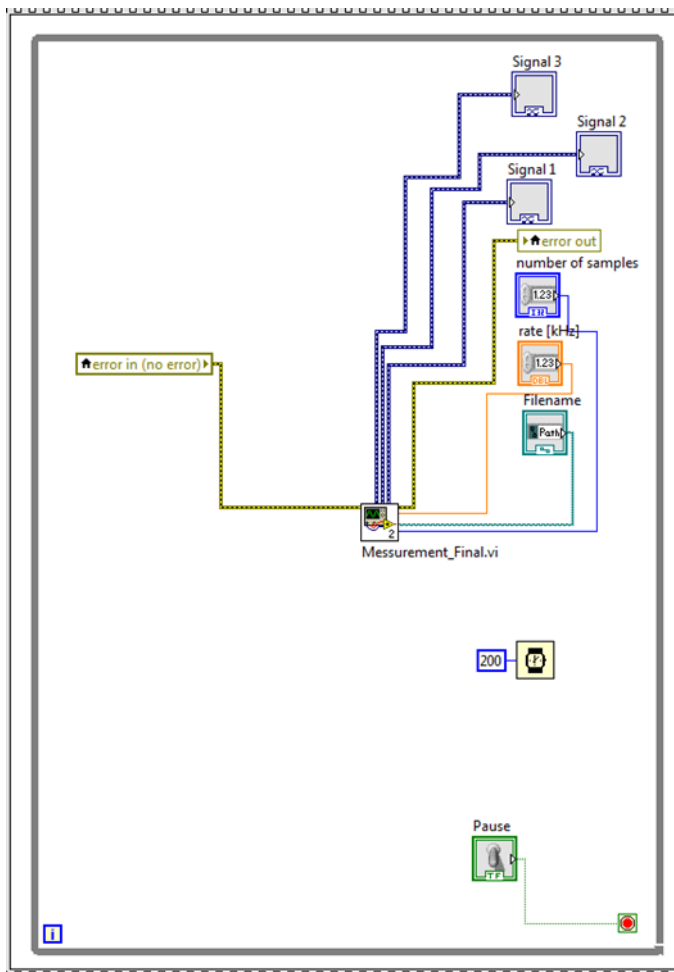


Abbildung 118: Programm zur Messung: Spannungen einlesen: Spannungen einlesen: Messung der Spannungen und schreiben von diesen in ein Text-File

Measurement_Final.vi

Dieses Vi ist in einer Flat Sequence angeordnet und kann in vier Teilschritte unterteilt werden:

- Start Measurement
- Messung der Spannungen und weiterer Parameter
- Globale Variable „Next Move allowed“ auf True setzen
- Globale Variable „Start Measurement“ auf False setzen

Start Measurement

Der Abschnitt Start Measurement, siehe Abbildung 119, besteht aus einer zweiteiligen Flat Sequence. Im ersten Abschnitt der Flat Sequence ist eine Schleife angebracht. Die Schleife wird durch eine Globale Variable abgebrochen. Diese Globale Variable wird von der Traversierung auf True gesetzt sobald sich diese in der richtigen Position befindet. Danach wird die Anzeige „Messung aktiv“ auf True gesetzt.

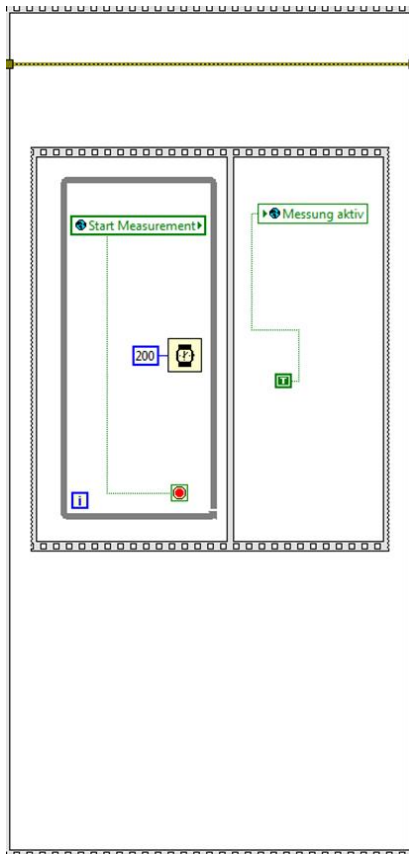


Abbildung 119: Measurement_Final.vi: Start Measurement

Messung der Spannungen und weiterer Parameter

Die in Abbildung 120 gezeigte Anordnung der Programmierung erlaubt die Messung der drei Spannungen und die Ausgabe einer Spektralanalyse. Zusätzlich können über globale Variablen noch weitere Parameter von anderen Labview Programmen übergeben werden. Schlussendlich werden all diese ermittelten Daten in ein Text File gespeichert. Der Name und Speicherort dieses Text-Files kann nach der einmaligen Eingabe beibehalten werden. Das Vi „Write To Measurement File“ ändert den Namen automatisch ab, indem die Zahl am Ende des Namens automatisch erhöht wird.

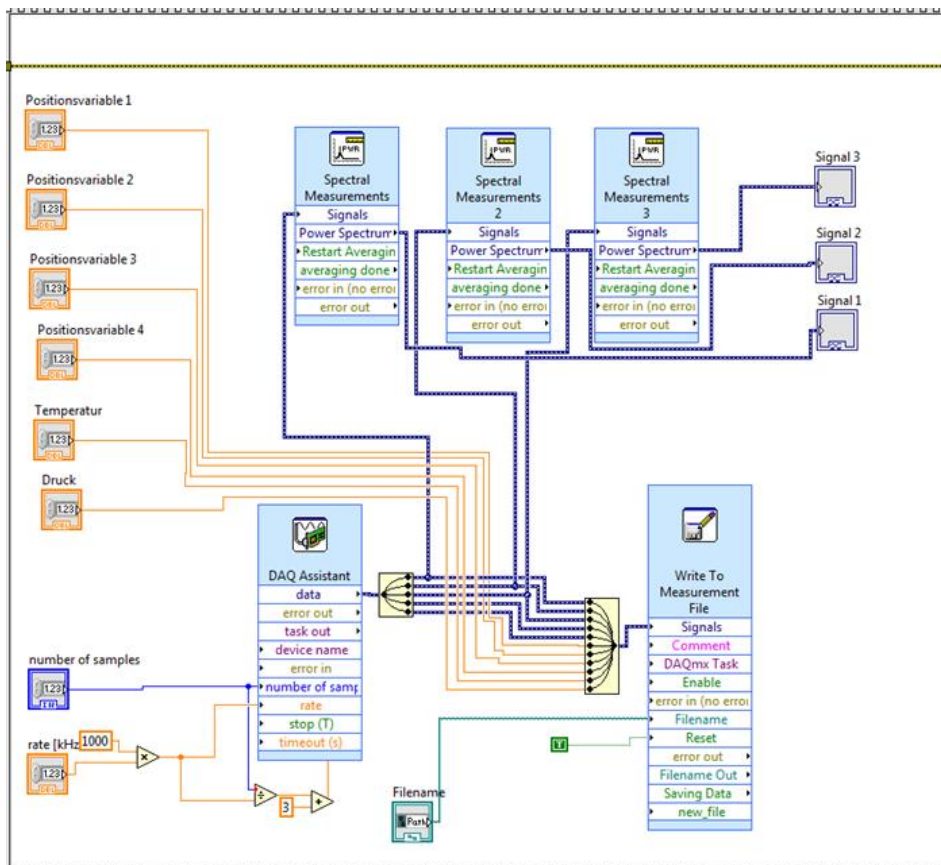


Abbildung 120: Measurement_Final.vi: Messung der Spannungen und weiterer Parameter

Globale Variable „Next Move allowed“ auf True setzen

In diesem Schritt wird die Globale „Variable Next Move allowed“ auf True gesetzt. Dies ermöglicht der Traversierung auf die nächste Position zu fahren. Das dazugehörige Block Diagramm ist in Abbildung 121 ersichtlich.

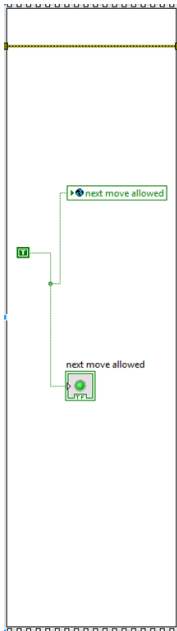


Abbildung 121: Measurement_Final.vi: Globale Variable „Next Move allowed“ auf True setzen“

Globale Variable „Start Measurement“ auf False setzen

Zuletzt wird die Globale Variable auf False gesetzt, um zu verhindern, dass die Messung frühzeitig, bevor sich die Traversierung auf der gewünschten Position befindet, auslöst. Durchgeführt wird dieser Schritt durch das in Abbildung 122 gezeigte Block Diagramm.

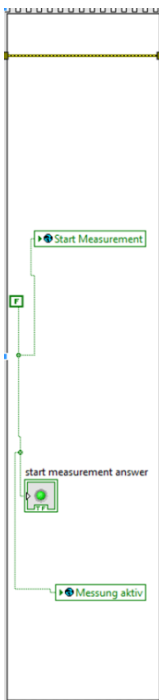


Abbildung 122: Measurement_Final.vi: Globale Variable „Start Measurement“ auf False setzen

Brücke deaktivieren und Session beenden

Im letzten Schritt des Programms muss die Brücke deaktiviert und die Session beendet werden. Die beiden Vis wurden bereits in Anhang 5 beschrieben und in diesem Zusammenhang wird auf dieses Kapitel verwiesen.

Anhang 4: Matlab Code Auswertung Kalibrierung mit Pitch-und Yaw-Faktoren

```
clear all;

%File mit den Daten aus der Kalibrierung importieren
Name_Textfile='kalibrierung_PundY_Faktor_2.txt';
[Pitch_Angle,Yaw_Angle,Totaltemperatur,Umgebungsdruck,Geschwindigkeit,Sensor_1,Sensor_2,Sensor_3]=importfile_kalibrierung(Name_Textfile);

%Definieren der Temperaturparameter Referenztemperatur und der
%Alphawerte der drei Sensoren
Tref_1=45.35;
Tref_2=45.35;
Tref_3=45.35;
alpha20_1=0.46/100;
alpha20_2=0.47/100;
alpha20_3=0.45/100;

%Definieren der Transformationsmatrix vom Sensorkoordinatensystem ins
%Probenkoordinatensystem
PTM=[0.57735,0.57735,0.57735;0.707107,-0.707107,6.12323*10^(-17);0.408248,0.408248,-0.816496];

%Werte von Winkel- und Geschwindigkeitskalibrierung trennen
var2=0;
var4=0;

for var1=1:length(Pitch_Angle)

    if (Pitch_Angle(var1)==0) && (Yaw_Angle(var1)==0)

        var2=var2+1;
        Totaltemperatur_GK(var2,1)=Totaltemperatur(var1);
        Umgebungsdruck_GK(var2,1)=Umgebungsdruck(var1);
        Geschwindigkeit_GK(var2,1)=Geschwindigkeit(var1);
        Sensor_1_GK(var2,1)=Sensor_1(var1);
        Sensor_2_GK(var2,1)=Sensor_2(var1);
        Sensor_3_GK(var2,1)=Sensor_3(var1);

    else

        var4=var4+1;
        Totaltemperatur_WK(var4,1)=Totaltemperatur(var1);
        Umgebungsdruck_WK(var4,1)=Umgebungsdruck(var1);
        Geschwindigkeit_WK(var4,1)=Geschwindigkeit(var1);
        Sensor_1_WK(var4,1)=Sensor_1(var1);
        Sensor_2_WK(var4,1)=Sensor_2(var1);
        Sensor_3_WK(var4,1)=Sensor_3(var1);
        deta_WK(var4,1)=Pitch_Angle(var1);
        psi_WK(var4,1)=Yaw_Angle(var1);
        psi_WK(var4,1)=psi_WK(var4,1);
        deta_WK(var4,1)=deta_WK(var4,1)*(1);

    end

end
```

```
%Geschwindigkeitskalibrierung

%Definieren der Matrix StatischeTemperatur, Dichte und Massenstromdichte
StatischeTemperatur_GK=zeros(length(Totaltemperatur_GK),1);
Dichte_GK=zeros(length(Totaltemperatur_GK),1);
Massenstromdichte_GK=zeros(length(Totaltemperatur_GK),1);

%Definieren der Gaskonstante von Luft [J/(kg*K)]
R=287.058;

%Definieren des overheat Ratios
a=0.8;

%Berechnen der statischen Temperatur, Dichte und Massenstromdichte

%Festlegen der Konstanten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität
%mittels Polynomansatz
K1=1.02251;
K2=-1.75903*10^(-4);
K3=4.02136*10^(-7);
K4=-4.86946*10^(-11);

for var3=1:length(Totaltemperatur_GK)

    %Definieren der "Abweichung" damit das Programm in die Schleife geht
    Abweichung=0.5;

    %Berechnung des Startwerts

    cp=(K1+K2*Totaltemperatur_GK(var3)+K3*Totaltemperatur_GK(var3)^2+K4*Totaltemperatur_GK(var3)^3
    )*1000;
    Tstart=Totaltemperatur_GK(var3)-((Geschwindigkeit_GK(var3)^2)/cp);
    Tstat=Tstart;

    while Abweichung >0.00001

        cp=(K1+K2*Tstat+K3*Tstat^2+K4*Tstat^3)*1000;
        TBerechnung=Totaltemperatur_GK(var3)-((Geschwindigkeit(var3)^2)/cp);
        Abweichung=abs(Tstat-TBerechnung);
        Tstat=TBerechnung;

    end

    StatischeTemperatur_GK(var3)=Tstat;

    %Berechnung der Dichte mittels Idealgasgleichung
    Dichte_GK(var3)=Umgebungsdruck_GK(var3)/(R*(StatischeTemperatur_GK(var3)+273.15));

    %Berechnung der Massenstromdichte
    Massenstromdichte_GK(var3)=Dichte_GK(var3)*Geschwindigkeit_GK(var3);

end

%Berechnen der alpha-werte bei Referenztemperatur
alpha_ref_1=alpha20_1/(1+alpha20_1*(Tref_1-20));
alpha_ref_2=alpha20_2/(1+alpha20_2*(Tref_2-20));
alpha_ref_3=alpha20_3/(1+alpha20_3*(Tref_3-20));
```

```

%Berechnen der Temperatur des Drahtes
Tw_1=(a/alpha_ref_1)+Tref_1;
Tw_2=(a/alpha_ref_2)+Tref_2;
Tw_3=(a/alpha_ref_3)+Tref_3;

%Definieren der Matrizen Ecorr1_GK, Ecorr2_GK und Ecorr3_GK
Ecorr1_GK=zeros(length(Sensor_1_GK),1);
Ecorr2_GK=zeros(length(Sensor_2_GK),1);
Ecorr3_GK=zeros(length(Sensor_3_GK),1);

%Korrigieren der Spannungen auf Referenztemperatur
for var5=1:length(Sensor_1_GK)

    Ecorr1_GK(var5)=Sensor_1_GK(var5)*((Tw_1-StatischeTemperatur_GK(var5))/(Tw_1-
Tref_1))^0.5);
    Ecorr2_GK(var5)=Sensor_2_GK(var5)*((Tw_2-StatischeTemperatur_GK(var5))/(Tw_2-
Tref_2))^0.5);
    Ecorr3_GK(var5)=Sensor_3_GK(var5)*((Tw_3-StatischeTemperatur_GK(var5))/(Tw_3-
Tref_3))^0.5);

end

%Berechnen der Kalibrierkonstanten und Ausgabe der Grafiken
%Sensor 1
x1=transpose(Ecorr1_GK);
y1=transpose(Massenstromdichte_GK);
p1=polyfit(x1,y1,5);
y1_Berechnet=p1(1)*Ecorr1_GK.^5+p1(2)*Ecorr1_GK.^4+p1(3)*Ecorr1_GK.^3+p1(4)*Ecorr1_GK.^2+p1(5)
*Ecorr1_GK+p1(6);
Abweichung_GK_Sensor1=y1_Berechnet-Massenstromdichte_GK;
Fehler_GK_Sensor1=(Abweichung_GK_Sensor1./Massenstromdichte_GK).*100;
x_Ausgabe=1:length(Fehler_GK_Sensor1);

%Sensor 2
x2=transpose(Ecorr2_GK);
y2=transpose(Massenstromdichte_GK);
p2=polyfit(x2,y2,5);
y2_Berechnet=p2(1)*Ecorr2_GK.^5+p2(2)*Ecorr2_GK.^4+p2(3)*Ecorr2_GK.^3+p2(4)*Ecorr2_GK.^2+p2(5)
*Ecorr2_GK+p2(6);
Abweichung_GK_Sensor2=y2_Berechnet-Massenstromdichte_GK;
Fehler_GK_Sensor2=(Abweichung_GK_Sensor2./Massenstromdichte_GK).*100;
x_Ausgabe=1:length(Fehler_GK_Sensor2);

%Sensor 3
x3=transpose(Ecorr3_GK);
y3=transpose(Massenstromdichte_GK);
p3=polyfit(x3,y3,5);
y3_Berechnet=p3(1)*Ecorr3_GK.^5+p3(2)*Ecorr3_GK.^4+p3(3)*Ecorr3_GK.^3+p3(4)*Ecorr3_GK.^2+p3(5)
*Ecorr3_GK+p3(6);
Abweichung_GK_Sensor3=y3_Berechnet-Massenstromdichte_GK;
Fehler_GK_Sensor3=(Abweichung_GK_Sensor3./Massenstromdichte_GK).*100;
x_Ausgabe=1:length(Fehler_GK_Sensor2);

%Plotten der Geschwindigkeitskalibrierung
f1=figure('Name','Geschwindigkeitskalibrierung sensor 1','NumberTitle','off');
plot(x1,y1,x1,y1_Berechnet);
title('Geschwindigkeitskalibrierung sensor 1');
xlabel('Spannung [V]');

```

```
ylabel('Massenstromdichte [kg/(m^2*s)]');

f10=figure('Name','Fehler Geschwindigkeitskalibrierung Sensor 1','NumberTitle','off');
plot(transpose(x_Ausgabe),Fehler_GK_Sensor1);
title('Geschwindigkeitskalibrierung Fehler Sensor 1');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

f2=figure('Name','Geschwindigkeitskalibrierung Sensor 2','NumberTitle','off');
plot(x2,y2,x2,y2_Berechnet);
title('Geschwindigkeitskalibrierung Sensor 2');
xlabel('Spannung [V]');
ylabel('Massenstromdichte [kg/(m^2*s)]');

f11=figure('Name','Fehler Geschwindigkeitskalibrierung Sensor 2','NumberTitle','off');
plot(x_Ausgabe,Fehler_GK_Sensor2);
title('Geschwindigkeitskalibrierung Fehler Sensor 2');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

f3=figure('Name','Geschwindigkeitskalibrierung Sensor 3','NumberTitle','off');
plot(x3,y3,x3,y3_Berechnet);
title('Geschwindigkeitskalibrierung Sensor 3');
xlabel('Spannung [V]');
ylabel('Massenstromdichte [kg/(m^2*s)]');

f12=figure('Name','Fehler Geschwindigkeitskalibrierung Sensor 3','NumberTitle','off');
plot(x_Ausgabe,Fehler_GK_Sensor3);
title('Geschwindigkeitskalibrierung Fehler Sensor 3');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

%Winkelkalibrierung

%Berechnen von Uconst durch Mittelwertbildung
Summe_Geschwindigkeit_WK=0;

for var6=1:length(Geschwindigkeit_WK)

    Summe_Geschwindigkeit_WK=Summe_Geschwindigkeit_WK+Geschwindigkeit_WK(var6);

end
Uconst=Summe_Geschwindigkeit_WK/length(Geschwindigkeit_WK);

%Berechnung der Inversen der Transformationsmatrix
PTMIV=inv(PTM);

%Berechnen der Geschwindigkeit im Probenkoordinatensystem
Uprobe1_WK=Uconst.*cosd(deta_WK);
Uprobe2_WK=-Uconst.*sind(deta_WK).*cosd(psi_WK);
Uprobe3_WK=Uconst.*sind(deta_WK).*sind(psi_WK);

%Definieren der Matrizen zur Abscheicherung der Geschwindigkeiten im
%Sensorkoordinatensystem
Usensor1_WK=zeros(length(Uprobe1_WK),1);
Usensor2_WK=zeros(length(Uprobe2_WK),1);
Usensor3_WK=zeros(length(Uprobe3_WK),1);
```



```

%Umrechnung der Geschwindigkeiten ins Sensorkoordinatensystem
for var7=1:length(Uprobe1_WK)

    Uprobe=zeros(3,1);
    Uprobe(1)=Uprobe1_WK(var7);
    Uprobe(2)=Uprobe2_WK(var7);
    Uprobe(3)=Uprobe3_WK(var7);
    Uprobe=PTMIV*Uprobe;
    Usensor1_WK(var7)=Uprobe(1);
    Usensor2_WK(var7)=Uprobe(2);
    Usensor3_WK(var7)=Uprobe(3);

end

%Definieren der Matrix StatischeTemperatur, Dichte und Massenstromdichte
StatischeTemperatur_WK=zeros(length(Totaltemperatur_WK),1);
Dichte_WK=zeros(length(Totaltemperatur_WK),1);

%Berechnen der Statischen Temperatur und der Dichte
for var8=1:length(Totaltemperatur_WK)

    %Definieren der "Abweichung" damit das Programm in die Schleife geht
    Abweichung=0.5;

    %Berechnung des Startwerts

    cp=(k1+k2*Totaltemperatur_WK(var8)+k3*Totaltemperatur_WK(var8)^2+k4*Totaltemperatur_WK(var8)^3
    )*1000;
    Tstart=Totaltemperatur_WK(var8)-((Uconst^2)/cp);
    Tstat=Tstart;

    while Abweichung >0.00001

        cp=(k1+k2*Tstat+k3*Tstat^2+k4*Tstat^3)*1000;
        TBerechnung=Totaltemperatur_WK(var8)-((Uconst^2)/cp);
        Abweichung=abs(Tstat-TBerechnung);
        Tstat=TBerechnung;

    end

    StatischeTemperatur_WK(var8)=Tstat;
    Dichte_WK(var8)=Umgebungsdruck_WK(var8)/(R*((StatischeTemperatur_WK(var8)+273.15)));

end

%Definieren der Matrizen Ecorr1_WK, Ecorr2_WK und Ecorr3_WK
Ecorr1_WK=zeros(length(Sensor_1_WK),1);
Ecorr2_WK=zeros(length(Sensor_2_WK),1);
Ecorr3_WK=zeros(length(Sensor_3_WK),1);

%Korrigieren der Spannungen auf Referenztemperatur
for var9=1:length(Sensor_1_WK)

    Ecorr1_WK(var9)=Sensor_1_WK(var9)*((Tw_1-StatischeTemperatur_WK(var9))/(Tw_1-
Tref_1))^0.5);
    Ecorr2_WK(var9)=Sensor_2_WK(var9)*((Tw_2-StatischeTemperatur_WK(var9))/(Tw_2-
Tref_2))^0.5);
    Ecorr3_WK(var9)=Sensor_3_WK(var9)*((Tw_3-StatischeTemperatur_WK(var9))/(Tw_3-
Tref_3))^0.5);

```

```

end

%Berechnen der Massenstromdichten
MSD_1=p1(1)*Ecorr1_WK.^5+p1(2)*Ecorr1_WK.^4+p1(3)*Ecorr1_WK.^3+p1(4)*Ecorr1_WK.^2+p1(5)*Ecorr1
_WK+p1(6);
MSD_2=p2(1)*Ecorr2_WK.^5+p2(2)*Ecorr2_WK.^4+p2(3)*Ecorr2_WK.^3+p2(4)*Ecorr2_WK.^2+p2(5)*Ecorr2
_WK+p2(6);
MSD_3=p3(1)*Ecorr3_WK.^5+p3(2)*Ecorr3_WK.^4+p3(3)*Ecorr3_WK.^3+p3(4)*Ecorr3_WK.^2+p3(5)*Ecorr3
_WK+p3(6);

%Definieren der Matrizen Uca1
Uca1_1=zeros(length(MSD_1),1);
Uca1_2=zeros(length(MSD_2),1);
Uca1_3=zeros(length(MSD_3),1);

%Berechnen der Geschwindigkeiten Uca1
for var10=1:length(MSD_1)

    Uca1_1(var10)=MSD_1(var10)/Dichte_WK(var10);
    Uca1_2(var10)=MSD_2(var10)/Dichte_WK(var10);
    Uca1_3(var10)=MSD_3(var10)/Dichte_WK(var10);

end

%Quadrieren der Geschwindigkeiten
Usensor1_WK=Usensor1_WK.^2;
Usensor2_WK=Usensor2_WK.^2;
Usensor3_WK=Usensor3_WK.^2;
Uca1_1=Uca1_1.^2;
Uca1_2=Uca1_2.^2;
Uca1_3=Uca1_3.^2;

%Bestimmen des Pitch- und Yaw-Faktors sowie des Winkelwertes mittels
%multipler nichtlinearer Regression

%Sensor 1
%Werte mit Regressionsmodell berechnen
tbl=table(Usensor1_WK,Usensor2_WK,Usensor3_WK,Uca1_1);
modelfun=@(b,x)((b(1)^2)/((1+b(1)^2+(b(2)^2))*(cosd(b(3)))^2))*x(:,1)+(1/((1+(b(1)^2)+(b(2)^2)
)*(cosd(b(3)))^2))*x(:,2)+((b(2)^2)/((1+(b(1)^2)+(b(2)^2))*(cosd(b(3)))^2))*x(:,3);
beta0 = [0.1 1.5 50];
mdl1 = fitnlm(tbl,modelfun,beta0);

%Umwandlung des Formats der Berechneten Werte
k1=table2array(mdl1.Coefficients(1,1));
h1=table2array(mdl1.Coefficients(2,1));
alpha1=table2array(mdl1.Coefficients(3,1));

%Sensor 2
%Werte mit Regressionsmodell berechnen
tbl=table(Usensor1_WK,Usensor2_WK,Usensor3_WK,Uca1_2);
modelfun=@(b,x)((b(2)^2)/((1+(b(1)^2)+(b(2)^2))*(cosd(b(3)))^2))*x(:,1)+((b(1)^2)/((1+(b(1)^2)
+(b(2)^2))*(cosd(b(3)))^2))*x(:,2)+(1/((1+(b(1)^2)+(b(2)^2))*(cosd(b(3)))^2))*x(:,3);
beta0 = [0.1 1.5 50];
mdl2= fitnlm(tbl,modelfun,beta0);

%Umwandlung des Formats der Berechneten Werte
k2=table2array(mdl2.Coefficients(1,1));

```

```

h2=table2array(md12.Coefficients(2,1));
alpha2=table2array(md12.Coefficients(3,1));

%Sensor 3
%Werte mit Regressionsmodell berechnen
tbl=table(Usensor1_WK,Usensor2_WK,Usensor3_WK,Uca1_3);
modelfun=@(b,x)(1/((1+(b(1)^2)+(b(2)^2))*cosd(b(3)))^2)*x(:,1)+((b(2)^2)/((1+(b(1)^2)+(b(2)^2))*cosd(b(3)))^2)*x(:,2)+((b(1)^2)/((1+(b(1)^2)+(b(2)^2))*cosd(b(3)))^2)*x(:,3);
beta0 = [0.1 1.5 50];
md13 = fitnlm(tbl,modelfun,beta0);

%Umwandlung des Formats der Berechneten Werte
k3=table2array(md13.Coefficients(1,1));
h3=table2array(md13.Coefficients(2,1));
alpha3=table2array(md13.Coefficients(3,1));

%Berechnen der Geschwindigkeiten Uca1 durch ziehen der wurzel
Uca1_1=Uca1_1.^0.5;
Uca1_2=Uca1_2.^0.5;
Uca1_3=Uca1_3.^0.5;

%Berechnen der effektiven Geschwindigkeit mit den ermittelten Werten
U1eff=Uca1_1*((1+k1^2+h1^2)^0.5*cosd(alpha1));
U2eff=Uca1_2*((1+k2^2+h2^2)^0.5*cosd(alpha2));
U3eff=Uca1_3*((1+k3^2+h3^2)^0.5*cosd(alpha3));

%Definieren der Koeffizientenmatrix zur Lösung des Gleichungssystems und
%Bildung der Inversen zur Umrechnung der effektiven Geschwindigkeit in die
%Geschwindigkeit im Sensorkoordinatensystem
A=[k1^2,1,h1^2;h2^2,k2^2,1;1,h3^2,k3^2];
B=inv(A);

%Definieren der Matrizen Utr,Vtr und wtr
Utr=zeros(length(U1eff),1);
Vtr=zeros(length(U2eff),1);
wtr=zeros(length(U3eff),1);

%Definieren der Matrizen Utr,Vtr und wtr
U=zeros(length(U1eff),1);
V=zeros(length(U2eff),1);
w=zeros(length(U3eff),1);

%Lösung des Gleichungssystems
for var11=1:length(U1eff)

    C=[U1eff(var11)^2;U2eff(var11)^2;U3eff(var11)^2];
    D=B*C;
    E=D.^(0.5);
    UGesch=E;

    Utr(var11)=UGesch(1);
    Vtr(var11)=UGesch(2);
    wtr(var11)=UGesch(3);

    U_Probkoordinaten=PTM*UGesch;
    U(var11)=U_Probkoordinaten(1);
    V(var11)=U_Probkoordinaten(2);
    w(var11)=U_Probkoordinaten(3);

```

```
end

%Berechnen des Fehlers
%Sensor 1
Differenz_1=(Usensor1_WK.^0.5)-Utr;
Fehler_1=(Differenz_1./(Usensor1_WK.^0.5))*100;

%Sensor 2
Differenz_2=(Usensor2_WK.^0.5)-Vtr;
Fehler_2=(Differenz_2./(Usensor2_WK.^0.5))*100;

%Sensor 3
Differenz_3=(Usensor3_WK.^0.5)-Wtr;
Fehler_3=(Differenz_3./(Usensor3_WK.^0.5))*100;

%Definieren einer Matrix mit Nullen um Nulllinie im Plot erstellen zu
%können

Null=zeros(length(Uprobe3_WK),1);

%Plotten der Ergebnisse für die einzelnen Sensoren
%Sensor 1
f4=figure('Name','Sensor 1','NumberTitle','off');
plot(psi_WK,Utr,psi_WK,(Usensor1_WK.^0.5),psi_WK,U,psi_WK,Uprobe1_WK);
title('Winkelkalibrierung Sensor 1');
xlabel('Drehwinkel [°]');
ylabel('Strömungsgeschwindigkeit [m/s]');

f7=figure('Name','Fehler Sensor 1','NumberTitle','off');
plot(psi_WK,Fehler_1,psi_WK,Null);
title('Relativer Fehler Sensor 1');
xlabel('Drehwinkel [°]');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

%Sensor 2
f5=figure('Name','Sensor 2','NumberTitle','off');
plot(psi_WK,Vtr,psi_WK,(Usensor2_WK.^0.5),psi_WK,V,psi_WK,Uprobe2_WK);
title('Winkelkalibrierung sensor 2');
xlabel('Drehwinkel [°]');
ylabel('Strömungsgeschwindigkeit [m/s]');

f8=figure('Name','Fehler Sensor 2','NumberTitle','off');
plot(psi_WK,Fehler_2,psi_WK,Null);
title('Relativer Fehler Sensor 2');
xlabel('Drehwinkel [°]');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

%Sensor 3
f6=figure('Name','Sensor 3','NumberTitle','off');
plot(psi_WK,Wtr,psi_WK,(Usensor3_WK.^0.5),psi_WK,W,psi_WK,Uprobe3_WK);
title('Winkelkalibrierung sensor 3');
xlabel('Drehwinkel [°]');
ylabel('Strömungsgeschwindigkeit [m/s]');

f9=figure('Name','Fehler Sensor 3','NumberTitle','off');
plot(psi_WK,Fehler_3,psi_WK,Null);
title('Relativer Fehler Sensor 3');
```

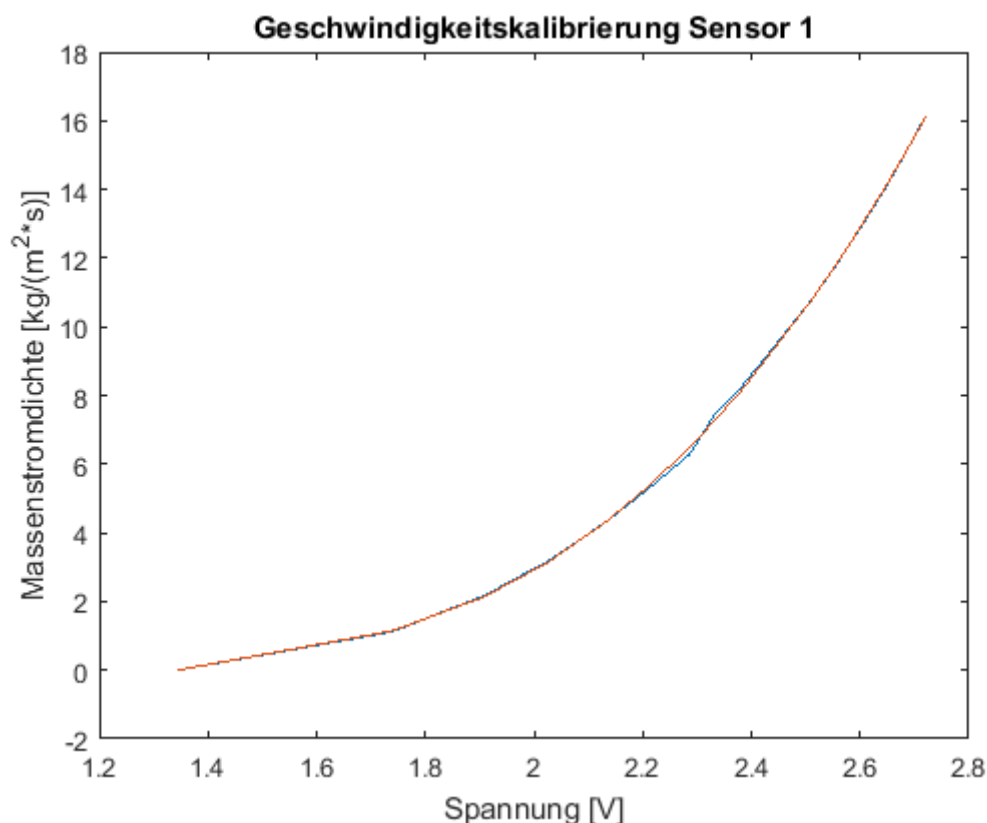
```
xlabel('Drehwinkel [°]');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

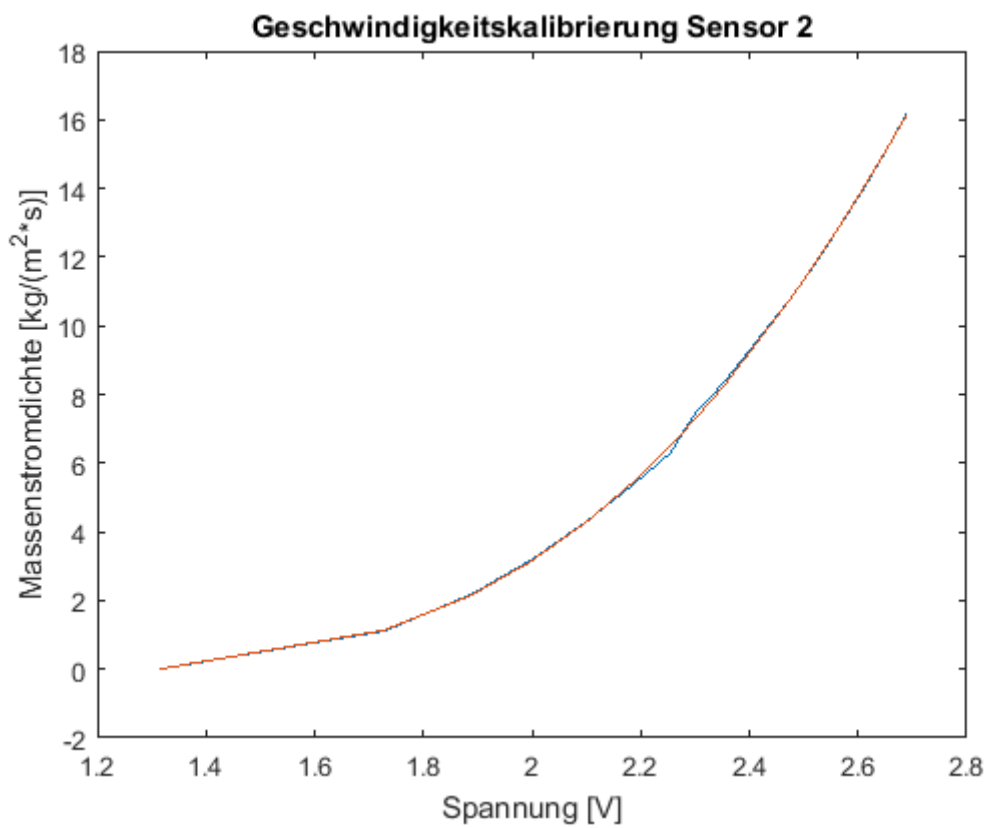
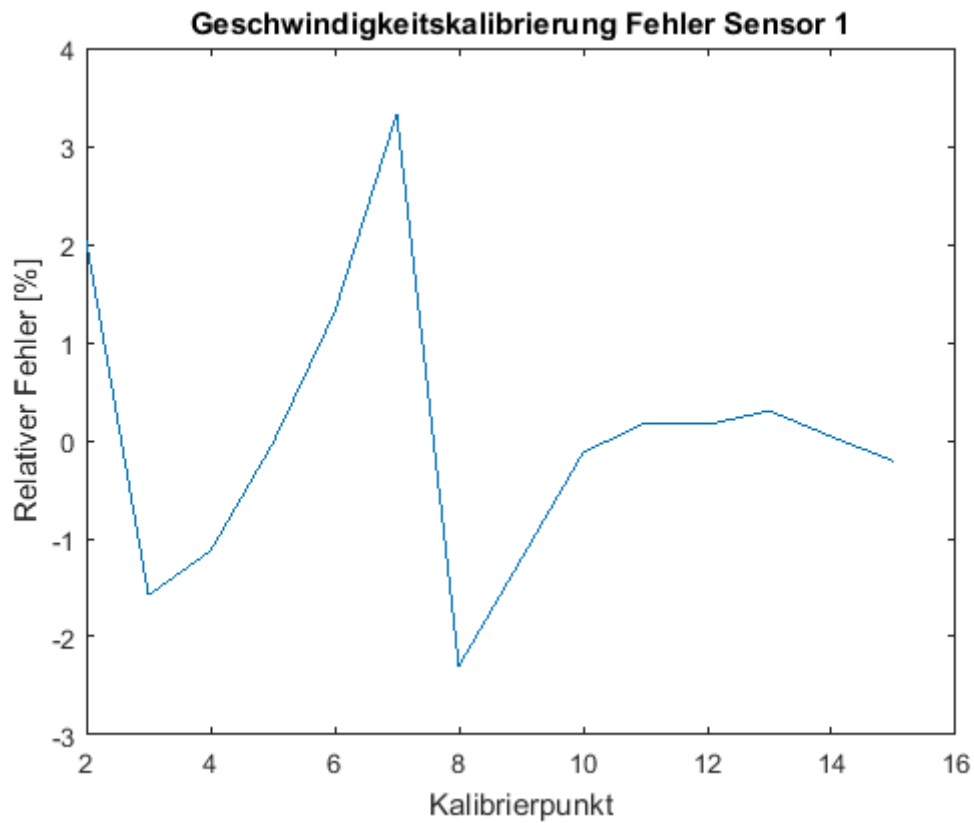
%Ausgabe der Daten in einem Text-File
%Textfile mit Konstanten ausgeben
P=[p1];
J=[p2];
K=[p3];

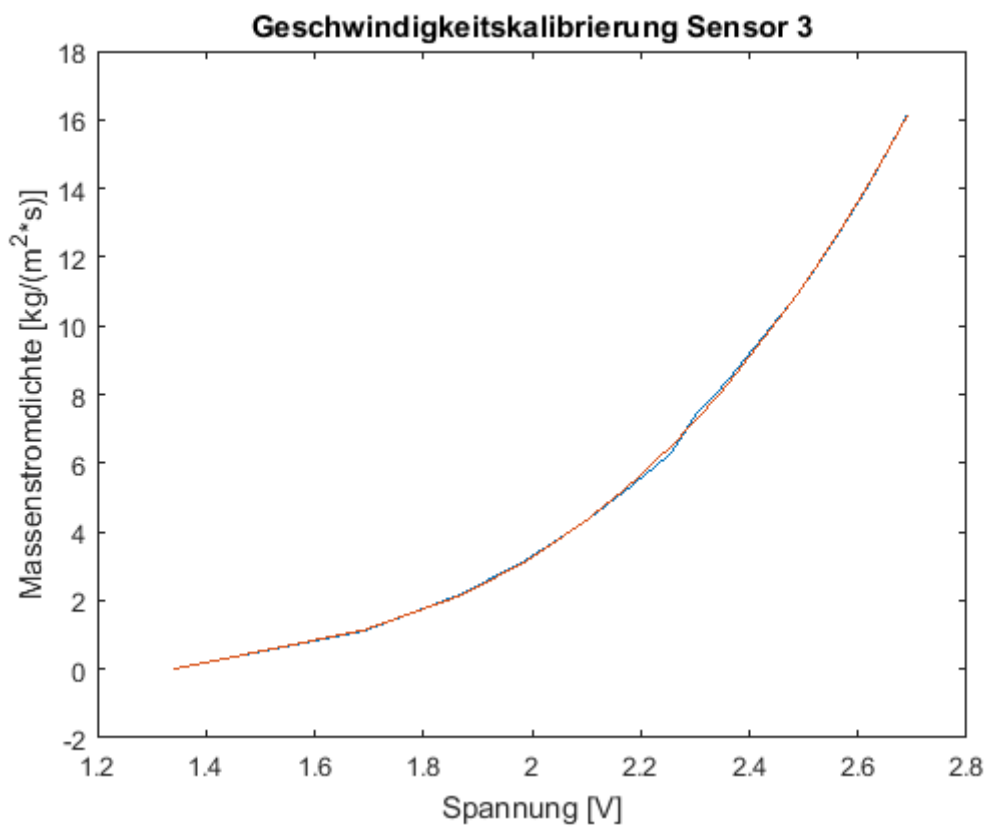
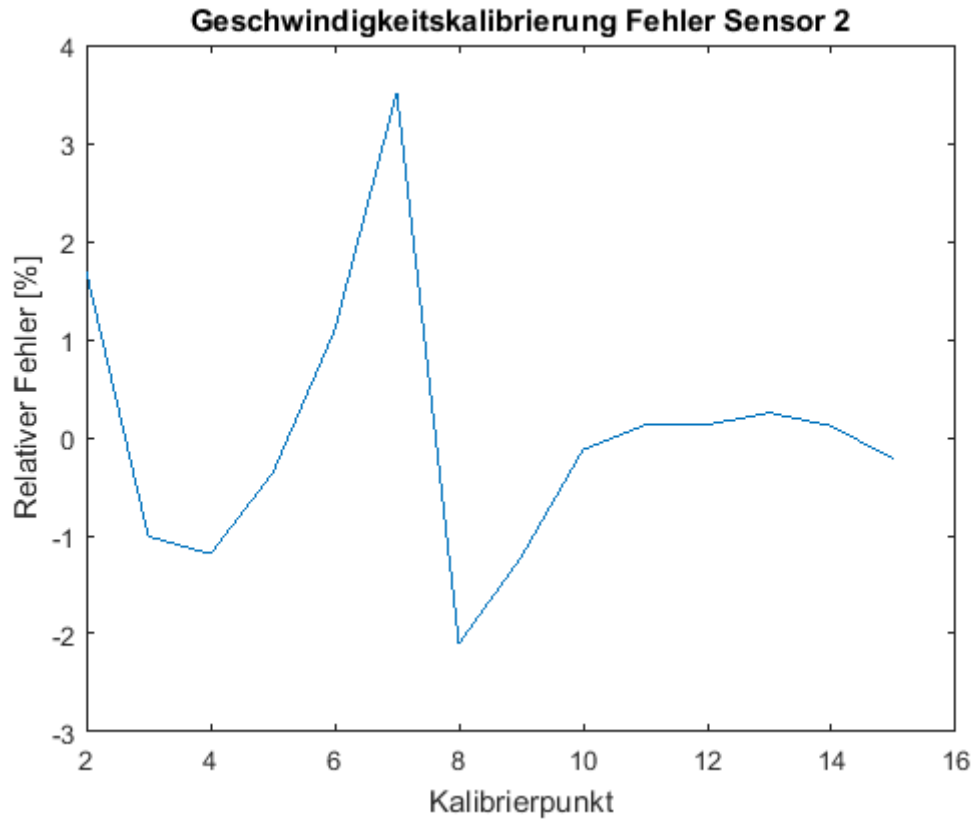
FilenameEXP='Auswertung_Daten_Kalibrierung.txt';
fileID = fopen(FilenameEXP,'w+t');
fprintf(fileID,'%20s\n','Kalibrierkonstanten:');
fprintf(fileID,'%8s\n','Sensor 1');
fprintf(fileID,'%8.4f\n',P);
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'%8s\n','Sensor 2');
fprintf(fileID,'%8.4f\n',J);
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'%8s\n','Sensor 3');
fprintf(fileID,'%8.4f\n',K);
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'%6s\n','Sensor 1');
fprintf(fileID,'%6s\n','Pitch-und Yaw-Faktor und Winkelwert(k1,h1,alpha1)');
fprintf(fileID,'%6.4f\n',k1);
fprintf(fileID,'%6.4f\n',h1);
fprintf(fileID,'%6.4f\n',alpha1);
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'%6s\n','Sensor 2');
fprintf(fileID,'%6s\n','Pitch-und Yaw-Faktor und Winkelwert(k2,h2,alpha2)');
fprintf(fileID,'%6.4f\n',k2);
fprintf(fileID,'%6.4f\n',h2);
fprintf(fileID,'%6.4f\n',alpha2);
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'%6s\n','Sensor 3');
fprintf(fileID,'%6s\n','Pitch-und Yaw-Faktor und Winkelwert(k3,h3,alpha3)');
fprintf(fileID,'%6.4f\n',k3);
fprintf(fileID,'%6.4f\n',h3);
fprintf(fileID,'%6.4f\n',alpha3);
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'%20s\n','Referenztemperaturen:');
fprintf(fileID,'%2.4f\n',Tref_1);
fprintf(fileID,'%2.4f\n',Tref_2);
fprintf(fileID,'%2.4f\n',Tref_3);
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'\n');
fprintf(fileID,'%14s\n','alpha20-werte:');
fprintf(fileID,'%2.6f\n',alpha20_1);
fprintf(fileID,'%2.6f\n',alpha20_2);
fprintf(fileID,'%2.6f\n',alpha20_3);
fclose(fileID);

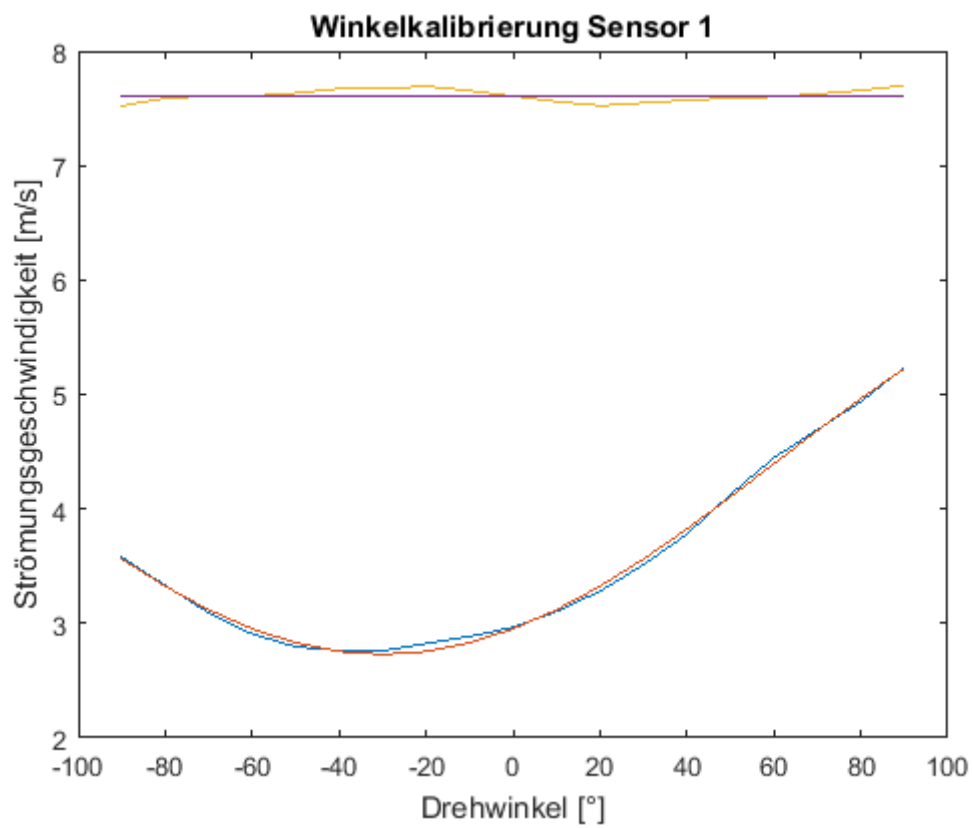
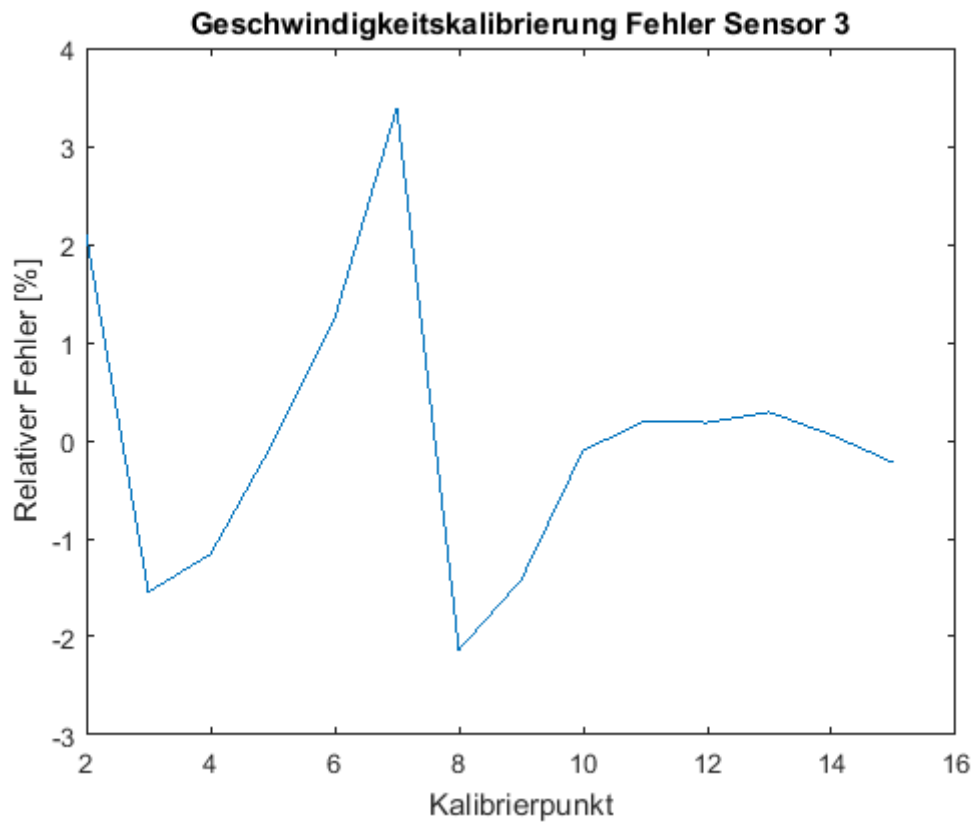
%Ausgabe der Bilder
%print( f1, '-djpeg',
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Geschwindigkeitskalibrierung_Sensor1.jpg');
%print( f2, '-djpeg',
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Geschwindigkeitskalibrierung_Sensor2.jpg');
```

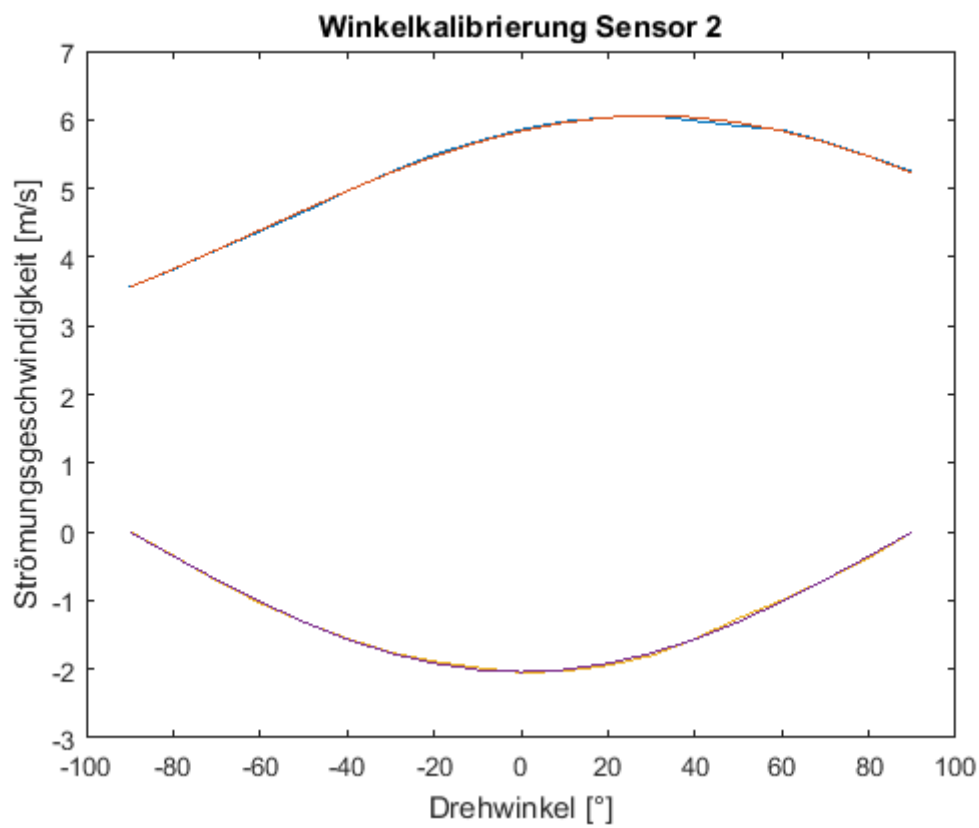
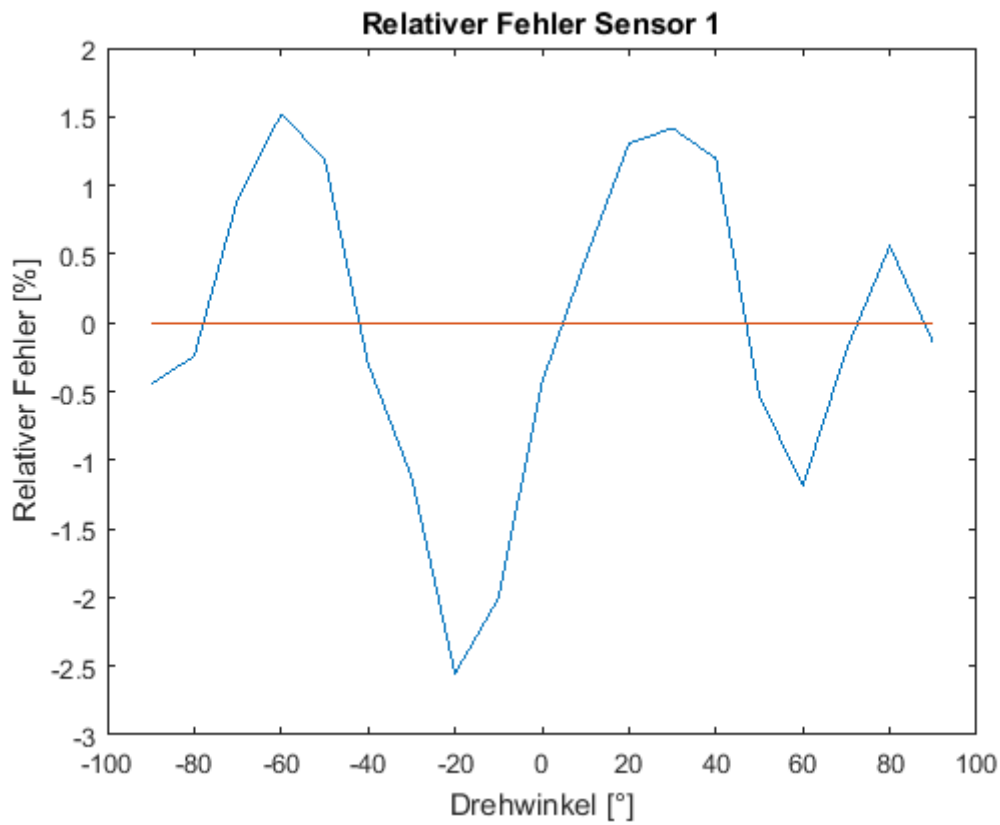
```
%print( f3, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Geschwindigkeitskalibrierung_Sensor3.jpg');  
%print( f4, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Winkelkalibrierung_Sensor1_mit_alpha.jpg');  
%print( f5, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Winkelkalibrierung_Sensor2_mit_alpha.jpg');  
%print( f6, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Winkelkalibrierung_Sensor3_mit_alpha.jpg');  
%print( f10, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Fehler_Geschwindigkeitskalibrierung_Sensor_1.jpg')  
;  
%print( f11, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Fehler_Geschwindigkeitskalibrierung_Sensor_2.jpg')  
;  
%print( f12, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Fehler_Geschwindigkeitskalibrierung_Sensor_3.jpg')  
;  
%print( f7, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Fehler_winkelkalibrierung_Sensor_1.jpg');  
%print( f8, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Fehler_winkelkalibrierung_Sensor_1.jpg');  
%print( f9, '-djpeg',  
'C:\Users\Philipp\Desktop\Kalibrierprogramm\Fehler_winkelkalibrierung_Sensor_1.jpg');
```

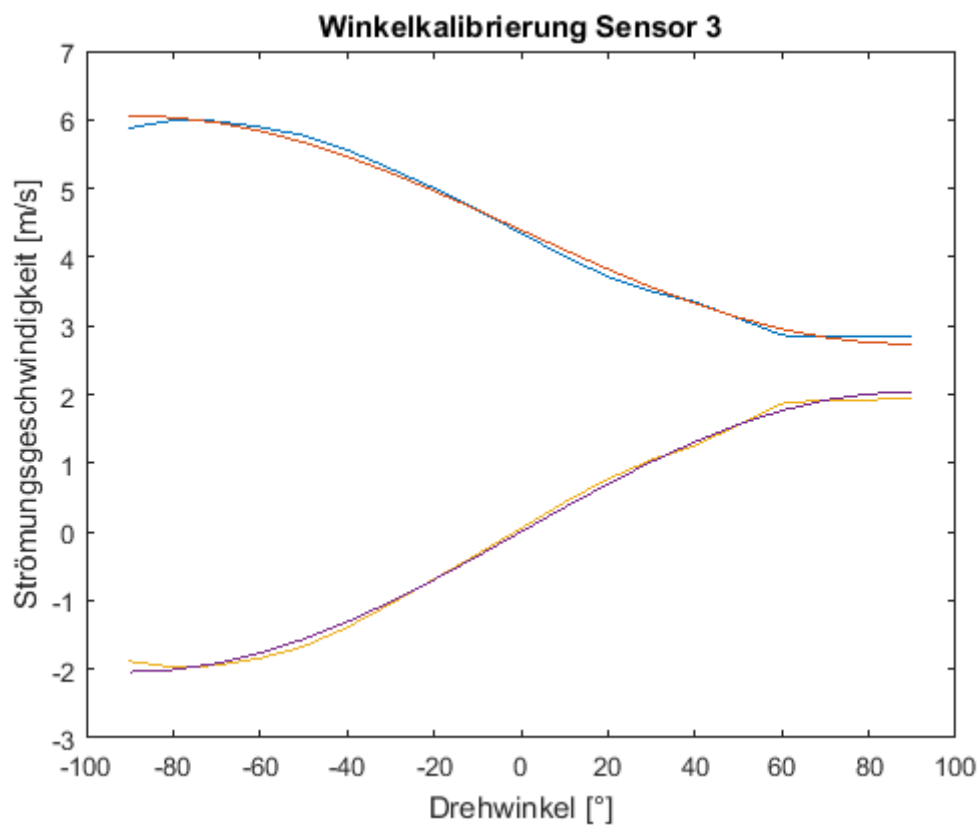
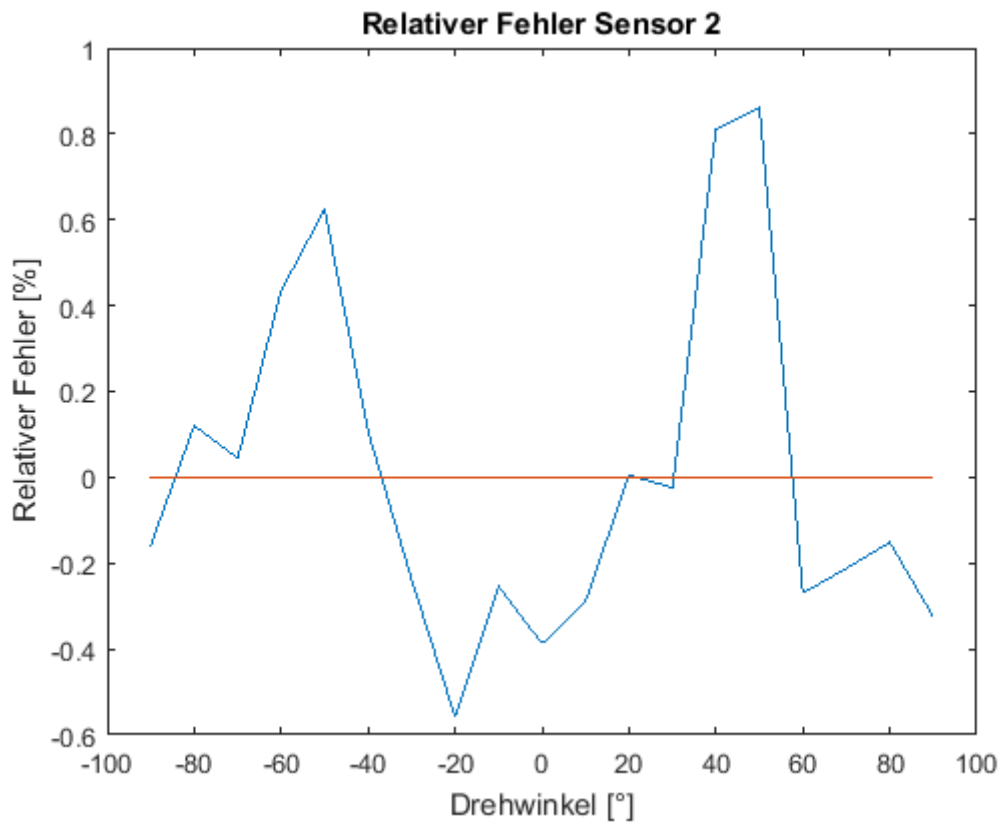


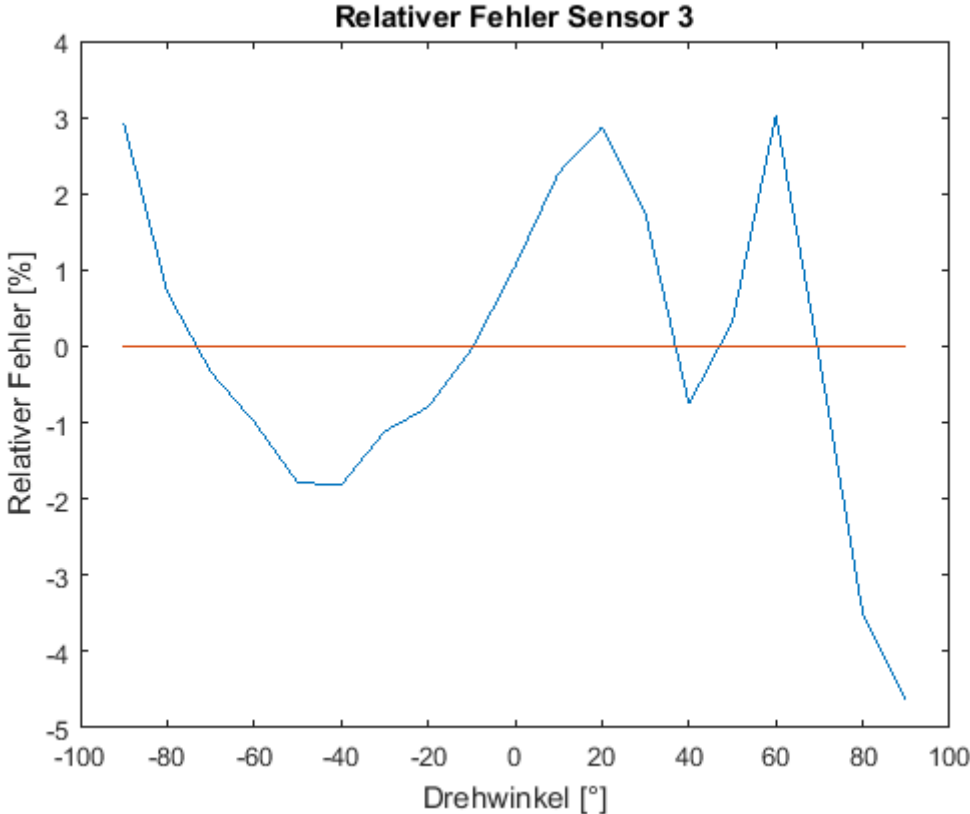












Anhang 5: Matlab Code Umrechnung der Spannungsdaten in Geschwindigkeitsdaten mittels Pitch- und Yaw-Faktoren

```
clear all;

%Definieren der Namen der Textfiles
Name_Kalibrierdaten='Auswertung_Daten_Kalibrierung.txt';
Name_Messfile='Messung_Labview_';
Name_Ausgabe='Messung_Labview_Geschwindigkeit_';

%festlegen der Anzahl der umzurechnenden files
Anzahl=1;

%Festlegen des overheat ratios
a=0.8;

%Festlegen der Transformationsmatrix
PTM=[0.57735,0.57735,0.57735;0.707107,-0.707107,6.12323*10^(-17);0.408248,0.408248,-0.816496];

%importieren der ausgewerteten Daten der Kalibrierung
Daten_Kalibrierung=importfile_Auswertung_Kalibrierung(Name_Kalibrierdaten);

%Definieren der Kalibrierkonstanten aus der Geschwindigkeitskalibrierung
C0_1=Daten_Kalibrierung(2);
C1_1=Daten_Kalibrierung(3);
C2_1=Daten_Kalibrierung(4);
C3_1=Daten_Kalibrierung(5);
C4_1=Daten_Kalibrierung(6);
C5_1=Daten_Kalibrierung(7);

C0_2=Daten_Kalibrierung(9);
C1_2=Daten_Kalibrierung(10);
C2_2=Daten_Kalibrierung(11);
C3_2=Daten_Kalibrierung(12);
C4_2=Daten_Kalibrierung(13);
C5_2=Daten_Kalibrierung(14);

C0_3=Daten_Kalibrierung(16);
C1_3=Daten_Kalibrierung(17);
C2_3=Daten_Kalibrierung(18);
C3_3=Daten_Kalibrierung(19);
C4_3=Daten_Kalibrierung(20);
C5_3=Daten_Kalibrierung(21);

%Definieren der Referenztemperaturen
Tref_1=Daten_Kalibrierung(38);
Tref_2=Daten_Kalibrierung(39);
Tref_3=Daten_Kalibrierung(40);

%Definieren der Alpha20-werte
alpha20_1=Daten_Kalibrierung(42);
alpha20_2=Daten_Kalibrierung(43);
alpha20_3=Daten_Kalibrierung(44);

%Definieren der Pitch- und Yaw-Faktoren
k1=Daten_Kalibrierung(24);
```

```

k2=Daten_Kalibrierung(29);
k3=Daten_Kalibrierung(34);

h1=Daten_Kalibrierung(25);
h2=Daten_Kalibrierung(30);
h3=Daten_Kalibrierung(35);

alpha1=Daten_Kalibrierung(26);
alpha2=Daten_Kalibrierung(31);
alpha3=Daten_Kalibrierung(36);

%Festlegen der Gaskonstante für Luft
R=287.058;

%Berechnen der alpha-Werte bei Referenztemperatur
alpha_ref_1=alpha20_1/(1+alpha20_1*(Tref_1-20));
alpha_ref_2=alpha20_2/(1+alpha20_2*(Tref_2-20));
alpha_ref_3=alpha20_3/(1+alpha20_3*(Tref_3-20));

%Berechnen der Temperatur des Drahtes
Tw_1=(a/alpha_ref_1)+Tref_1;
Tw_2=(a/alpha_ref_2)+Tref_2;
Tw_3=(a/alpha_ref_3)+Tref_3;

%Definieren der Koeffizientenmatrix
A=[k1^2,1,h1^2;h2^2,k2^2,1;1,h3^2,k3^2];
B=inv(A);

for var1=1:1:Anzahl

    Name1 =[Name_Messfile num2str(var1) '.txt'];
    [Time,Sensor1,Sensor2,Sensor3,Trigger]=import_measurementfile_1(Name1);
    [Temperatur,Druck,Irgendwas,X,Y,Z,Samples,Rate]=import_measurementfile_2(Name1);
    Druck=96254.007813;
    Dichte=Druck/(R*(Temperatur+273.15));

    E1=Sensor1*(((Tw_1-Temperatur)/(Tw_1-Tref_1))^0.5);
    E2=Sensor2*(((Tw_2-Temperatur)/(Tw_2-Tref_2))^0.5);
    E3=Sensor3*(((Tw_3-Temperatur)/(Tw_3-Tref_3))^0.5);

    MSD1cal=C0_1*E1.^5+C1_1*E1.^4+C2_1*E1.^3+C3_1*E1.^2+C4_1*E1+C5_1;
    MSD2cal=C0_2*E2.^5+C1_2*E2.^4+C2_2*E2.^3+C3_2*E2.^2+C4_2*E2+C5_2;
    MSD3cal=C0_3*E3.^5+C1_3*E3.^4+C2_3*E3.^3+C3_3*E3.^2+C4_3*E3+C5_3;

    U1cal=MSD1cal/Dichte;
    U2cal=MSD2cal/Dichte;
    U3cal=MSD3cal/Dichte;

    U1eff=U1cal*((1+k1^2+h1^2)^0.5*cosd(alpha1));
    U2eff=U2cal*((1+k2^2+h2^2)^0.5*cosd(alpha2));
    U3eff=U3cal*((1+k3^2+h3^2)^0.5*cosd(alpha3));

%Definieren der Matrizen
Utr=zeros(length(Sensor1),1);
Vtr=zeros(length(Sensor1),1);
Wtr=zeros(length(Sensor1),1);

for var2=1:1:length(Sensor1)

```

```
C=[U1eff(var2)^2;U2eff(var2)^2;U3eff(var2)^2];
C=B*C;
D=abs(C);
D=D.^0.5;
UGesch=PTM*D;
Utr(var2)=UGesch(1);
Vtr(var2)=UGesch(2);
Wtr(var2)=UGesch(3);
```

end

```
Name1=[Name_Ausgabe num2str(var1) '.txt'];
T=[transpose(Time); transpose(Utr); transpose(Vtr); transpose(Wtr);transpose(Trigger)];
```

```
fileID = fopen(Name1,'w+t');
fprintf(fileID,'%8s %8.4f %8.4f %8.4f\n','Position',X,Y,Z);
fprintf(fileID,'%8s %8s %8s %8s %8s\n','Time','U','V','W','Trigger');
fprintf(fileID,'%8.4f %8.4f %8.4f %8.4f %8.4f\n',T);
fclose(fileID);
```

end

Anhang 6: Alternative Kalibrier- und Auswertemethode

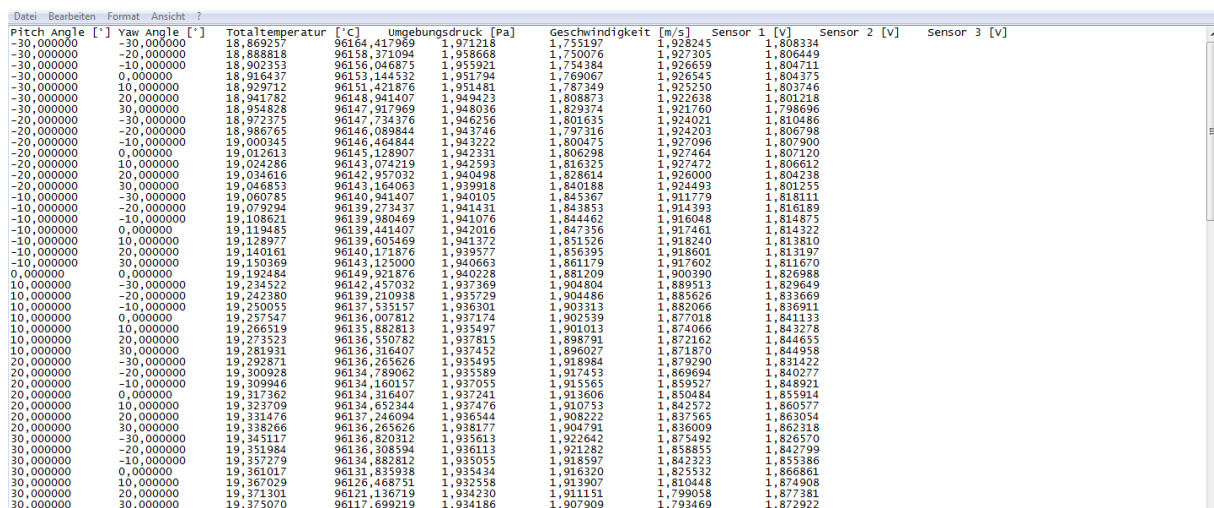
Neben der im Hauptteil besprochenen Kalibrier- und Auswertemethode wurde im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Methode erarbeitet. Dabei werden die Spannungen bei der Messung und der Kalibrierung mit denselben Labview-Programmen aufgenommen wie im Hauptteil beschrieben. Die Durchführung und Auswertung der Kalibrierung sowie die Auswertung der Messdaten weisen jedoch deutliche Unterschiede auf.

Durchführung der Kalibrierung

Zuerst wird die HDA-Sonde im Kalibrierkanal auf die Nullposition eingestellt. Bei dem Kalibrierkanal welcher am Institut zur Verfügung steht entspricht die Nullposition einem Drehwinkel von 90° und einem Kippwinkel von 0°. Danach werden die beiden Winkel, bei möglichst konstanter Geschwindigkeit und Temperatur, von -30° bis 30° variiert. Dabei werden in jeder Winkelposition die Spannungen, die Temperatur, die Geschwindigkeit und die Winkel selbst aufgezeichnet. Diese Vorgehensweise wird bei verschiedenen vielen Geschwindigkeiten durchgeführt. Je höher die Anzahl der verschiedenen Geschwindigkeiten im Messbereich, umso genauer ist die Kalibrierung. (Kurten, 2011)

Struktur der Kalibrierdaten

Ein beispielhafter Output der Kalibrierung ist in Abbildung 123 dargestellt. Das Text-file mit dieser Struktur kann im nachfolgenden Matlab-Programm zur Auswertung eingelesen werden.



Pitch Angle [°]	Yaw Angle [°]	Totaltemperatur [°C]	Umgebungsdruck [Pa]	Geschwindigkeit [m/s]	Sensor 1 [V]	Sensor 2 [V]	Sensor 3 [V]
-30,000000	-30,000000	18,869257	96164,417969	1,971218	1,755197	1,928245	1,808334
-30,000000	-20,000000	18,888818	96158,271094	1,958668	1,750076	1,927303	1,806449
-30,000000	-10,000000	18,902353	96156,046875	1,955921	1,754384	1,926659	1,804711
-30,000000	0,000000	18,916437	96153,144332	1,951794	1,769067	1,926545	1,804375
-30,000000	10,000000	18,929712	96151,421876	1,951481	1,787349	1,925250	1,803746
-30,000000	20,000000	18,941782	96148,941407	1,949423	1,808873	1,922638	1,801218
-30,000000	30,000000	18,954828	96147,917969	1,948036	1,829374	1,921760	1,798696
-20,000000	-30,000000	18,972375	96147,734376	1,945236	1,801635	1,924021	1,810486
-20,000000	-20,000000	18,986765	96146,089844	1,943746	1,797316	1,924501	1,806798
-20,000000	-10,000000	19,000345	96146,464844	1,943222	1,800475	1,927096	1,807900
-20,000000	0,000000	19,012613	96145,128907	1,942351	1,806298	1,927464	1,807120
-20,000000	10,000000	19,024286	96143,074219	1,940593	1,816325	1,927472	1,806612
-20,000000	20,000000	19,034616	96142,957032	1,940498	1,828614	1,926000	1,804238
-20,000000	30,000000	19,046853	96143,164063	1,939918	1,840188	1,924493	1,801255
-10,000000	-30,000000	19,060785	96140,941407	1,940105	1,845367	1,911779	1,818111
-10,000000	-20,000000	19,079294	96139,273437	1,941431	1,843853	1,914393	1,816189
-10,000000	-10,000000	19,108621	96139,980469	1,941076	1,844462	1,916048	1,814875
-10,000000	0,000000	19,119485	96139,441407	1,942016	1,847356	1,917461	1,814322
-10,000000	10,000000	19,128977	96139,605469	1,941372	1,851526	1,918240	1,813810
-10,000000	20,000000	19,140161	96140,171876	1,939577	1,856395	1,918601	1,813197
-10,000000	30,000000	19,150369	96143,125000	1,940663	1,861179	1,917602	1,811670
0,000000	0,000000	19,192484	96149,921876	1,940228	1,881209	1,900390	1,826988
10,000000	-30,000000	19,234522	96142,457032	1,937369	1,904804	1,889513	1,829649
10,000000	-20,000000	19,242380	96139,210938	1,935729	1,904466	1,885626	1,833669
10,000000	-10,000000	19,250055	96137,535157	1,936301	1,903313	1,882066	1,836911
10,000000	0,000000	19,257547	96136,007812	1,937174	1,902539	1,877018	1,841133
10,000000	10,000000	19,266519	96135,882813	1,935497	1,901013	1,874066	1,843278
10,000000	20,000000	19,273523	96136,550782	1,937815	1,898781	1,872162	1,844655
10,000000	30,000000	19,281931	96136,316407	1,937452	1,896027	1,871870	1,844958
20,000000	-30,000000	19,292871	96136,265626	1,935495	1,918984	1,879290	1,831422
20,000000	-20,000000	19,300928	96134,789062	1,935589	1,917453	1,869694	1,840277
20,000000	-10,000000	19,309946	96134,160157	1,937055	1,915565	1,859527	1,848921
20,000000	0,000000	19,317362	96134,316407	1,937241	1,912606	1,850484	1,855914
20,000000	10,000000	19,325709	96134,652344	1,937476	1,910753	1,842572	1,860577
20,000000	20,000000	19,331476	96137,246094	1,936544	1,908222	1,837565	1,863054
20,000000	30,000000	19,338266	96136,265626	1,938177	1,904791	1,836009	1,862318
30,000000	-30,000000	19,345117	96136,820312	1,935613	1,922642	1,875492	1,826570
30,000000	-20,000000	19,351984	96136,308594	1,936113	1,921282	1,858855	1,842799
30,000000	-10,000000	19,357279	96134,882812	1,935055	1,918597	1,842322	1,855386
30,000000	0,000000	19,361017	96131,839398	1,935434	1,916320	1,825532	1,866861
30,000000	10,000000	19,367029	96126,468751	1,932558	1,913907	1,810448	1,874908
30,000000	20,000000	19,371301	96121,136719	1,934230	1,911151	1,799058	1,877381
30,000000	30,000000	19,375070	96117,699219	1,934186	1,907909	1,793469	1,872922

Abbildung 123: Struktur der Kalibrierdaten bei alternativer Auswertemethode

Auswertung der Kalibrierung

Die Auswertung der Kalibrierung erfolgt in einem dafür programmierten Matlab-Programm. Grob zusammengefasst führt das Programm folgende Schritte aus:

- Einlesen der Kalibrierdaten und Eingabe relevanter Parameter in der Bedienoberfläche
- Berechnung der statischen Temperatur
- Berechnung der Dichte
- Berechnung der Massenstromdichte
- Berechnung der Temperatur des Drahtes
- Korrektur des Fehlers aufgrund von abweichender Temperatur
- Berechnen der dimensionslosen Kennzahlen
- Berechnen der Koeffizienten mittels Regressionsmodell
- Ausgabe des Vergleichs der Sollgrößen und der mit dem Regressionsmodell ermittelten Größen
- Ausgabe der dimensionslosen Kennzahlen
- Ausgabe der Koeffizienten

Auf einige der oben angeführten Punkte wurde bereits bei der Beschreibung der Programme in Kapitel 4 eingegangen. Daher werden im Folgenden nur mehr jene Punkte beschrieben, welche noch nicht genauer erläutert wurden.

Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen

Nachdem die Massenstromdichte ermittelt und die Spannungen korrigiert wurden, werden dimensionslose Kennzahlen aus den Spannungswerten errechnet. Diese dimensionslosen Kennzahlen sind mit Gleichung 6.1 bis 6.4 gegeben: (Kurten, 2011)

$$k_{\delta} = \frac{U_2 - U_3}{\Delta U} \quad (6.1)$$

$$k_{\gamma} = \frac{0.5 * (U_2 - U_3) - U_1}{\Delta U} \quad (6.2)$$

$$k_{MSD} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{300} \quad (6.3)$$

$$\Delta U = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} \quad (6.4)$$

Das Ergebnis der Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen und das sich daraus ergebende Kennfeld ist in Abbildung 124 dargestellt.

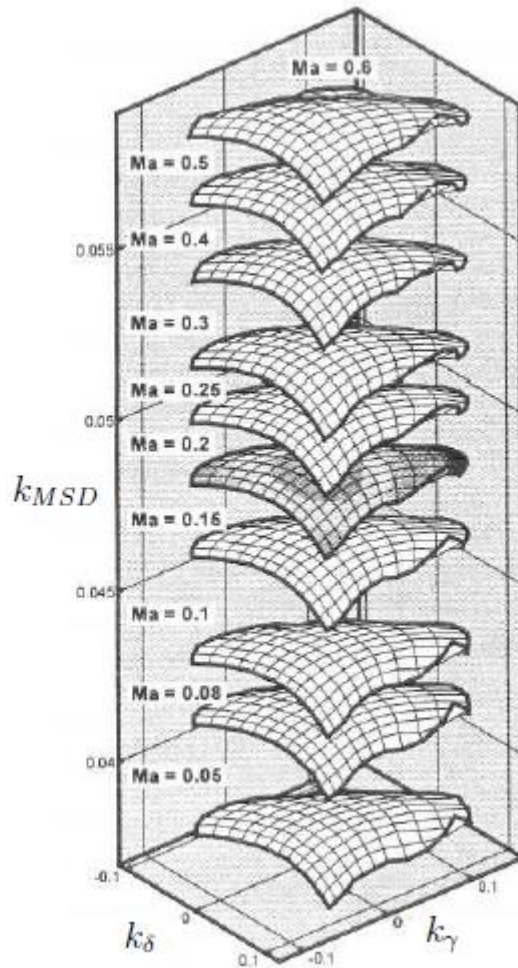


Abbildung 124: Kennfeld der 3D-Kalibrierung (Kurten, 2011)

Berechnung der Koeffizienten mittels Regressionsmodell

Bei der Berechnung der Koeffizienten, die zur Auswertung der Messdaten notwendig sind, wird dasselbe Regressionsmodell auf die beiden Winkel und die Massenstromdichte angewandt. Die dazugehörigen Polynome sehen wie folgt aus: (Kurten, 2011)

$$\delta = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l a_{\delta,ijk} * k_{\delta}^i * k_{\gamma}^j * k_{MSD}^k \quad (6.5)$$

$$\gamma = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l a_{\gamma,ijk} * k_{\delta}^i * k_{\gamma}^j * k_{MSD}^k \quad (6.6)$$

$$MSD = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l a_{MSD,ijk} * k_{\delta}^i * k_{\gamma}^j * k_{MSD}^k \quad (6.7)$$

Die Polynome werden mit einem maximalen Grad von 6 ausgeführt, da ein höherer Grad nur zu mehr Rechenaufwand, aber zu kaum einer höheren Genauigkeit führt. Als Regressionsmodell wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. Das Ergebnis des Regressionsmodells bei einem maximalen Grad von 6 sind drei Mal 329 Koeffizienten. (Kurten, 2011)

Ausgabe des Vergleichs der Sollgrößen und der mit dem Regressionsmodell ermittelten Größen

Um das aufgestellte Modell überprüfen zu können, werden die Ergebnisse des Modells mit den tatsächlich aufgenommenen Winkeln und Massenstromdichten verglichen. Zusätzlich wird auch der relative Fehler, bezogen auf die tatsächlichen Größen ermittelt. Das beispielhafte Ergebnis für den Massenstrom wird in Abbildung 125 gezeigt.

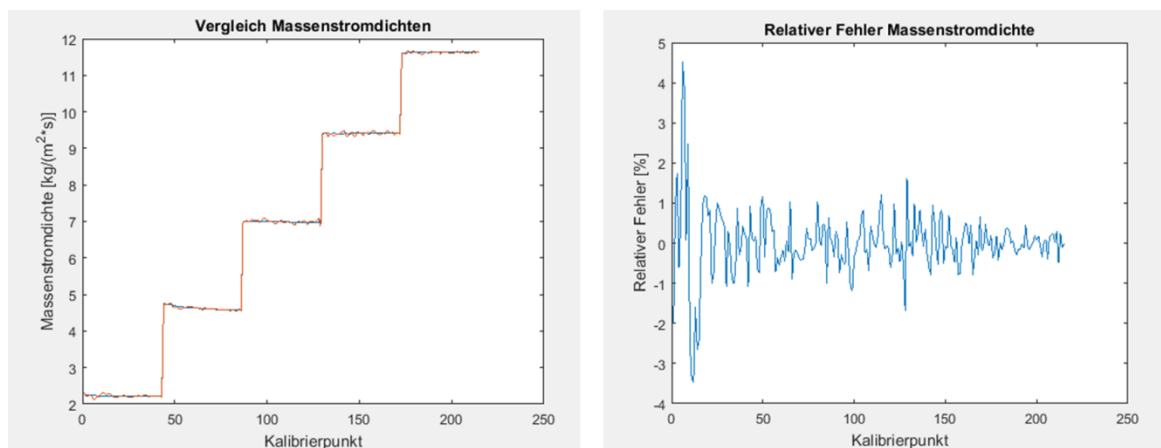


Abbildung 125: Alternative Auswertung: Fehler und Vergleich Massenstromdichten

Ausgabe der dimensionslosen Kennzahlen

Neben der Ausgabe des Vergleichs und des relativen Fehlers bietet das Programm zusätzlich die Ausgabe der dimensionslosen Kennzahlen. Diese werden in einem dreidimensionalen Koordinatensystem dargestellt, siehe Abbildung 126, und zeigen die verschiedenen Ebenen, ähnlich wie Abbildung 124.

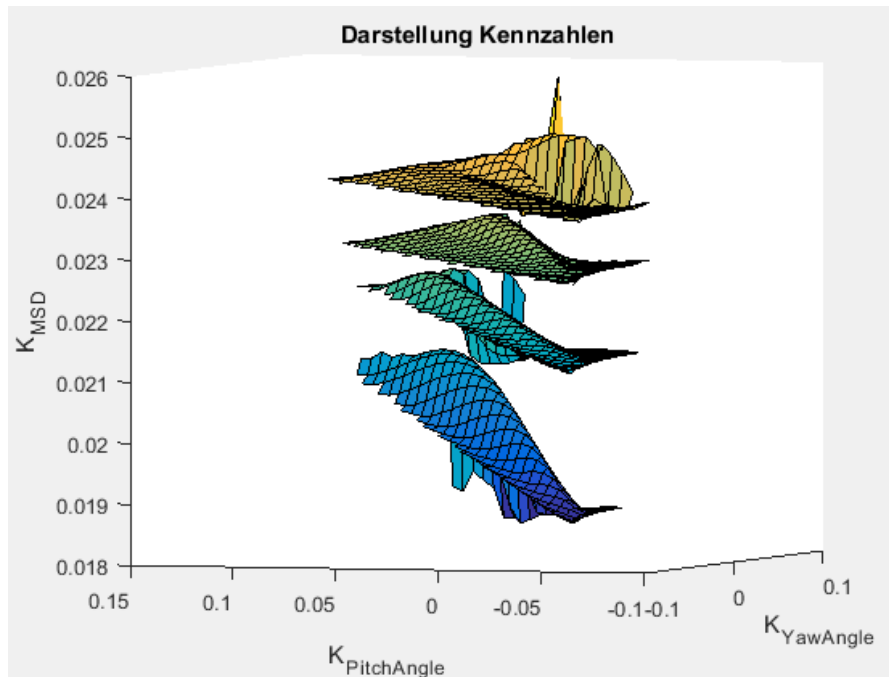


Abbildung 126: Darstellung dimensionsloser Kennzahlen

Auswertung der Messung

Die Auswertung der Messdaten erfolgt genau umgekehrt zu der Auswertung der Kalibrierung. Mit den erhaltenen Spannungen der drei Sensoren aus den Messdaten werden die dimensionslosen Kennzahlen ermittelt, welche mit den entsprechenden Koeffizienten aus der Kalibrierung in das Polynom eingesetzt die Massenstromdichte bzw. einen der beiden Winkel ergeben. Danach können über die geometrischen Beziehungen die Geschwindigkeiten U , V und W errechnet werden.

Anhang 7: Matlab Code Auswertung der Kalibrierung mit dimensionslosen Kennzahlen (Alternative Auswertemethode)

```
clear all;

%Festlegen des Namens des Text-Files und Import
Name_Kalibrierdaten='Kalibrierung_Aachen.txt';
[Pitch_Angle,Yaw_Angle,Totaltemperatur,Umgebungsdruck,Geschwindigkeit,Sensor_1,Sensor_2,Sensor_3]=Import_Kalibrierdaten(Name_Kalibrierdaten);

%Definieren der Temperaturparameter Referenztemperatur und der
%Alphawerte der drei Sensoren
Tref_1=20.147;
Tref_2=20.147;
Tref_3=20.147;
alpha20_1=0.46/100;
alpha20_2=0.47/100;
alpha20_3=0.45/100;

%Definieren des overheat Ratios
a=0.8;

%Festlegen der Konstanten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität
%mittels Polynomansatz
K1=1.02251;
K2=-1.75903*10^(-4);
K3=4.02136*10^(-7);
K4=-4.86946*10^(-11);

%Definieren der Gaskonstante von Luft [J/(kg*K)]
R=287.058;

%Festlegen der Matrizen StatischeTemperatur, Dichte und Massenstromdichte
StatischeTemperatur=zeros(length(Totaltemperatur),1);
Dichte=zeros(length(Totaltemperatur),1);
Massenstromdichte=zeros(length(Totaltemperatur),1);

for var1=1:length(Totaltemperatur)

    %Definieren der "Abweichung" damit das Programm in die Schleife geht
    Abweichung=0.5;

    %Berechnung des Startwerts

    cp=(K1+K2*Totaltemperatur(var1)+K3*Totaltemperatur(var1)^2+K4*Totaltemperatur(var1)^3)*1000;
    TStart=Totaltemperatur(var1)-((Geschwindigkeit(var1)^2)/cp);
    TStat=TStart;

    while Abweichung >0.00001

        cp=(K1+K2*TStat+K3*TStat^2+K4*TStat^3)*1000;
        TBerechnung=Totaltemperatur(var1)-((Geschwindigkeit(var1)^2)/cp);
        Abweichung=abs(TStat-TBerechnung);
        TStat=TBerechnung;

    end

end
```

```

    StatischeTemperatur(var1)=TStat;

    %Berechnung der Dichte mittels Idealgleichung
    Dichte(var1)=Umgebungsdruck(var1)/(R*(StatischeTemperatur(var1)+273.15));

    %Berechnung der Massenstromdichte
    Massenstromdichte(var1)=Dichte(var1)*Geschwindigkeit(var1);

end

%Berechnen der alpha-Werte bei Referenztemperatur
alpha_ref_1=alpha20_1/(1+alpha20_1*(Tref_1-20));
alpha_ref_2=alpha20_2/(1+alpha20_2*(Tref_2-20));
alpha_ref_3=alpha20_3/(1+alpha20_3*(Tref_3-20));

%Berechnen der Temperatur des Drahtes
Tw_1=(a/alpha_ref_1)+Tref_1;
Tw_2=(a/alpha_ref_2)+Tref_2;
Tw_3=(a/alpha_ref_3)+Tref_3;

%Definieren der Matrizen Ecorr1_GK, Ecorr2_GK und Ecorr3_GK
Ecorr1=zeros(length(Sensor_1),1);
Ecorr2=zeros(length(Sensor_2),1);
Ecorr3=zeros(length(Sensor_3),1);

%Korrigieren der Spannungen auf Referenztemperatur
for var2=1:length(Sensor_1)

    Ecorr1(var2)=Sensor_1(var2)*((Tw_1-StatischeTemperatur(var2))/(Tw_1-Tref_1))^(0.5);
    Ecorr2(var2)=Sensor_2(var2)*((Tw_2-StatischeTemperatur(var2))/(Tw_2-Tref_2))^(0.5);
    Ecorr3(var2)=Sensor_3(var2)*((Tw_3-StatischeTemperatur(var2))/(Tw_3-Tref_3))^(0.5);

end

%Berechnen der dimensionslosen Kennzahlen
Delta_U=(Ecorr1+Ecorr2+Ecorr3)/3;
K_Pitch_Angle=(Ecorr2-Ecorr3)./Delta_U;
K_Yaw_Angle=(0.5*(Ecorr2+Ecorr3)-Ecorr1)./Delta_U;
K_MSD=(Ecorr1+Ecorr2+Ecorr3)/300;

%Koeffizienten mit Regressionsmodell berechnen

%Massenstromdichte
tbl1=table(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,Massenstromdichte);
modelfun=Modell_Regression;
beta0=zeros(1,343);
for var3=1:343

    beta0(1,var3)=10;

end
mdl1 = fitnlm(tbl1,modelfun,beta0);

%Erstellen der Koeffizientenmatrix b_MSD
b_MSD=zeros(length(beta0),1);

%Befüllen der Matrix mit den errechneten Koeffizienten
for var4=1:length(beta0)

```

```

        b_MSD(var4,1)=table2array(md11.Coefficients(var4,1));

end

%Ermittlung der berechneten Massenstromdichte
MSD_Berechnet=Berechnung_Polynomial(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,b_MSD);

%Berechnung des tatsächlichen und relativen Fehlers
Fehler_absolut=Massenstromdichte-MSD_Berechnet;
Fehler_relativ=(Fehler_absolut./Massenstromdichte)*100;

%Ausgabe des Vergleichs und des relativen Fehlers
x=1:length(Massenstromdichte);
x=transpose(x);
f1=figure('Name','Vergleich Massenstromdichten','NumberTitle','off');
plot(x,Massenstromdichte,x,MSD_Berechnet);
title('Vergleich Massenstromdichten');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Massenstromdichte [kg/(m^2*s)]');

f2=figure('Name','Fehler Massenstromdichte','NumberTitle','off');
plot(x,Fehler_relativ);
title('Relativer Fehler Massenstromdichte');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

%Pitch Angle
tbl2=table(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,Pitch_Angle);
modelfun=Model_Regression;
beta0=zeros(1,343);
for var5=1:343

    beta0(1,var5)=10;

end
md12 = fitnlm(tbl2,modelfun,beta0);

%Erstellen der Koeffizientenmatrix b_MSD
b_Pitch_Angle=zeros(length(beta0),1);

%Befüllen der Matrix mit den errechneten Koeffizienten
for var6=1:length(beta0)

    b_Pitch_Angle(var6,1)=table2array(md12.Coefficients(var6,1));

end

%Ermittlung des berechneten Pitch Angles
Pitch_Angle_Berechnet=Berechnung_Polynomial(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,b_Pitch_Angle);

%Berechnung des tatsächlichen und relativen Fehlers
Fehler_absolut=Pitch_Angle-Pitch_Angle_Berechnet;
Fehler_relativ=(Fehler_absolut./Pitch_Angle)*100;
var10=0;

for var9=1:length(Pitch_Angle)

```

```
if Pitch_Angle(var9)==0

else
    var10=var10+1;
    Fehler_relativ_Ausgabe(var10)=Fehler_relativ(var9);

end

end

%Ausgabe des Vergleichs und des relativen Fehlers
x=1:length(Pitch_Angle);
x=transpose(x);
f3=figure('Name','Vergleich Pitch Angle','NumberTitle','off');
plot(x,Pitch_Angle,x,Pitch_Angle_Berechnet);
title('Vergleich Pitch Angle');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Pitch Angle [°]');

x=1:length(Fehler_relativ_Ausgabe);
x=transpose(x);
f4=figure('Name','Fehler Pitch Angle','NumberTitle','off');
plot(x,Fehler_relativ_Ausgabe);
title('Relativer Fehler Pitch Angle');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

%Yaw Angle
tbl3=table(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,Yaw_Angle);
modelfun=ModelRegression;
beta0=zeros(1,343);

for var7=1:343

    beta0(1,var7)=10;

end
mdl3 = fitnlm(tbl3,modelfun,beta0);

%Erstellen der Koeffizientenmatrix b_MSD
b_Yaw_Angle=zeros(length(beta0),1);

%Befüllen der Matrix mit den errechneten Koeffizienten
for var8=1:length(beta0)

    b_Yaw_Angle(var8,1)=table2array(mdl3.Coefficients(var8,1));

end

%Ermittlung des berechneten Pitch Angles
Yaw_Angle_Berechnet=Berechnung_Polynomial(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,b_Yaw_Angle);

%Berechnung des tatsächlichen und relativen Fehlers
Fehler_absolut=Yaw_Angle-Yaw_Angle_Berechnet;
Fehler_relativ=(Fehler_absolut./Yaw_Angle)*100;
var12=0;

for var11=1:length(Pitch_Angle)
```



```
if Yaw_Angle(var11)==0

else
    var12=var12+1;
    Fehler_relativ_Ausgabe(var12)=Fehler_relativ(var11);

end

end

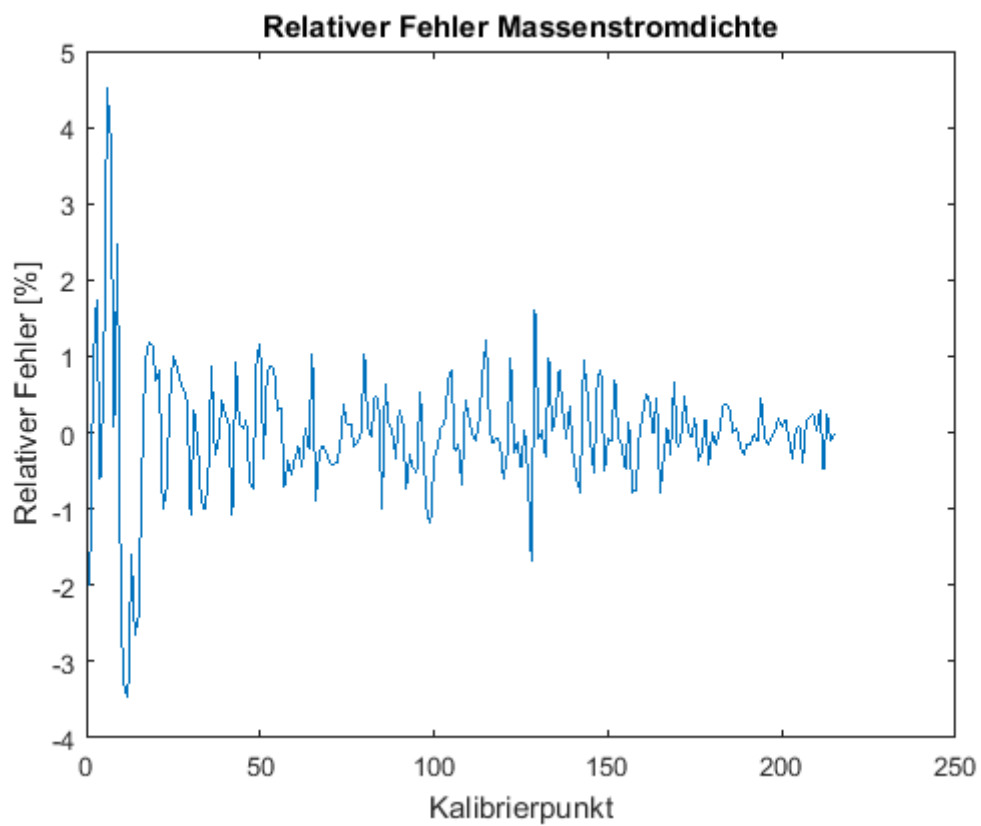
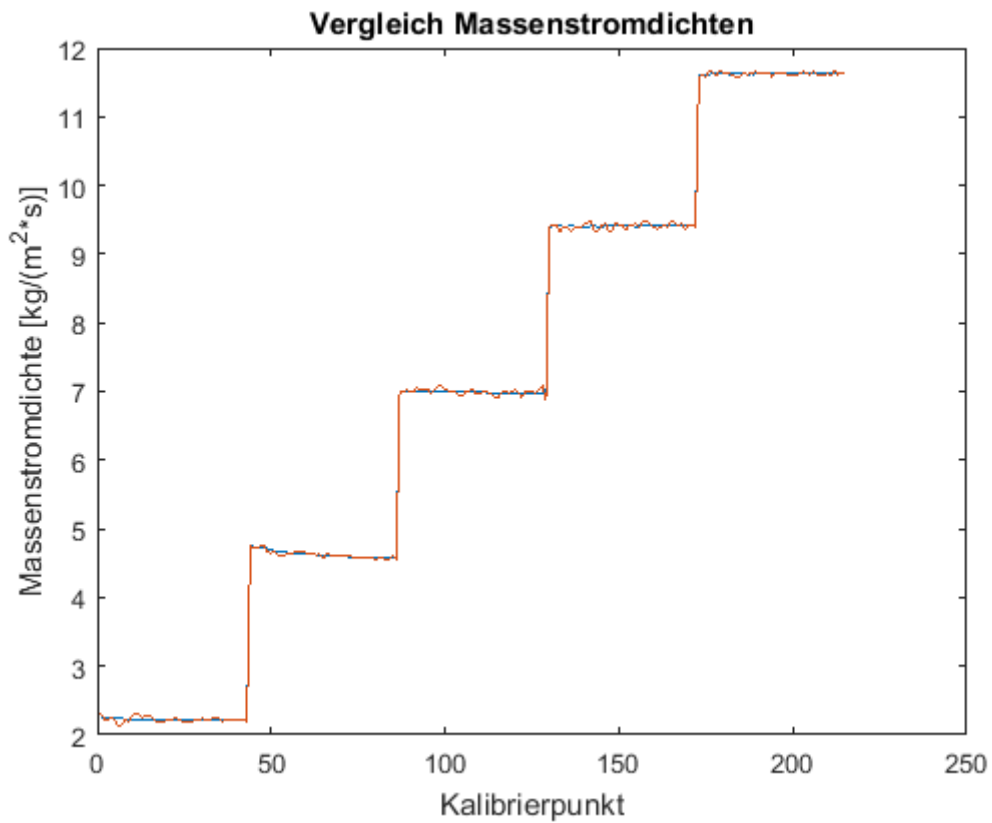
%Ausgabe des Vergleichs und des relativen Fehlers
x=1:length(Yaw_Angle);
x=transpose(x);
f5=figure('Name','Vergleich Yaw Angle','NumberTitle','off');
plot(x,Yaw_Angle,x,Yaw_Angle_Berechnet);
title('Vergleich Yaw Angle');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Yaw Angle [°]');

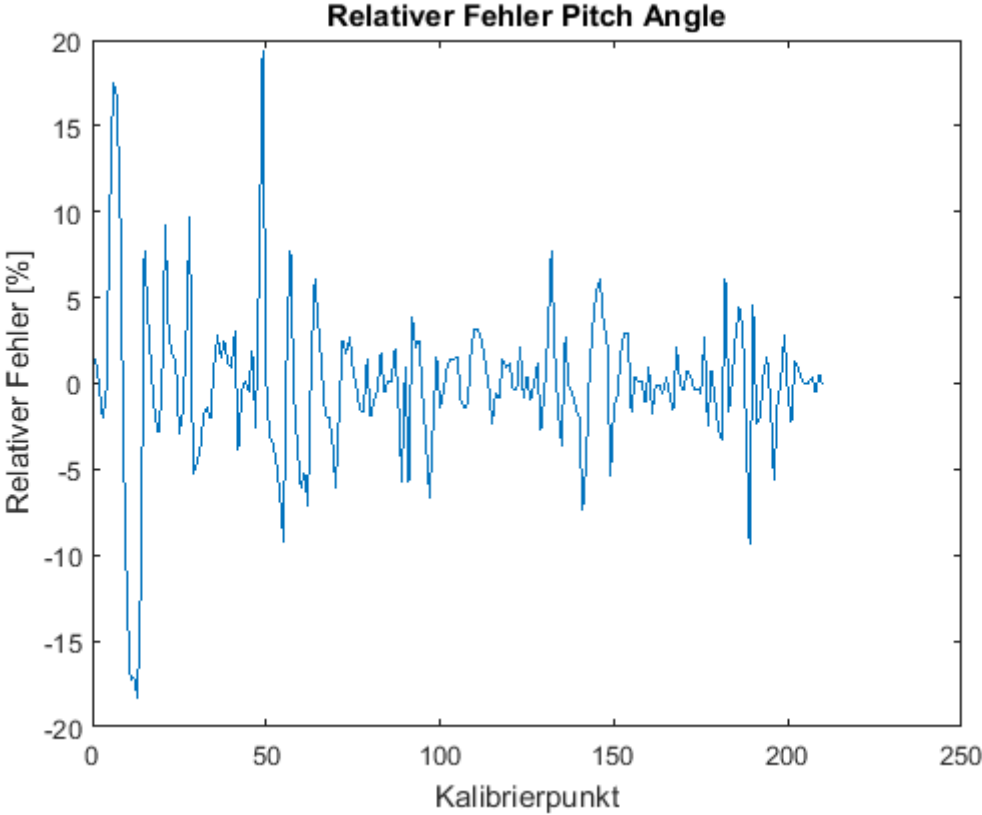
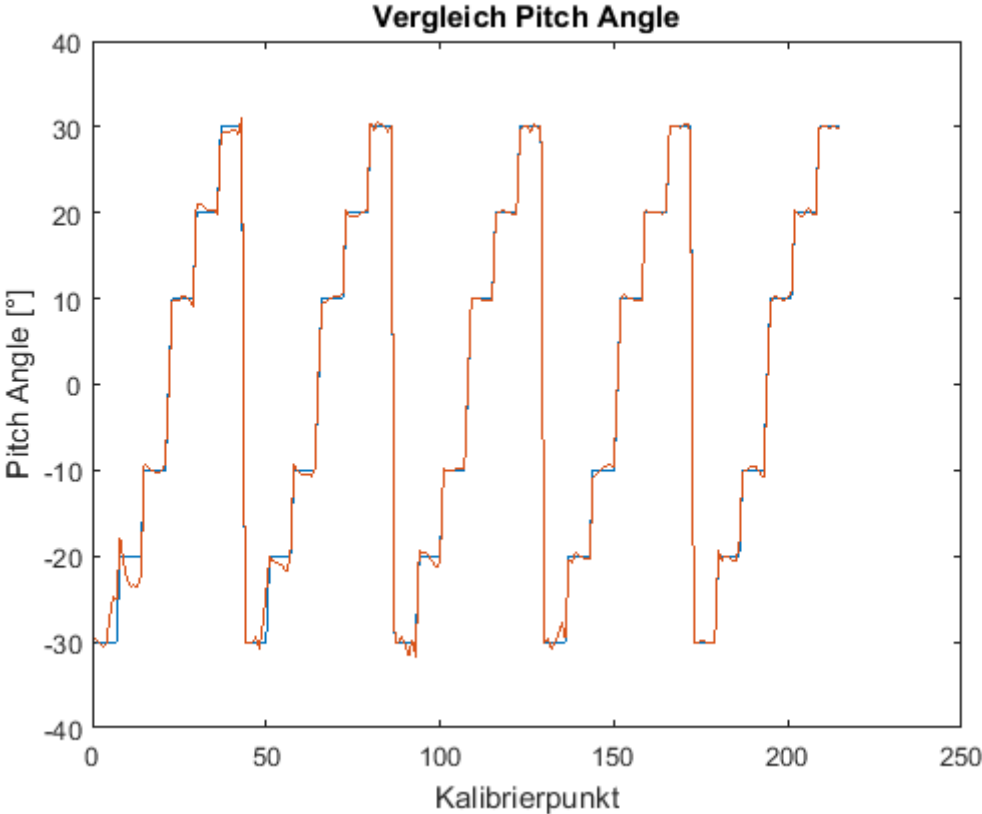
x=1:length(Fehler_relativ_Ausgabe);
x=transpose(x);
f6=figure('Name','Fehler Yaw Angle','NumberTitle','off');
plot(x,Fehler_relativ_Ausgabe);
title('Relativer Fehler Yaw Angle');
xlabel('Kalibrierpunkt');
ylabel('Relativer Fehler [%]');

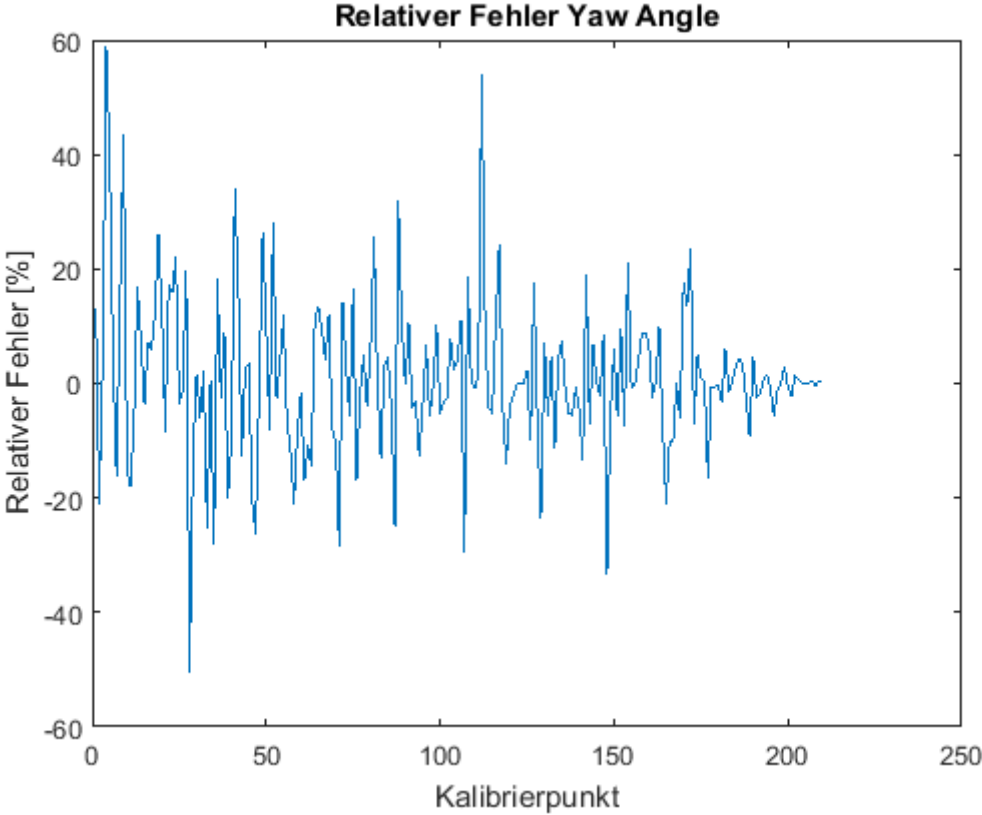
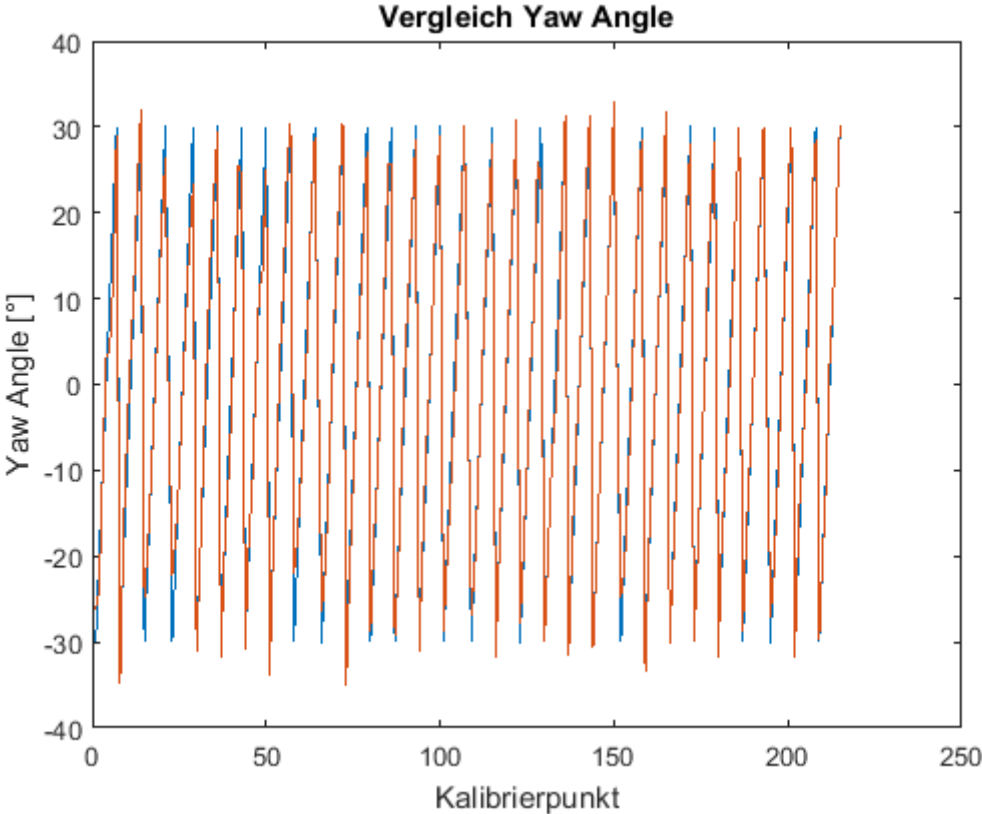
%Ausgabe der dimensionslosen Kennzahlen in einem Plot
f5=figure('Name','Dimensionslose Kennzahlen','NumberTitle','off');
hold on
rangex=-0.3:0.005:0.3;
rangey=-0.3:0.005:0.3;
[X,Y]=meshgrid(rangex,rangey);
for var13=1:(length(K_MSD)/49)
    var14=var13-1;
    K_Pitch_Angle_Ausgabe=K_Pitch_Angle((var14*49+1):(var13*49),1);
    K_Yaw_Angle_Ausgabe=K_Yaw_Angle((var14*49+1):(var13*49),1);
    K_MSD_Ausgabe=K_MSD((var14*49+1):(var13*49),1);
    Z=griddata(K_Pitch_Angle_Ausgabe,K_Yaw_Angle_Ausgabe,K_MSD_Ausgabe,X,Y,'cubic');
    surf(X,Y,Z);

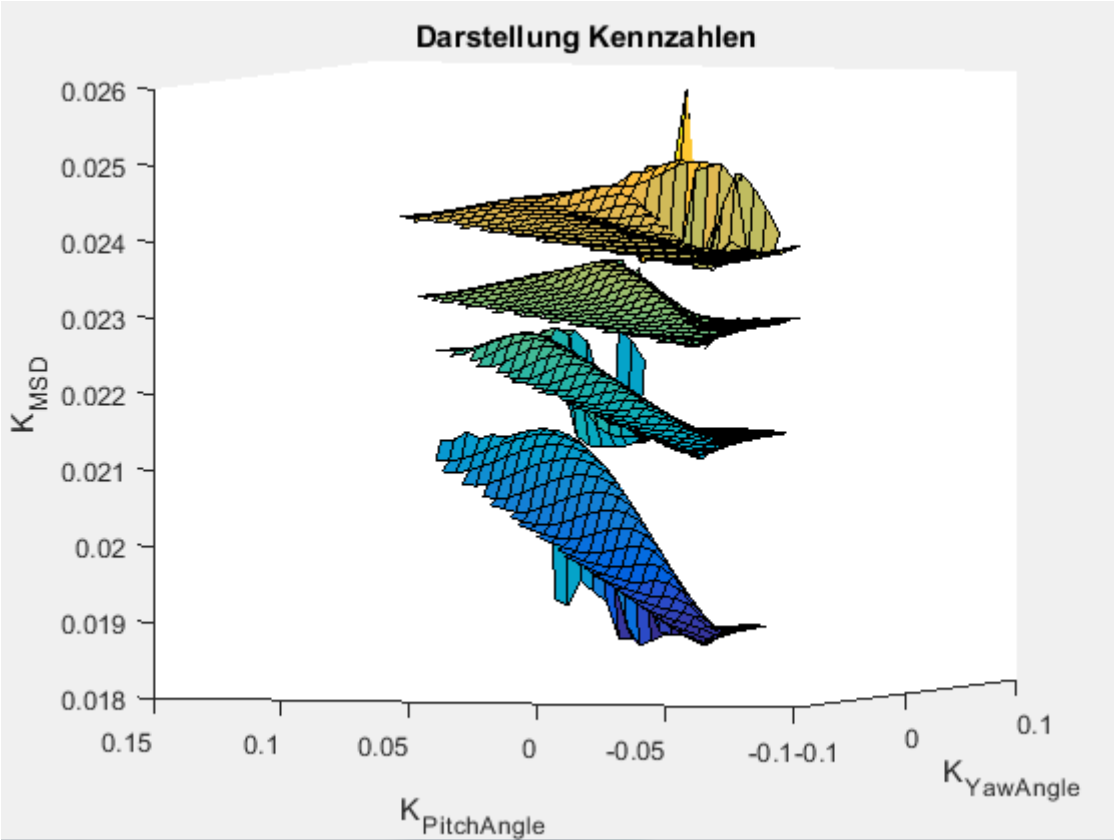
end
title('Darstellung Kennzahlen');
xlabel('K_Y_a_w_A_n_g_l_e');
ylabel('K_P_i_t_c_h_A_n_g_l_e');
zlabel('K_M_S_D');
hold off

%Ausgabe der Koeffizienten
A=[transpose(b_MSD); transpose(b_Pitch_Angle); transpose(b_Yaw_Angle)];
FilenameEXP='Koeffizienten_Auswertung_Kalibrierung.txt';
fileID = fopen(FilenameEXP,'w+t');
fprintf(fileID,'%5s %32s %18s\n','b_MSD','b_Pitch_Angle','b_Yaw_Angle');
fprintf(fileID,'%20.6f %22.6f %22.6f\n',A);
fclose(fileID);
```









Anhang 8: Umrechnung der Spannungsdaten in Geschwindigkeitsdaten mit dimensionslosen Kennzahlen (Alternative Auswertemethode)

```
clear all;

%Festlegen der Namen der Files
Name_Measurementfile='Test_Messung_5,3031_';
Name_Koeffizienten='Koeffizienten_Auswertung_Kalibrierung.txt';
Name_Exportfile='Auswertung_Messdaten_';

%Festlegen der Anzahl der auszuwertenden Dateien
Anzahl=1;

%Definieren der Temperaturparameter Referenztemperatur und der
%Alphawerte der drei Sensoren
Tref_1=20.147;
Tref_2=20.147;
Tref_3=20.147;
alpha20_1=0.46/100;
alpha20_2=0.47/100;
alpha20_3=0.45/100;

%Definieren des overheat Ratios
a=0.8;

%Definieren der Gaskonstante von Luft [J/(kg*K)]
R=287.058;

%Importieren der Koeffizienten
[b_MSD,b_Pitch_Angle,b_Yaw_Angle]=Import_Koeffizienten(Name_Koeffizienten);

%Berechnen der alpha-werte bei Referenztemperatur
alpha_ref_1=alpha20_1/(1+alpha20_1*(Tref_1-20));
alpha_ref_2=alpha20_2/(1+alpha20_2*(Tref_2-20));
alpha_ref_3=alpha20_3/(1+alpha20_3*(Tref_3-20));

%Berechnen der Temperatur des Drahtes
Tw_1=(a/alpha_ref_1)+Tref_1;
Tw_2=(a/alpha_ref_2)+Tref_2;
Tw_3=(a/alpha_ref_3)+Tref_3;

for Anzahl=1:1

    %Importieren des Measurementfiles
    Name_Measurementfile=[Name_Measurementfile num2str(Anzahl) '.txt'];
    [Time, E1, E2,E3,Trigger]=Import_Measurement_1(Name_Measurementfile);

    [StatischeTemperatur,Umgebungsdruck,StatischeTemperatur_Eingabe,X,Y,Z,Samples,Rate]=Import_Mea
    surement_2(Name_Measurementfile);

    %Definieren der Matrizen Ecorr1_GK, Ecorr2_GK und Ecorr3_GK
    Ecorr1=zeros(length(E1),1);
    Ecorr2=zeros(length(E2),1);
    Ecorr3=zeros(length(E3),1);
```

```
%Korrigieren der Spannungen auf Referenztemperatur
for var1=1:length(E1)

    Ecorr1(var1)=E1(var1)*((Tw_1-StatischeTemperatur)/(Tw_1-Tref_1))^(0.5);
    Ecorr2(var1)=E2(var1)*((Tw_2-StatischeTemperatur)/(Tw_2-Tref_2))^(0.5);
    Ecorr3(var1)=E3(var1)*((Tw_3-StatischeTemperatur)/(Tw_3-Tref_3))^(0.5);

end

%Berechnen der dimensionslosen Kennzahlen
Delta_U=(Ecorr1+Ecorr2+Ecorr3)/3;
K_Yaw_Angle=(Ecorr2-Ecorr3)./Delta_U;
K_Pitch_Angle=(0.5*(Ecorr2+Ecorr3)-Ecorr1)./Delta_U;
K_MSD=(Ecorr1+Ecorr2+Ecorr3)/300;

%Berechnen der Massenstromdichte, Yaw_Angle und Pitch_Angle
MSD=Berechnung_Polynom(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,b_MSD);
Pitch_Angle=Berechnung_Polynom(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,b_Pitch_Angle);
Yaw_Angle=Berechnung_Polynom(K_Pitch_Angle,K_Yaw_Angle,K_MSD,b_Yaw_Angle);

%Berechnung der Dichte
Dichte=Umgebungsdruck/(R*(StatischeTemperatur+273.15));

%Berechnen des Betrags der Geschwindigkeit
U_Betrag=MSD/Dichte;

%Aufteilen der Geschwindigkeit auf die verschiedenen
%Geschwindigkeitskomponenten
U=U_Betrag.*cosd(Pitch_Angle);
V=-U_Betrag.*sind(Pitch_Angle).*cosd(Yaw_Angle);
W=U_Betrag.*sind(Pitch_Angle).*sind(Yaw_Angle);

%Ausgabe der Geschwindigkeitsdaten
F=[transpose(Time);transpose(U);transpose(V);transpose(W);transpose(Trigger)];
Name_Exportfile=[Name_Exportfile num2str(Anzahl) '.txt'];
fileID = fopen(Name_Exportfile,'w+t');
fprintf(fileID,'%6s %10s %10s %10s %10s\n','Time','U','V','W','Trigger');
fprintf(fileID,'%6.4f %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f\n',F);
fclose(fileID);

end
```

Anhang 9: Matlab Code Instationäre Auswertung:

```
clear all;
Name='Messung_Labview_Geschwindigkeit_';
Name_Ausgabe='Auswertung_Geschwindigkeit_';
Anzahl=25;
Unterteilung=2048;
Trigger_level=1.2;
for var1=25:Anzahl

    var1
    %Import der Daten
    Name1=[Name num2str(var1) '.txt'];
    [Time,U,V,W,Trigger]=Import_Data(Name1);
    Hilfsmatrix1=zeros(length(Trigger),1);

    %Zeilen für Triggerlevel identifizieren
    A=find(abs(Trigger)>Trigger_level);

    for var2=1:length(A)

        Hilfsmatrix1(A(var2))=1;

    end

    %Zeit des Triggerdurchgangs berechnen
    Laufvariable1=1;
    Laufvariable2=0;

    for var3=2:length(Trigger)

        if ((Hilfsmatrix1(var3)==1) &&(Hilfsmatrix1(var3-1)==0))

            Laufvariable1=Laufvariable1+1;

            if (Laufvariable1/2==1)

                Laufvariable2=Laufvariable2+1;
                Trigger_Zeit_eine_Schaufel(Laufvariable2)=Time(var3-1)+((Time(var3)-Time(var3-1))/(Trigger(var3)-Trigger(var3-1)))*(Trigger_level-Trigger(var3-1));
                Laufvariable1=1;

            else

                Laufvariable1=Laufvariable1+1;

            end

        else

            Laufvariable1=Laufvariable1+1;

        end

    end

end

%Startwert für Schleifen bestimmen, damit das erste Triggersignal
```



```
%ausgelassen wird
Startwert=find(Hilfsmatrix1==1,1);

%Zeit der Triggersignale berechnen für eine ganze Umdrehung

Laufvariable3=-1;
Laufvariable4=0;
for var4=2:length(Trigger_Zeit_eine_Schaufel)

    Laufvariable3=Laufvariable3+1;

    if (Laufvariable3/5==1)||(Laufvariable3/5==0)

        Laufvariable4=Laufvariable4+1;
        Trigger_Zeit_Umdrehung(Laufvariable4)=Trigger_Zeit_eine_Schaufel(var4);
        Laufvariable3=0;

    else

    end

end

%Berechnen der Zeitschritte und der dazugehörigen Matrix

for var5=1:(length(Trigger_Zeit_Umdrehung)-1)

    Abstand(var5)=Trigger_Zeit_Umdrehung(var5+1)-Trigger_Zeit_Umdrehung(var5);
    Zeitschritte(var5)=Abstand(var5)/Unterteilung;

end

Laufvariable5=0;
Trigger_Zeit_Umdrehung=transpose(Trigger_Zeit_Umdrehung);
Zeitschritte=transpose(Zeitschritte);

%Berechnen der Zeit(Resample)
for var6=1:(length(Trigger_Zeit_Umdrehung)-1)

    for var7=0:(Unterteilung-1)

        Laufvariable5=Laufvariable5+1;
        Time_Resample(Laufvariable5)=var7*Zeitschritte(var6)+Trigger_Zeit_Umdrehung(var6);

        if (var7==0)

            Hilfsmatrix3(Laufvariable5)=1;

        else

            Hilfsmatrix3(Laufvariable5)=0;

        end

    end

end

%Berechnen der Geschwindigkeiten (Resample)
Hilfsmatrix3=transpose(Hilfsmatrix3);
Time_Resample=transpose(Time_Resample);
```

```
U_Resample=zeros(length(Time_Resample),1);
V_Resample=zeros(length(Time_Resample),1);
W_Resample=zeros(length(Time_Resample),1);

for var8=1:length(Time_Resample)

    Zeit=Time_Resample(var8);
    Index_unten=find(Time-Zeit<=0,1,'last');
    Index_oben=Index_unten+1;
    U_Resample(var8,1)=U(Index_unten)+((U(Index_oben)-U(Index_unten))/(Time(Index_oben)-
Time(Index_unten)))*(Zeit-Time(Index_unten));
    V_Resample(var8,1)=V(Index_unten)+((V(Index_oben)-V(Index_unten))/(Time(Index_oben)-
Time(Index_unten)))*(Zeit-Time(Index_unten));
    W_Resample(var8,1)=W(Index_unten)+((W(Index_oben)-W(Index_unten))/(Time(Index_oben)-
Time(Index_unten)))*(Zeit-Time(Index_unten));

end

Laufvariable6=0;
Time_Resample_zeros=zeros(length(Time_Resample),1);

for var9=1:length(Time_Resample)

    if Hilfsmatrix3(var9)==1

        Laufvariable6=Laufvariable6+1;

    else

    end

    Time_Resample_zeros(var9)=Time_Resample(var9)-Trigger_Zeit_Umdrehung(Laufvariable6);

end

%Multiplikator für Dimensionslose Zeit berechnen

Multiplikator=1./Abstand;
Multiplikator=transpose(Multiplikator);
Laufvariable7=0;
Time_Entdimensioniert=zeros(length(Time_Resample_zeros),1);

%Entdimensionieren der Zeit
for var10=1:length(Time_Resample_zeros)

    if Hilfsmatrix3(var10)==1

        Laufvariable7=Laufvariable7+1;

    else

    end

    Time_Entdimensioniert=Time_Resample_zeros.*Multiplikator(Laufvariable7);

end
```

```
for var11=1:Unterteilung

    Time_Entdimensioniert_Zusammengefasst(var11)=Time_Entdimensioniert(var11);

end

Time_Entdimensioniert_Zusammengefasst=transpose(Time_Entdimensioniert_Zusammengefasst);
Laufvariable11=-1;

for var12=1:length(Time_Entdimensioniert_Zusammengefasst)

    Laufvariable10=0;
    Laufvariable11=Laufvariable11+1;

    for var13=1:Unterteilung:length(U_Resample)

        Laufvariable10=Laufvariable10+1;
        U_Samples(Laufvariable10,var12)=U_Resample(var13+Laufvariable11);
        V_Samples(Laufvariable10,var12)=V_Resample(var13+Laufvariable11);
        W_Samples(Laufvariable10,var12)=W_Resample(var13+Laufvariable11);

    end

end

%Berechnung des Mittelwerts
U_mean=mean(U_Samples);
V_mean=mean(V_Samples);
W_mean=mean(W_Samples);
x_Achse=1:Unterteilung;

%Berechnung des quadrats der Geschwindigkeitsschwankungen

Dimension_Matrix=size(U_Samples);

for var14=1:Dimension_Matrix(2)

    for var15=1:Dimension_Matrix(1)

        Schwankungen_U(var15,var14)=(U_Samples(var15,var14)-U_mean(var14))^2;
        Schwankungen_V(var15,var14)=(V_Samples(var15,var14)-V_mean(var14))^2;
        Schwankungen_W(var15,var14)=(W_Samples(var15,var14)-W_mean(var14))^2;

    end

end

Summe_Schwankungen_U=sum(Schwankungen_U);
Summe_Schwankungen_V=sum(Schwankungen_V);
Summe_Schwankungen_W=sum(Schwankungen_W);

Mittelwert_Schwankungen_U=(1/(length(Summe_Schwankungen_U)-1)).*Summe_Schwankungen_U;
Mittelwert_Schwankungen_V=(1/(length(Summe_Schwankungen_V)-1)).*Summe_Schwankungen_V;
Mittelwert_Schwankungen_W=(1/(length(Summe_Schwankungen_W)-1)).*Summe_Schwankungen_W;

Name1 =[Name_Ausgabe num2str(var1) '.txt'];
T=[U_mean; V_mean; W_mean];
x=[Mittelwert_Schwankungen_U;Mittelwert_Schwankungen_V;Mittelwert_Schwankungen_W];
```

```
fileID = fopen(Name1, 'w+t');  
fprintf(fileID, '%12s\n', 'Mittelwerte:');  
fprintf(fileID, '%8s %8s %8s\n', 'U', 'V', 'W');  
fprintf(fileID, '%8.4f %8.4f %8.4f\n', T);  
fprintf(fileID, '%28s\n', 'Geschwindigkeitsschwankungen:');  
fprintf(fileID, '%8s %8s %8s\n', 'U', 'V', 'W');  
fprintf(fileID, '%8.4f %8.4f %8.4f\n', X);  
fclose(fileID);
```

end