

Massenstrommessung von Helium in Kühlkreisläufen des Mu3e Experiments mit MEMS-Sensoren

Bachelor-Thesis



Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik
Institut für Thermo und Fluid Engineering
Bachelor of Science - Maschinenbau
Vertiefungsrichtung Energietechnik
Windisch, 13. August 2020

Studierender:	Niculin Flucher	niculin.flucher@students.fhnw.ch
Projektbetreuer:	Prof. Dr. Beat Ribl	
Experte:	Dr. Ralf Greim	
Auftraggeber:	Dr. Frank Meier Aeschbacher	

Zusammenfassung

Im *Mu3e-Experiment* am *Paul Scherrer Institut* wird mit einem neuartigen Versuchsaufbau nach dem seltenen Zerfall eines Myons in zwei Positronen und ein Elektron gesucht. Dieser Zerfall verletzt die Erhaltung der Leptonenzahl und wäre eine Beobachtung jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik. Im Experiment werden mehrere Schichten von dünnen Halbleiterdetektoren aus Silizium Chips verwendet, welche mit gasförmigem Helium aus mehreren Kühlkreisläufen auf maximal 70°C gekühlt werden. In der vorliegenden Arbeit wird ein Durchflussmessgerät gesucht, welches in diesen Kreisläufen eingebaut werden kann, um den Gasmassenstrom $2 \dots 10 \text{ g/s}$ mit kleinem Druckabfall und geringem Platzbedarf zu messen. Dieses Messgerät soll dank der Verwendung von kommerziell erhältlichen *MEMS*-Sensoren eine kostengünstige Alternative zu kalibrierten Durchflussmessgeräten externer Herstellern darstellen. Untersucht wurden die folgenden beiden Messprinzipien.

- Wirkdruckverfahren mit Venturirohr mit mikrothermischer Durchflussmessung im Bypass
- Thermische Durchflussmessung mit Heissfilm

Die Untersuchung mittels numerischer Strömungsanalyse zeigt, dass die Massenstrommessung mittels Venturirohr eine robuste und umsetzbare Messmethode ist. Der Druckverlust, die Durchflusszahl und die zu erwartende Unsicherheit bei Winkelstücken in der Einlaufstrecke wird ermittelt. Das Venturirohr wurde als Prototyp getestet und kalibriert. Als Kernstück des Messverfahrens wird eine Modellgleichung hergeleitet, um aus den drei Messgrößen Differenzdruck, Temperatur im Bypass und Temperatur im Venturirohr den Massenstrom zu berechnen. Messungen mit dem Prototyp und Referenzmessgerät bestätigten die Funktionalität des Venturirohrs und der Modellgleichung und zeigen die erreichbare Messgenauigkeit auf. Mit dem Prototyp wurde in einem Messbereich von $2 \dots 7 \text{ g/s}$ ein Messfehler $\leq \pm 0.12 \text{ g/s}$ erreicht. Als Resultat wird der Machbarkeitsnachweis erbracht und Empfehlungen zum Einsatz und zur Kalibrierung der Massenstrommessung mittels Venturirohr im *Mu3e-Experiment* formuliert.

Summary

In the *Mu3e-experiment* at the *Paul Scherrer Institute*, a novel experimental setup is used to search for the rare decay of a muon into two positrons and one electron. This decay violates the conservation of the lepton number and would be an observation beyond the Standard Model of particle physics. The experiment uses several layers of thin detectors made of silicon chips, which are cooled to a maximum of 70°C with gaseous helium from several cooling circuits. In the present work, a flowmeter is sought which can be installed in these circuits to measure the gas mass flow $2 \dots 10 \text{ g/s}$ with small pressure drop and small space requirement. This flowmeter should be a cost-effective alternative to calibrated flowmeters of external manufacturers by using commercially available *MEMS*-sensors. The following two measuring principles were investigated.

- Differential pressure method with a Venturi tube and microthermal flow measurement in a bypass configuration
- Thermal flow measurement with hot film mass flow sensor

The investigation by means of numerical flow analysis shows that the mass flow measurement by means of a Venturi tube is a robust and realizable measuring method. The pressure loss, the discharge coefficient and the expected measurement error in the case of elbows in the inlet section are determined. The Venturi tube was tested and calibrated as a prototype. As the core of the measuring method, a model equation is derived to calculate the mass flow from the three measurements. The differential pressure, temperature in the bypass and temperature in the Venturi tube are taken into account. Measurements with the prototype and a calibrated reference flowmeter confirmed the functionality of the Venturi tube and the model equation and showed the achievable measuring accuracy. With the prototype, a measurement error of $\leq \pm 0.12 \text{ g/s}$ was achieved in a range of $2 \dots 7 \text{ g/s}$. As a result, proof of concept is provided and recommendations for the application and calibration of mass flow measurement by means of Venturi tube in the *Mu3e experiment* are formulated.

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle den Personen danken, die zum Fortschritt der vorliegenden Thesis und allen den darin dokumentierten Berechnungen, Simulationen und Versuchen beigetragen haben.

- Prof. Dr. Beat Ribi
- Dr. Frank Meier Aeschbacher
- Carsten Hersberger
- Marin Deflorin
- Manuel Voggesser
- Christian Geiselhart
- Kevin Malacrida

Inhaltsverzeichnis

Akronyme	viii
Glossar	viii
Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Das Mu3e Experiment	1
1.2 Vorbereitung	2
1.3 Auftrag und Ziele des Projekts	3
1.4 Vorgehensweise und Resultate	4
2 Ausgangslage der Massenstrommessung	6
2.1 Helium als Medium	6
2.2 Massenstrommessung mittels Venturirohr	7
2.3 Massenstrommessung mittels Heissfilmsensor	8
2.4 MEMS-Sensoren	9
3 Theoretische Grundlagen und analytische Untersuchung	10
3.1 Laminare und turbulente Rohrströmung	10
3.2 Konvektiver Wärmetransport	15
3.3 Differenzdruck im Venturirohr	20
3.4 Massenstrommessung im Bypass	23
3.5 Joule-Thomson-Effekt	25
3.6 Statistische Grössen zur Auswertung der Messungen	25
3.7 Theoretische Messunsicherheit der Massenstrommessung	26
3.8 Modellierung der Messdaten mittels Regressionsanalyse	33
3.9 Lösen nichtlinearer Gleichungen mit dem Tangentenverfahren	34
4 Numerische Simulation	36
4.1 Planung der CFD-Simulationen	36
4.2 Simulation des Venturirohrs mit gerader Einlaufstrecke	41
4.3 Simulation des Venturirohrs mit verwinkelter Einlaufstrecke	49
4.4 Simulation des Heissfilmsensors im freien Strömungsfeld	51
4.5 Simulation des Heissfilmsensors mit gerader Einlaufstrecke	55
4.6 Simulation der verwinkelten Einlaufstrecke des Heissfilmsensors	57
5 Wahl des Venturirohrs als Lösungsvariante	62
6 Untersuchung des Venturirohrs mittels Versuchsaufbau	63
6.1 Versuchsaufbau Verdichterkreislauf	63
6.2 Versuchsaufbau Kalibrierstrecke	67
6.3 Datenerfassung	73
6.4 Datenaufbereitung	73
6.5 Untersuchung der Messergebnisse	73
6.6 Unsicherheitsanalyse der Kalibrierstrecke	79

7	Kalibrierung der Mengenmessung	85
7.1	Modellgleichung zur Mengenmessung mittels Venturirohr	85
7.2	Regressionsanalyse des Venturirohrs	86
7.3	Tangentenverfahren zur Bestimmung der Messresultate anwenden	91
7.4	Anwendung der Kalibrierung des Venturirohrs	91
7.5	Messunsicherheit des kalibrierten Modells	97
8	Diskussion der Resultate	101
8.1	Resultate der analytischen und numerischen Untersuchung	101
8.2	Aussagekraft und Vollständigkeit der Resultate	102
8.3	Wahl des SDP816-500Pa als Differenzdrucksensor	104
8.4	CFD-Simulationen des Venturirohrs und des Heissfilmsensors	104
9	Schlussfolgerung und Ausblick	105
9.1	Wahl des Venturirohrs	105
9.2	Vorgehensweise	105
9.3	Erkenntnisse zum Einsatz und zur Kalibrierung	105
9.4	Korrektheit der Vorgehensweise und Aussagekraft der Resultate	106
9.5	Empfehlung für den Einsatz im Mu3e	106
9.6	Erreichung der Ziele des Projekts	107
9.7	Ausblick	108
10	Ehrlichkeitserklärung	109
	Anhang	117
A	Simulationen	117
A.1	Simulation Venturirohr	118
A.2	Simulation verwinkelte Einlaufstrecke	118
A.3	Simulation Heissfilm	121
B	Unsicherheitsanalysen	123
B.1	Unsicherheitsanalysen Kalibrierstrecke	124
B.2	Unsicherheitsanalyse Venturirohr gemäss Messtag 5.1	124
C	Fertigungszeichnungen	127
D	Empfehlungen	130
E	PM-Dossier	145
F	Zeitplan	203
G	Digitaler Anhang	205

Akronyme

BGA Binary Gas Analyzer

CFD numerische Strömungsmechanik

CTA Constant-Temperature Anemometry

FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz

GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

ITFE Institut für Thermo- und Fluid-Engineering

MEMS microelectromechanical systems

NI National Instruments

PSI Paul Scherrer Institut

RANS Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulations

RMS Root Mean Square oder quadratisches Mittel

SDP Sensirion Differential Pressure Sensor

SRS Stanford Research Systems

SST Shear Stress Transport Turbulenz Modell

Glossar

Ansys CFX Software der Firma Ansys, Inc. zur numerischen Strömungssimulation

Endress + Hauser Schweizer Anbieter von Messgeräten, insbesondere Durchflussmessgeräten mit hoher Genauigkeit

ICEM CFD Software der Firma Ansys, Inc. zum Erstellen von Rechenetzen u.a. für Strömungssimulationen

Mu3e-Experiment Ein laufendes Projekt des PSI (Paul Scherrer Instituts) zur Detektion eines gemäss dem Standardmodell der Teilchenphysik extrem unwahrscheinlichen Zerfalls [1]

P5 Projektarbeit im fünften Semester, Vorbereitung für das P6

P6 Vorliegende Bachelor-Thesis

PM-Dossier Dokument, welches die Zielvereinbarung, Planung und Struktur des P6 enthält

Symbolverzeichnis

Symbole

A	Fläche	m^2
a	Schallgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
C_D	Durchflusszahl	
D	Rohrdurchmesser	m
d	Durchmesser	m
e_i	Fehler	$[i]$
I	Elektrischer Strom	A
L	Länge	m
R	Elektrischer Widerstand	Ω
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{q}	Wärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
N	Anzahl Beobachtungen in einer Messreihe	
n	Iteration	
Δp	Differenzdruck	Pa
Δp_V	Druckverlust	Pa
p	Absolutdruck	$Pa, bara$
p	Druck	Pa, bar
R	Rohrradius	m
r	Radius	m
s_i	Standardfehler	$[i]$
T	Temperatur	K
U_i	erweiterte Unsicherheit	$[i]$
u_i	Standardunsicherheit	$[i]$
U_s	Versorgungsspannung	V
U_{VT}	Signalspannung des Differenzdrucksensors	V

v	spezifisches Volumen	$\frac{m^3}{kg}$
w	mittlere Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
\bar{x}_i	Mittelwert	$[i]$
x	Distanz in Rohrrichtung	m
x	volumetrischer Anteil	$[\frac{n_i}{n}]$
y	massenspezifischer Anteil	$[\frac{m_i}{m}]$
Y_V	Strömungsverlust	J

Griechische Symbole

α	Wärmeübertragungskoeffizient	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
β	Durchmesser Verhältnis	$\frac{D_2}{D_1}$
β_i	Parameter	
ε	Expansionszahl	
ε_i	Fehler, Residuum	$[i]$
Δi	allgemeine Differenz	$[i]$
λ	Rohrreibungszahl	
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
μ	dynamische Viskosität	$Pa \cdot s$
ν	kinematische Viskosität	$\frac{m^2}{s}$
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
σ_i	Standardabweichung	$[i]$

Dimensionslose Kennzahlen

Ma	Mach-Zahl
Nu	Nusselt-Zahl
Pr	Prantl-Zahl
Re	Reynolds-Zahl

Indizes

1, 2, 3, ... Fortlaufende Nummerierung

A Auslauf, Austritt

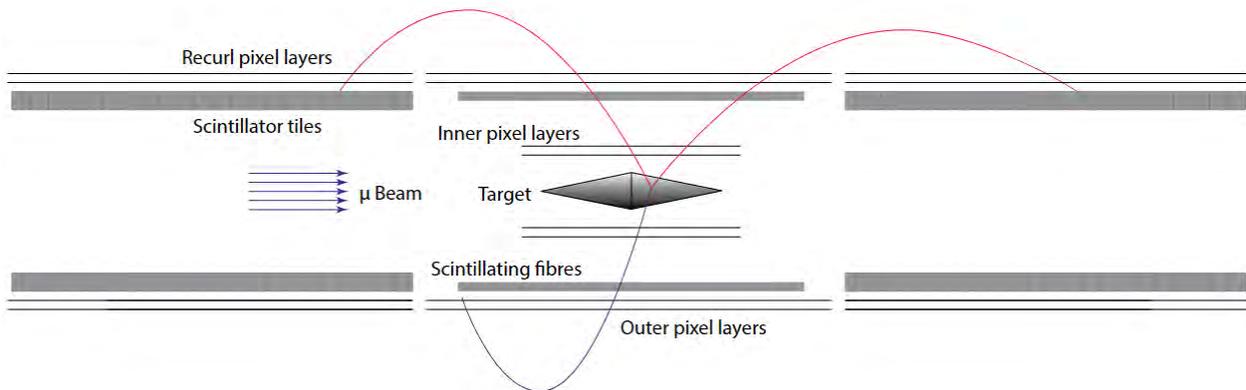
<i>BGA</i>	auf den Binary Gas Analyzer bezogen
<i>BP</i>	im Bypass
<i>E</i>	Einlauf, Eintritt
<i>ges</i>	gesamt
<i>He</i>	Helium
<i>HF</i>	auf Heissfilmsensor Bezogen
<i>HR</i>	Handrechnung
<i>krit</i>	kritisch
<i>L</i>	Luft
<i>lam</i>	laminar
<i>m</i>	gemessen
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>rel</i>	relativ
<i>turb</i>	turbulent
<i>u</i>	auf Umgebung bezogen
<i>VT</i>	auf Venturirohr (venturi tube) bezogen
<i>x</i>	von x abhängig

1 Einleitung

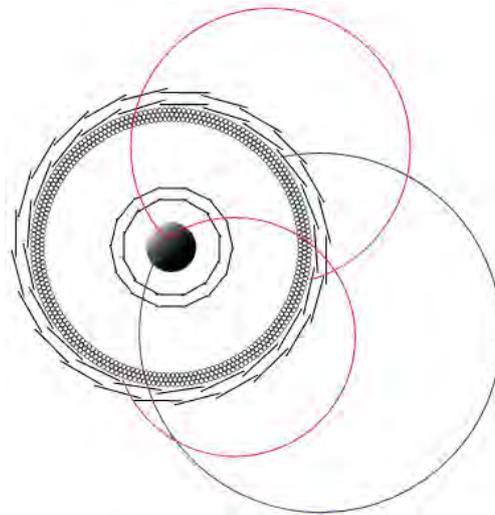
Im Mu3e-Experiment wird nach dem Zerfall eines Myons in zwei Positronen und ein Elektron gesucht, welcher die Erhaltung der Leptonenzahl verletzen würde. Dieses Unterfangen bringt eine Herausforderung für die Koordination, die Entwicklung und die praktische Umsetzung. Die Massenstrommessung der Kühlung, welche nicht direkt zum Erfolg des Experiments führt, ist somit ein kleiner Bestandteil des komplexen Versuchsaufbaus, der aus Detektoren, Kompressoren, einer grossen Magnetspule, einer umfangreichen Datenerfassung und 13 Kühlkreisläufen besteht [2]. Es ist deshalb interessant, eine Lösung umzusetzen, die wenig Mehrkosten aufbringt und in den engen Platzverhältnissen des Experiments untergebracht werden kann, sodass alle Kühlkreisläufe überwacht werden können ohne andere Funktionen einzuschränken. Die Kühlung der Detektoren wird über die Massenströme der Kreisläufe geregelt. Der Massenstrom ist eine Eingangsgrösse für diese Regelung und dadurch eine sicherheitsrelevante Messung für die Kühlung der temperaturempfindlichen Silizium-Chips. Der Auftraggeber ist das PSI, welches in Zusammenarbeit mit einem internationalen Konsortium mehrerer Hochschulen an diesem Experiment arbeitet. Nachdem die Kühlung der Detektoren in vorangehenden Arbeiten entwickelt und optimiert worden ist, wird die Mengenmessung untersucht. Der Fokus dieser Arbeit liegt vorerst auf der Wahl des Messprinzips aufgrund numerischer Untersuchungen. Die Arbeit richtet sich danach auf die praktischen Versuche mit dem Venturirohr und dessen Kalibrierung. Das Ziel ist es, den *Proof of Concept* für die gewählte Messmethode zu erbringen und aufzuzeigen, wie genau diese ist.

1.1 Das Mu3e Experiment

Gemäss dem Standardmodell der Teilchenphysik ist der gesuchte Event im Mu3e-Experiment sehr unwahrscheinlich, da die Erhaltung der Leptonenzahl nicht eingehalten wird. Dieser Zerfall soll vor dem Hintergrund von viel wahrscheinlicheren Myonen-Zerfällen entdeckt werden, welche die Erhaltung der Leptonenzahl erfüllen. Das Experiment ist bestrebt, den Zerfall zu entdecken oder eine maximale Wahrscheinlichkeit von 10^{-16} für den Zerfall $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$ festlegen zu können. Dafür wird ein Strahl von 10^9 Myonen pro Sekunde benötigt. Um 10^9 Zerfälle pro Sekunde zu beobachten, werden unter anderem Detektoren aus Silizium-Halbleitern konzentrisch um die Quelle der Zerfallsprodukte angeordnet (siehe Abbildung 1.1) [1]. Durch die Anordnung kann aus dem Zeitpunkt, Ort und Impuls der detektierten Elementarteilchen auf den Ort des Zerfalls geschlossen werden. Die Silizium-Chips werden einer erwarteten Wärmeproduktion von $250 - 400 \text{ mW/cm}^2$ aufweisen, wobei das Material der Detektoren nicht heisser als 70°C werden darf. Um diese zu kühlen werden sie mit gasförmigem Helium durch- und umströmt. Mit einer Eintrittstemperatur von 4°C sollen die Detektoren vor Überhitzung geschützt werden. Dies geschieht in mehreren Schichten, was in vorhergehenden Arbeiten konzipiert und optimiert wurde [3]. Die im Zerfall entstehenden Teilchen dürfen nicht vom Kühlmittel von ihrer Flugbahn abgelenkt werden (mögliche Flugbahn in Abbildung 1.1 dargestellt). Da Helium mit vier nur eine kleine Massenzahl aufweist, hat es nur einen kleinen Einfluss auf den Erfolg des Experiments.



(a) Querschnitt seitlich, Darstellung des Myonenstrahls



(b) Querschnitt durch Target von vorne

Abbildung 1.1: Detektor-Design des Mu3e-Experiments im Querschnitt, mögliche Pfade von zwei Positronen und einem Elektron eingezeichnet [4]

1.2 Vorbereitung

In einem vorhergehenden Projekt, dem P5 wurden die hier untersuchten Mengenmesssysteme ausgewählt und in Form eines Versuchsaufbaus vorbereitet. Der Versuchsaufbau ist in Zusammenarbeit mit einem parallellaufenden Projekt entstanden, welches sich mit dem im Mu3e-Experiment angeordneten Turbokompressor zum Fördern des Heliums durch die Kühlkreisläufe beschäftigt (Ablage im digitalen Anhang G). Das Messen von Massen- und Volumenströmen wird in vielen Zweigen der Industrie benötigt. Die gewählte Methode der *Wirkdruckmessung mittels Venturirohr* ist weitgehend erforscht und kommt aufgrund der Einfachheit bei simplen Anwendungen, wie der Messung von Wasserströmen aber auch komplexeren Anwendung von Mehrphasenströmen zum Einsatz. Die Technik der *thermischen Durchflussmessung* ist in den vergangenen Jahren stark weiterentwickelt worden. Die Methoden mit Hitzdraht und Heissfilm wurden durch präzise Fertigungstechniken optimiert und mittels schnellen Regelungen zu schnell messenden Anemometern entwickelt.

Die Anforderungen des Auftraggebers an die Durchflussmessung lassen sich mit kommerziell er-

hältlichen, kalibrierten Systemen (z.B. Durchflussmessgeräte von Endress + Hauser) nicht erfüllen, insbesondere

- eine geringe Einbaugrösse aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse in der Nähe des Experiments.
- ein geringer finanzieller Aufwand, um die 13 Kreisläufe auszustatten.

Es soll deshalb in diesem explorativen Projekt eine kostengünstige Alternative untersucht werden, die die obigen und folgenden Anforderungen erfüllt:

- ein geringer Druckverlust über die Messstrecke.
- die Verwendung von kommerzielle erhältlichen MEMS-Sensoren.
- ein Messbereich von $2 \dots 10 \text{ g/s}$.

Nach einer Marktanalyse im P5 wurden deshalb zwei massgefertigte Lösungen weiterverfolgt, die die Anforderungen des Auftraggebers zu befriedigen.

1.3 Auftrag und Ziele des Projekts

Die ausführlichen Ziele und Analyse des Auftrags sind im PM-Dossier im Anhang E festgehalten. Die darin festgelegte übergeordnete Zielsetzung lautet:

Es soll ein oder mehrere kalibrierte Mengemesssysteme mit geringem Druckverlust für die Heliumkühlkreisläufe des Mu3e-Experiments mit einem Durchfluss von $2 \dots 10 \text{ g/s}$ realisiert werden. Dabei soll ermittelt werden, welche Messgenauigkeit mit den Systemen möglich ist.

Zusammengefasst sind folgende Projektziele zu erreichen:

- Das Venturirohr soll auf Eignung für das Mu3e-Experiment untersucht werden.
- Der Heissfilmsensor soll auf Eignung für das Mu3e-Experiment untersucht werden.
- Die Messunsicherheiten sollen ermittelt werden.
- Mittels Simulationen sollen beide Messsysteme untersucht werden, um das besser geeignete zu wählen.
- Empfehlungen zur Justierung und Kalibrierung sollen abgegeben werden.
- Empfehlungen zum Einsatz im Mu3e-Experiment sollen abgegeben werden.

In dieser Arbeit wird die Verträglichkeit der Mengemessung mit der Strahlung und Magnetfeldern im Mu3e-Experiment nicht untersucht. Die Weiterentwicklung der Mengemessung zu einer serienreifen Version in den entsprechenden Dimensionen für die unterschiedlichen Kreisläufe des Mu3e-Experiment ist nicht Teil dieses Projekts.

1.3.1 Umstrukturierung aufgrund von COVID-19

Aufgrund der COVID-19 Pandemie mussten die ursprünglich geplanten Versuche unterbrochen werden. Die Änderungen werden ausführlich im PM-Dossier im Anhang E aufgeführt. Im Verlaufe des Projekts konnten die Laborarbeiten zögerlich Ende Mai wieder aufgenommen und für das Venturirohr durchgeführt werden. Folglich entspricht der Verlauf des Projekts einer Mischung zweier Versionen des PM-Dossiers. Nach der weiteren Arbeit am Versuchsaufbau aus dem P5, wurden während dem Unterbruch die beiden Messmethoden mittels CFD (numerische Strömungsmechanik) untersucht. Da die Wahl des Venturirohrs als geeignete Lösungsvariante nach diesen Simulationen getroffen werden konnte, wurde nach den ersten Lockerungen der Schutzmassnahmen die Arbeitszeit im Labor auf die Versuche mittels Venturirohr konzentriert. Dabei wurde ein zwischenzeitlich geplantes Arbeitspaket, in welchem das gewählte Lösungsprinzip ausführlicher mittels CFD untersucht worden wäre, durch die Versuche und Kalibrierung ersetzt.

1.4 Vorgehensweise und Resultate

Das Vorgehen inklusive Anpassungen gemäss Umstrukturierungen ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Die Resultate der farbcodierten Arbeitspakete sind:

grün PM-Dossier, Arbeitsjournal, Sitzungsprotokolle, der vorliegende Bericht, Poster, Präsentationen

violet Handrechnungen, theoretisch Übertragungsfunktion, Simulationsresultate, Messergebnisse

gelb Theoretische Unsicherheit der Messmethoden, effektive Übertragungsfunktion, Modellgleichung, Modellparameter, effektive Unsicherheit

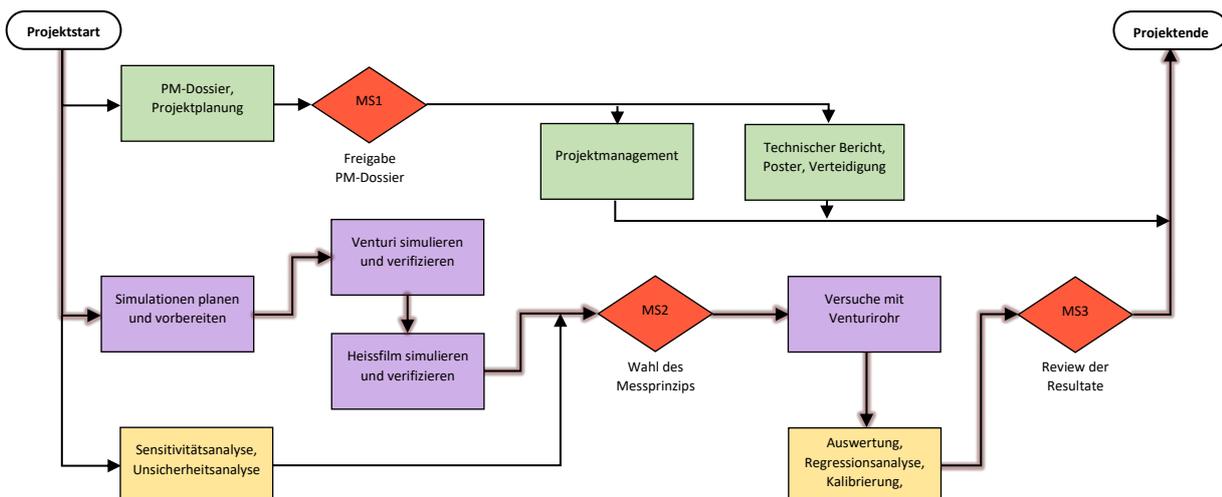


Abbildung 1.2: Projektstruktur des P6 gemäss dem effektiven Ablauf

Farbcodierung	
4	
Grün:	Arbeitspakete zum Projektmanagement und Dokumentation
Violett:	Arbeitspakete zum Versuchsaufbau und Messungen
Gelb:	Arbeitspakete zur Auswertung und Kalibrierung
Rot:	Meilensteine
Blau:	Kontakt mit P6 Turbokompressor
roter Glow:	technisch kritischer Pfad

1.4.1 Beteiligte Personen

Auftraggeber	Dr. Frank Meier Aeschbacher	Technischer Koordinator Mu3e
Projektbetreuer	Dr. Prof. Beat Ribl	Leiter Institut ITFE
Betreuender Assistent	Carsten Hersberger, MSc Eng.	Wissenschaftlicher Assistent
Betreuender Assistent	Marin Deflorin, MSc Eng.	Wissenschaftlicher Assistent

2 Ausgangslage der Massenstrommessung

In einer vorausgehenden Arbeit wurden die Massenstrommessung mittels Heissfilmsensor oder Venturirohr als mögliche Varianten zur Überwachung der Kühlkreisläufe im Mu3e-Experiment identifiziert. Beide Messprinzipien sind generell für inerte Gase anwendbar. Die Eigenschaften des Heliums in den 13 Kühlkreisläufen ist im Folgenden beschrieben. Unter diesen Bedingungen soll das Messgerät einsetzbar sein und kalibriert werden können.

2.1 Helium als Medium

Helium ist ein Edelgas mit einer Nukleonenzahl von vier (zwei Protonen und zwei Neutronen). Dadurch ist es nicht reaktiv und hat einen kleineren Einfluss auf die Flugbahn von Elementarteilchen als Gase mit einem grösseren, schwereren Kern, wie z.B. Stickstoff (Nukleonenzahl 14, sieben Protonen und sieben Neutronen). Helium diffundiert dank seiner geringen Grösse leicht durch viele Materialien, insbesondere Kunststoffe. Im Mu3e-Experiment und im Versuchsaufbau stellt dies eine Herausforderung dar, da Helium möglichst nicht entweichen soll. In Tabelle 2.1 werden die Eigenschaften von Helium unter den mit *Eintritt* und *Austritt* bezeichneten Bedingungen dargestellt. Dies sind in etwa die Bedingungen, wie sie kurz vor und nach dem Kernstück des Experiments herrschen. *Eintritt* und *Austritt* liegen leicht ausserhalb der Bedingungen, welche vor und nach dem Kern des Experiments auftreten werden, um auch extremere Bedingungen abzudecken. Unter diesen Bedingungen soll die Massenstrommessung eingesetzt werden können.

Eigenschaft		Eintritt	Austritt	Einheit
Temperatur	T	0	80	$^{\circ}C$
Druck	p	1.1	0.9	$bara$
Dichte	ρ	0.194	0.123	$\frac{kg}{m^3}$
Viskosität	μ	$1.87 \cdot 10^{-5}$	$2.23 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s$
kinematische Viskosität	ν	$9.65 \cdot 10^{-5}$	$18.2 \cdot 10^{-5}$	$\frac{m^2}{s}$
Schallgeschwindigkeit	a	973.0	1106.1	$\frac{m}{s}$
Prantl-Zahl	Pr	0.664	0.663	
Wärmeleitfähigkeit	λ	146.2	174.6	$\frac{W}{m \cdot K}$
spezifische Wärmekapazität	c_p	5193.2	5193.2	$\frac{J}{kg \cdot K}$

Tabelle 2.1: Stoffgrössen von Helium am Ein- und Austritt

Im Mu3e-Experiment werden die Temperatur und der Druck des Heliums überwacht. Dabei ist es für die folgenden Kapitel interessant zu sehen, wie sich die Viskosität mit T und p ändert. Die Viskosität wird benötigt, um auf die Druckverluste der Messgeräte zu schliessen und ist für die Bildung der Reynolds-Zahl relevant bei der analytischen Untersuchung beider Messmethoden. Die Viskosität ist im betrachteten Bereich gemäss Abbildung 2.1 nur von der Temperatur abhängig. Die Steigung der linearen Beziehung beträgt $1.865 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s / K$ [5].

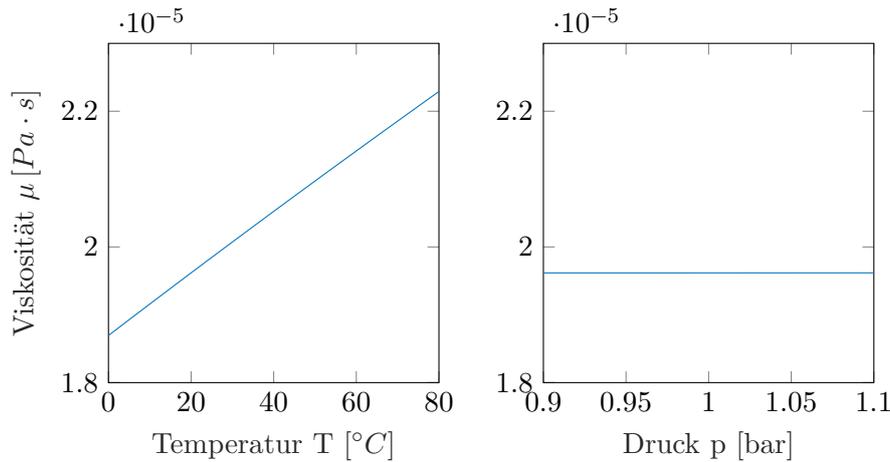


Abbildung 2.1: Temperatur- und Druckabhängigkeit der Viskosität von Helium

2.2 Massenstrommessung mittels Venturirohr

Das Venturirohr wurde im P5 entworfen und gefertigt. Die Fertigungszeichnung ist im digitalen Anhang einsehbar. Das Venturirohr beruht auf dem Wirkdruckprinzip, wobei man den Druckunterschied zwischen der Einlaufstrecke und der engsten Stelle des Venturirohrs misst. Der Massenstrom in einem Venturirohr wird gemäss Gleichung 2.1 berechnet.

$$\dot{m} = C_D \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \quad (2.1)$$

Dabei handelt es sich um die zu verwendende Gleichung, wenn der Differenzdruck Δp gemessen wird und die Dichte ρ vor dem Venturirohr bekannt ist. Die Durchflusszahl C_D muss experimentell bestimmt werden und kann über den Messbereich variieren. Die Expansionszahl ε wird für kompressible Medien berechnet. Dieser Faktor ist proportional zum Differenzdruck und wie die Durchflusszahl kleiner als 1. Der Querschnitt A_2 entspricht der engsten Stelle des Venturirohrs. Diese ist um den Faktor β^2 kleiner als die Querschnittsfläche der Rohrleitung vor und nach dem Venturirohr. Der für das Venturirohr verwendete Rohrdurchmesser beträgt $D = 31.3 \text{ mm}$. Bedingt durch die Platzverhältnisse im Experiment wurde das Venturirohr für geringe Rohrdurchmesser und grosse Geschwindigkeiten konzipiert. Dies ist im Falle des Ein- und Austritts des Experiments möglich, wo die Platzverhältnisse kleinere Leitungsquerschnitte verlangen. Die Messunsicherheit des Venturirohrs nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit und dadurch grösseren Differenzdruck ab, da die Übertragungsfunktion immer steiler wird, sodass eine grosse Differenzdruckänderung nur noch eine kleine Massenstromänderung bedeutet.

Der hier verwendete Differenzdrucksensor (*SDP816-500Pa* von *Sensirion* in Abbildung 2.2¹) misst nicht direkt den Differenzdruck Δp , sondern er misst einen kleinen Massenstrom \dot{m}_{BP} , der zwischen den beiden Druckniveaus entsteht. Es handelt somit um einen mikrothermischen Durchflussmesser. Im Folgenden wird von einem Differenzdrucksensor gesprochen und einer Abhängigkeit von Differenzdruck, nicht vom Bypass-Massenstrom, da der Sensor vom Hersteller für die Berechnung des Differenzdrucks kalibriert wird. Der Sensor ist für einen Stückpreis $< CHF30.-$ erhältlich [6].

¹Der SDP810 ist die digitale Ausführung des SDP816, welcher sich nur durch den Kommunikationskanal unterscheidet.



Abbildung 2.2: Differenzdrucksensor SDP810 von Sensirion [7]

Dabei benötigt ein Messgerät genau einen dieser Sensoren. Die folgende Gleichung 2.2 beschreibt die Beziehung.

$$\dot{m} = C_D \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot \dot{m}_{Bypass} \cdot \mu \cdot \zeta} \quad (2.2)$$

Dabei wird die Zähigkeit μ des Fluids, welches durch den Sensor strömt eingesetzt. Der Faktor ζ ist eine Konstante mit Einheit $[m^{-3}]$, welche die Geometrie des Durchflussmessers und der zugehörigen Rohrleitungen, die den Bypass bilden, beschreibt. Die Herleitung dieser Gleichung wird im Kapitel 3.3 erläutert. Diese Umstellung hat den Vorteil, dass nicht die Dichte $\rho(T, p)$, sondern nur die Viskosität $\mu(T)$ bekannt sein muss. Der Sensor besteht aus diversen Kunststoffen und Harz, welche mit dem Helium in Berührung kommen. Ein geringes Ausgasen dieser Komponenten in der Heliumatmosphäre wird erwartet.

2.3 Massenstrommessung mittels Heissfilmsensor

Der Rohrdurchmesser wurde mit $D=100$ beim Heissfilmsensor grösser gewählt, da der gewählte Heissfilmsensor (*FS7* von *Innovative Sensor Technology* in Abbildung 2.3) bei kleinen Geschwindigkeiten genauer misst und keine Geschwindigkeiten weit über 22 m/s messen kann. Ausserhalb des Kerns des Experiments werden grössere Durchmesser verwendet, um kleinere Geschwindigkeiten und dadurch kleinere Druckverluste zu haben. Dort sollte es möglich sein, einen solchen Sensor zu platzieren [8]. Dieser spezifische Sensor hat einen Stückpreis $< CHF20$. – ohne Auswertelektronik [9]. Ein Messgerät würde mit $1 \dots 2$ Stück ausgestattet werden. Der Teil des Sensors, der mit Helium in Berührung kommt ist mit einer passivierenden Glasschicht überzogen. Ein Ausgasen von Kunststoffen ist dadurch nicht zu erwarten.

Der Heissfilmsensor misst die Wärmeleistung, die an den Helium-Massenstrom abgegeben wird, der den Heissfilm überströmt. Die Leistung ist gemäss Gleichung 2.3 vom Wärmeübergangskoeffizienten α , dem Temperaturunterschied ΔT zwischen Heissfilm und Helium und der Fläche A des Heissfilms abhängig.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \Delta T \cdot A. \quad (2.3)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient ist vom Medium und von der lokalen Geschwindigkeit abhängig, welche wiederum vom Massenstrom und der Position des Heissfilms abhängig ist. Die Position des Heissfilms wird in Kapitel 3.1.3 festgelegt. Damit kann auch α im Kapitel 3.2 analytisch ermittelt



Abbildung 2.3: Heissfilmsensor von Innovative Sensor Technology [10]

werden. Die Kühlleistung ist nicht von der Temperatur und Druck des Gases abhängig und wird somit für *Eintritt* und *Austritt* gleiche Übertragungsfunktionen liefern.

Die Regelung des Heissfilms funktioniert gemäss CTA (Constant-Temperature Anemometry). Die elektronischen Komponenten des Heissfilmsensors regeln den Heizstrom, sodass ein konstanter Temperaturunterschied zum umgebenden Fluid herrscht. Diese Leistung wird durch das sogenannte King's Law beschrieben (Gleichung 2.4 mit angepassten Indizes).

$$\dot{Q} = I^2 \cdot R = \alpha \cdot (T_{HF} - T_{He}) \cdot A \quad (2.4)$$

Die benötigte Leistung $I^2 \cdot R$ ist somit vom Massenstrom abhängig und wird von der Elektronik über eine Brückenschaltung in eine Spannung konvertiert [10].

2.4 MEMS-Sensoren

MEMS (microelectromechanical systems) ist eine wachsende Technologie mit grossem Potenzial und vielen Anwendungsmöglichkeiten. Die in diesem Projekt untersuchten MEMS-Sensoren zeichnen sich durch sehr feine Dimensionen aus. Die Leiterbahnen des Heissfilmsensors weisen mikroskopische, genaue Strukturen auf und die Temperaturfühler des Differenzdrucksensors werden direkt auf den Silicium-Chip gedruckt. MEMS-Sensoren zeichnen sich durch ihre zahlreichen Einsatzmöglichkeiten, geringen Platzbedürfnisse und geringen Anschaffungskosten aus. Die Herstellung von MEMS-Geräten greift auf die Technologie der Mikrochipproduktion zurück, wodurch die Sensoren direkt mit dem Chip zusammen fabriziert werden können [11]. Der geringe Material- und Energiebedarf dieser Sensoren macht sie interessant für die Anwendung in diesem Projekt, wo bei geringem Platzbedarf ein Messsystem ohne grosse finanzielle Anschaffungskosten erarbeitet werden soll.

3 Theoretische Grundlagen und analytische Untersuchung

Die theoretischen Grundlagen, welche zur Umsetzung und zum Verständnis der beiden Messmethoden benötigt werden, werden in diesem Kapitel erläutert. Die Theorie der Messunsicherheit wird behandelt, da diese die Wahl der Messmethode beeinflusst. Die Theorie und die Handrechnungen berücksichtigen die Eigenschaften der im P5 ausgewählten Sensoren und Bedingungen im Experiment.

3.1 Laminare und turbulente Rohrströmung

In den Kühlkreisläufen des Mu3e-Experiment treten ausschliesslich Innenströmungen auf. Hier werden gerade Rohre mit kreisförmigem Querschnitt betrachtet, welche von der effektiven Umsetzung im Mu3e-Experiment abweichen können. Der Einfluss der Schwerkraft wird nicht berücksichtigt, da die Dichte von Helium im Experiment sehr gering ist ($\rho = 0.16 \frac{kg}{m^3}$) und keine grossen Höhendifferenzen auftreten.

Aufgrund der Haftbedingung an den Wänden $w_{Wand} = 0$ und der Viskosität $\mu > 0$ sind sämtliche Rohrströmungen verlustbehaftet. Über eine durchflossene Strecke dissipiert stets eine gewisse spezifische Verlustenergie Y_V , die einen Druckverlust Δp_V hervorruft.

$$Y_V = \frac{\Delta p_V}{\rho} \quad (3.1)$$

Dieser Differenzdruck wird bei der Betrachtung des Venturirohrs mit Bypass wichtig sowie für die Berechnung der Druckverluste der Messstrecke.

Reynoldszahl für Rohrströmungen

In Abhängigkeit vom Durchmesser D , der mittleren Geschwindigkeit w , den Fluideigenschaften ρ und μ lässt sich die Reynolds-Zahl berechnen.

$$Re = \frac{D \cdot w \cdot \rho}{\mu} \quad (3.2)$$

Hierbei ist die Geschwindigkeit w über die ganze Querschnittsfläche gemittelt.

$$w = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \quad (3.3)$$

Die dimensionslose Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis zwischen der Trägheit des Fluides $D \cdot w \cdot \rho$ und der Viskosität oder Zähigkeit μ . Aufgrund der Grösse der Reynolds-Zahl kann abgeschätzt werden, ob laminare oder turbulente Strömung vorliegt. Unterhalb der Kritischen Reynoldszahl $Re_{krit} \approx 2320$ überwiegen die Zähigkeitskräfte und es stellt sich eine laminare Strömung ein. Oberhalb von Re_{krit} mit kleinen Vorturbulenzen oder störenden Einflüssen wie Vibrationen wird die Strömung turbulent. Kleine Wirbel und Turbulenzen zerfallen nicht mehr oberhalb dieser Grenze [12]. Es ist möglich, dass laminare Strömung bei $Re > 2300$ auftritt, wenn die Geschwindigkeit langsam erhöht wird und nur kleine Störungen (Rauheit und Erschütterungen) vorliegen. Beim Reduzieren der Geschwindigkeit tritt laminare Strömung generell erst unter der kritischen Reynolds-Zahl auf [12].

Erwartete Geschwindigkeiten und Reynolds-Zahlen

Die Randbedingungen und Parameter für die Strömungen im Experiment sind gemäss Tabelle 3.1. Gemäss dem Bereich der möglichen Reynolds-Zahlen in 3.1 können laminare und turbulente Strömungen vorliegen. Der Punkt, an dem die Strömung umschlägt ist davon abhängig, wie sanft die Beschleunigung stattfindet und auch wie rau die Rohrwände sind, und kann nicht vorausgesagt werden, da im Mu3e-Experiment eine Regelung die Massenströme über die Steuerung der Turbo-Kompressoren aufgrund anderer Kriterien anpasst.

Grösse	Wert	Einheit
\dot{m}	2 ... 10	$\frac{g}{s}$
p	1	<i>bar</i>
T	20	$^{\circ}C$
ρ	0.161	$\frac{kg}{m^3}$
μ	$1.98 \cdot 10^{-5}$	<i>Pa · s</i>
Heissfilm		
D_{HF}	0.1	<i>m</i>
w_{HF}	1.6 ... 7.9	$\frac{m}{s}$
Re_{HF}	1283 ... 6416	–
Venturirohr		
D_{VT}	0.0313	<i>m</i>
w_{VT}	15.8 ... 79.2	$\frac{m}{s}$
Re_{VT}	4148 ... 20741	–

Tabelle 3.1: Randbedingungen und Strömungsparameter für Rohrströmungen beider Messgeräte

3.1.1 Laminare Rohrströmung gemäss Hagen-Poiseuille

Der Bypass des Venturirohrs gemäss Konzept besitzt weitaus kleinere Durchmesser bis zu $D = 1\text{ mm}$. Dabei wird eine laminare Strömung erwartet. Das Hagen-Poiseuillesche Gesetz beschreibt, wie laminare Rohrströmung analytisch beschrieben werden können [12].

$$Y_V = \frac{64}{Re} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{w^2}{2} \quad (3.4)$$

Wobei $\lambda = \frac{64}{Re}$ eingesetzt wird. Unter der Berücksichtigung der Beziehung 3.1 lässt sich das Gesetz umschreiben zu

$$\Delta p_V = \frac{64}{Re} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho.$$

Durch Einsetzen der Beziehung 3.2 für die Reynolds-Zahl ergibt sich

$$w = \Delta p \cdot \frac{2 \cdot D^2}{64 \cdot L} \cdot \frac{1}{\mu},$$

was die Geschwindigkeit im Rohr linear vom Differenzdruck über dem Rohr abhängig macht. Wird die Gleichung für den Massenstrom $\dot{m} = w \cdot A \cdot \rho$ und für die Querschnittsfläche $A = \frac{D^2}{4} \cdot \pi$ eingesetzt, ergibt sich

$$\frac{\dot{m}}{\frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot \rho} = \Delta p \cdot \frac{2 \cdot D^2}{64 \cdot L} \cdot \frac{1}{\mu}$$

und durch Isolation von \dot{m}

$$\dot{m} = \Delta p \cdot \frac{D^4 \cdot \pi}{128 \cdot L} \cdot \frac{\rho}{\mu}$$

Wir setzen $\xi = \frac{128 \cdot L}{D^4 \cdot \pi}$, welches konstant und nur von der Geometrie des Rohrs abhängig ist. Eingesetzt ergibt sich

$$\dot{m} = \frac{\Delta p \cdot \rho}{\mu \cdot \xi}, \quad (3.5)$$

womit sich der Massenstrom durch ein Rohr in Abhängigkeit vom Differenzdruck und unter laminaren Bedingungen beschreiben lässt. Wenn man 3.5 umstellt erkennt man, wie der Term unter der Wurzel in Gleichung 2.1 ersetzt wurde, um auf Gleichung 2.2 zu kommen.

$$\Delta p \cdot \rho = \dot{m} \cdot \mu \cdot \xi$$

3.1.2 Turbulente Rohrströmung gemäss Blasius

In den Rohrleitungen tritt ebenfalls ein Druckverlust auf. Im turbulenten Fall für $Re_{krit} \leq Re \leq 10^5$ lässt sich für glatte Rohre die Rohrreibungszahl nach Blasius gemäss Beziehung 3.6 berechnen.

$$\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (3.6)$$

Der Druckverlust berechnet man gemäss Gleichung 3.7, welche sich nur durch die Rohrreibungszahl von der Lösung gemäss Hagen-Poiseuille unterscheidet [12].

$$\Delta p_V = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{L}{D} \quad (3.7)$$

3.1.3 Geschwindigkeitsprofile

Laminare und turbulente Rohrströmungen weisen unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen $w = f(r)$ auf.

Laminares Geschwindigkeitsprofil

Die ausgebildete, laminare Rohrströmung folgt dem Gesetz von Stokes.

$$w(r) = \frac{Y_V}{4 \cdot \nu \cdot L} \cdot (R^2 - r^2) \quad (3.8)$$

Es stellt sich dementsprechend eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung ein (siehe Abbildung 3.1).

Weiter lässt sich sagen, dass ein konstantes Verhältnis zwischen der maximalen w_{max} und der mittleren Geschwindigkeit w im Rohr besteht:

$$w = \frac{1}{2} \cdot w_{max} \quad (3.9)$$

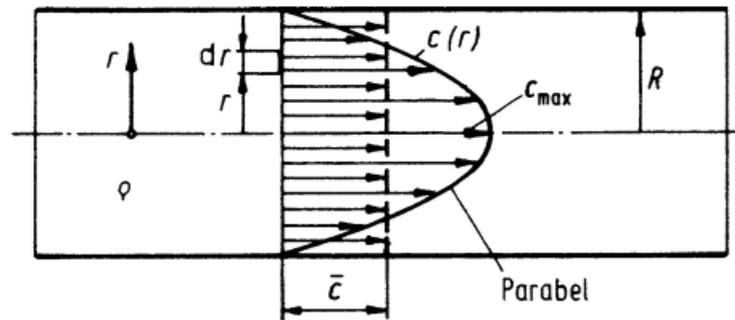


Abbildung 3.1: Geschwindigkeitsverteilung bei ausgebildeter, laminarer Rohrströmung [12]

Bei bekannter maximaler Geschwindigkeit w_{max} lässt sich auch die Geschwindigkeitsverteilung aus Beziehung 3.8 gemäss Beziehung 3.10 einfacher darstellen [13].

$$w_{lok, lam}(r) = w_{max} \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (3.10)$$

Turbulentes Geschwindigkeitsprofil

Für ausgebildete, turbulente Rohrströmungen wird eine weniger einfach zu beschreibende Geschwindigkeitsverteilung erwartet. Da bei Turbulenz erhöhter Impulsaustausch quer zur Rohrrichtung auftritt und die Fluidschichten nicht einfach parallel zueinander fließen, entspricht die turbulente Geschwindigkeitsverteilung mehr einer statistischen als einer physikalischen. Die fluktuierenden Geschwindigkeiten werden gemittelt und als konstante, rein axial auftretende Strömung dargestellt (siehe Abbildung 3.2).

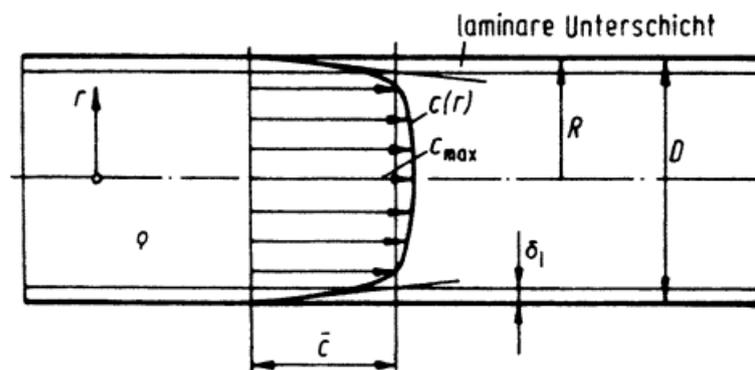


Abbildung 3.2: Geschwindigkeitsverteilung bei ausgebildeter, turbulenter Rohrströmung [12]

Die Geschwindigkeitsverteilung folgt hier annähernd folgendem Potenzgesetz.

$$w_{lok, turb}(r) = w_{max} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n \quad (3.11)$$

Der Exponent n ist abhängig von der Reynolds-Zahl, ändert sich aber nur geringfügig für $Re = 2000 \dots 4000$ und wird hier als $n = 1/6$ angenommen. Das Verhältnis zwischen der maximalen w_{max}

und der mittleren Geschwindigkeit w im Rohr für turbulente Strömung lautet:

$$w = K \cdot w_{max} \tag{3.12}$$

K ist dabei

$$K = \frac{2}{(n+1) \cdot (n+2)}.$$

Das Potenzgesetz ist eine Annäherung und gilt nicht in der Rohrmitte, wo ein Knick vorliegt, und in Wandnähe ab $0.95 \cdot R$. Es ist jedoch eine gute Beschreibung des Geschwindigkeitsprofils für die folgende Überlegung.

Gleiche Geschwindigkeiten für laminare und turbulente Strömung

Wenn für die gleiche Geschwindigkeit, respektive die gleiche Reynolds-Zahl die laminare und turbulente Geschwindigkeitsverteilung aufgezeichnet wird, wird ersichtlich, dass es zwischen Rohrmitte und Wand einen Schnittpunkt der beiden Geschwindigkeiten gibt (Abbildung 3.3).

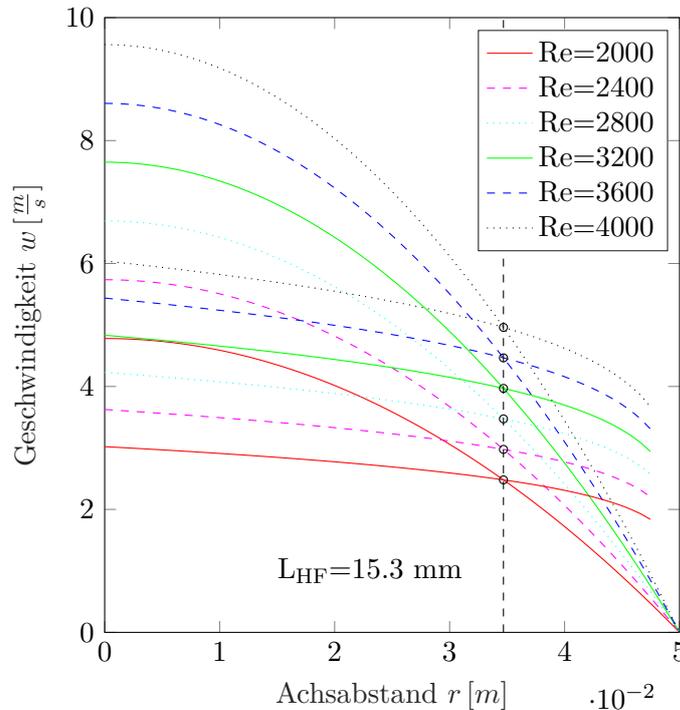


Abbildung 3.3: Geschwindigkeitsverteilung gemäss Beziehung 3.10 und 3.11

Das bedeutet, dass an diesem Punkt gilt

$$w_{lam}(r) = w_{turb}(r)$$

und somit findet man beim Gleichsetzen für Beziehung 3.10 und 3.11 einen Wert für den Achsabstand r , welcher dieselbe Geschwindigkeit im laminaren und turbulenten Fall aufweist. Unter der Annahme, dass die Strömung vollständig ausgebildet ist und der Exponent n konstant ist, ändert sich die lokale Strömungsgeschwindigkeit in diesem Punkt beim Umschlag zwischen laminarer und

turbulenter Strömung nicht mit einem Sprung. Zusätzlich ist dieses Verhalten in diesem Punkt unabhängig von Reynoldszahl, Temperatur und Druck. Der Grund dafür ist, dass die einzige variable Grösse die mittlere Geschwindigkeit w ist, welche gemäss Gleichung 3.3 proportional ist zum Massenstrom, und der Rest der Gleichungen 3.10 und 3.11 jeweils die Form der Geschwindigkeitsverteilung dimensionslos beschreiben. Für die Mengenmessung mittels Heissfilmsensor ist dieser Punkt als Messstelle vorzuziehen, da somit kein schwer bestimmbarer Sprung in der Übertragungsfunktion erwartet wird. Die Abbildung 3.3 zeigt, dass für einen Durchmesser von $D = 100 \text{ mm}$ eine Messung der lokalen Geschwindigkeit bei Wandabstand $L_{HF} = 15.3 \text{ mm}$ am sinnvollsten ist. Im Verhältnis zum Durchmesser ist dies ein Wandabstand von $0.306 \cdot D$. Das Verhältnis der lokalen Geschwindigkeit dort zur mittleren Geschwindigkeit ist $\frac{w}{w_{lok}} = 1.0377$.

3.2 Konvektiver Wärmetransport

Die Kühlkreisläufe im Mu3e-Experiment kühlen die Detektoren des Experiments durch erzwungene Konvektion. Dasselbe Konzept wird bei der Messung mittels Heissfilmsensor zur Durchflussmessung und der Differenzdruckmessung mittels mikrothermischem Durchflusssensor (SDP8xx beim Venturirohr) genutzt.

3.2.1 Wärmeübertragung beim Heissfilmsensor

Für die Evaluation wird Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion, Leitung und Strahlung aus folgenden Gründen vernachlässigt.

- Es wird bei $\dot{m} > 0$ immer eine Kombination von natürlicher und erzwungener Konvektion vorliegen. Es wird jedoch erwartet, dass der Anteil der erzwungenen Konvektion einen deutlich grösseren Beitrag liefert.
- Die Leitung über den Sensor selbst und die Rohrwand kann nicht ganz ausgeschlossen werden, wird jedoch als konstant und durch einen Nullabgleich korrigierbar angenommen.
- Der Beitrag der Strahlung wird aufgrund der kleinen Temperaturdifferenzen zwischen dem Sensor und der Umgebung als klein und konstant somit durch einen Nullabgleich korrigierbar angenommen.

Bei der konvektiver Wärmeübertragung wird Wärme von einer heissen Oberfläche auf das kältere Helium übertragen, welches sich dadurch erwärmt. Wenn das Helium an dieser Oberfläche zusätzlich vorbei strömt, wird der Effekt der Wärmeübertragung verstärkt, da der Temperaturgradient zwischen der beheizten Fläche und dem Helium zunimmt, weil das erwärmte Helium schneller abgeführt und durch kälteres ersetzt wird. Die auftretende Wärmestromdichte ist

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T. \quad (3.13)$$

Der übertragene Wärmestrom hängt von der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{HF} - T_{He}$ und dem lokalen Wärmeübergangskoeffizienten α ab. Für eine definierte Fläche lässt sich die übertragene Wärmeleistung durch Formel 2.3 beschreiben.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \Delta T \cdot A \quad (2.3)$$

Dabei ist α ein mittlerer Wert für die ganze Fläche und abhängig von deren Geometrie und den Strömungsbedingungen. Im Allgemeinen muss ein gemittelttes α experimentell bestimmt werden[14]. Für vereinfachte Geometrien und Strömungen lässt sich dies gemäss Kapitel 3.2.2 bestimmen.

Die Wärmeübertragung geschieht hier in der Grenzschicht. Dabei spielt das Verhältnis zwischen der Zähigkeit des Fluids und der Wärmeleitfähigkeit eine Rolle. Die Prandtl-Zahl

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (3.14)$$

beschreibt, wie sich die Temperatur und die Geschwindigkeit in der Randschicht unterschiedlich verhalten. Hierbei ist $a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ die Temperaturleitfähigkeit. Pr ist nur von den Stoffgrößen des Fluids abhängig [14]. $Pr_{He} = 0.664$ gilt für atmosphärische Bedingungen².

Zur Untersuchung der Überströmung der Platte wird eine Reynolds-Zahl bestimmt. Im Unterschied zur Formel 3.2 für Rohrströmungen wird hier die Länge der angeströmten Platte als charakteristische Länge eingesetzt. Ein Umschlag zu turbulenter Strömung wie in Abbildung 3.4 geschieht typischerweise ab $Re_{krit} \leq 3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$.

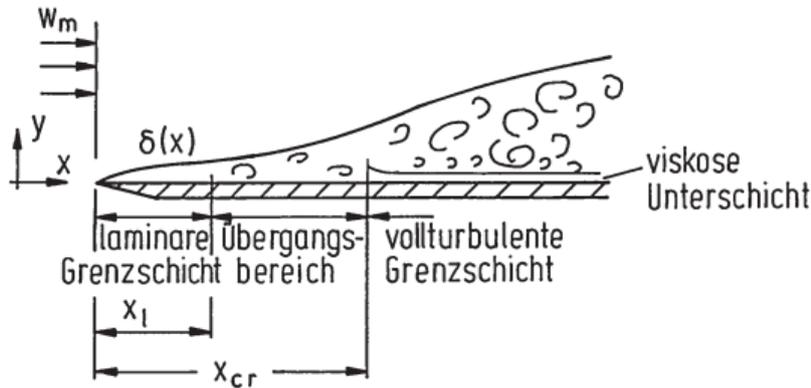


Abbildung 3.4: Parallel angeströmte ebene Platte mit Umschlag zu turbulenter Strömung[14]

Für den gewählten Heissfilmsensor gemäss Abbildung 3.5 entspricht dies

$$Re_x = \frac{b \cdot w \cdot \rho}{\mu}$$

Mit der Annahme einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit $w = 30 \frac{m}{s}$ und $b = 2.4 mm$ wird

$$Re_x = 586 \ll Re_{krit}$$

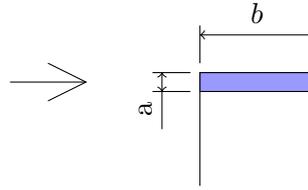
Es kann somit angenommen werden, dass kein Umschlag zu turbulenter Strömung geschieht. Die Dimensionen der beheizten Fläche werden angenommen. Die Grösse und Form im realen Sensor wird hier vereinfacht.

3.2.2 Nusselt-Zahl einer parallel angeströmten ebenen Platte

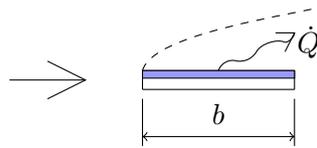
Eine wichtige dimensionslose Kennzahl der Konvektion ist die Nusselt-Zahl.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_0}{\lambda} \quad (3.15)$$

² $Pr \approx 0.7$ gilt für Gase.



(a) Heissfilmsensors, beheizte Fläche blau, $a = 1 \text{ mm}$, $b = 2.4 \text{ mm}$



(b) Heissfilmsensor als parallel angeströmte Platte (beheizte Fläche blau)

Abbildung 3.5: Vereinfachte Geometrie des Heissfilmsensors

Die Beziehung 3.15 kann zur Bestimmung von α bestimmt werden [14]. Dank der Eigenschaft von dimensionslosen Kennzahlen lässt sich mit einer Nusselt-Korrelation die Nusselt-Zahl für eine Geometrie wie dem Heissfilmsensor bestimmt werden und mit den bekannten Grössen der charakteristischen Länge L_0^3 .

Für den Fall der Ebenen Platte gemäss Abbildung 3.5 findet sich die Korrelation

$$Nu_m = 0.664 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.16)$$

Hier wird die Länge b der beheizten Fläche für Re_x und daher auch als charakteristische Länge L_0 eingesetzt. Formel 3.15 wird nach α umgestellt und in Formel 2.3 eingesetzt.

$$\dot{Q} = Nu \cdot A \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta T}{b} \quad (3.17)$$

Es ist zu beachten, dass die beheizte Fläche lang und schmal ist. Die Gleichung 3.16 berücksichtigt keine Randeinflüsse. Es ist somit zu erwarten, dass die effektive Heizleistung grösser ist, da die Fläche $a \cdot b$ seitlich entlang der langen Kante mit kühlerem Fluid gekühlt wird. Und der Wärmefluss nicht nur eindimensional, normal zur Fläche ist.

Die Heizleistung des Heissfilmsensors aus Abbildung 3.5 ist in Abbildung 3.7 abgebildet. Die Übertragungsfunktion des Heissfilms ist im Bereich bis $2 \frac{g}{s}$ sehr steil. Dort ist die Sensitivität des Sensors am grössten, da die Heizleistung mit einer kleinen Massenstromänderung stark zunimmt. Der Einsatzbereich des Heissfilms wird jedoch $2 \dots 10 \frac{g}{s}$ sein, wo die Steigung der Heizleistung abnimmt.

3.2.3 Dimensionsanalyse des Heissfilmsensors

Als Heissfilmsensor wurde der HF7 von IST ausgewählt. Das Modell ist für Luft kalibriert und für Strömungsgeschwindigkeiten bis $w_{max} = 100 \frac{m}{s}$ ausgelegt. Hier wird untersucht, wie sich das Signal für Helium verhält und, bis zu welcher Geschwindigkeit der Sensor mit Helium einsetzbar ist. Die angenommenen Randbedingungen, Stoffparameter und Resultate sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

³Die Wahl von L_0 geht aus der entsprechenden Nusselt-Korrelation hervor.

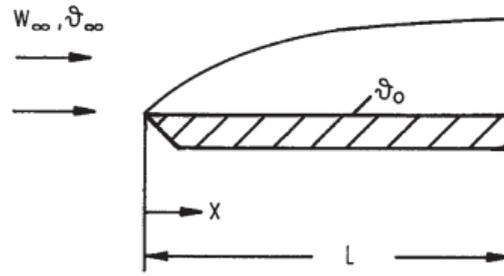


Abbildung 3.6: Parallel angeströmte ebene Platte ab Vorderkante beheizt[14]

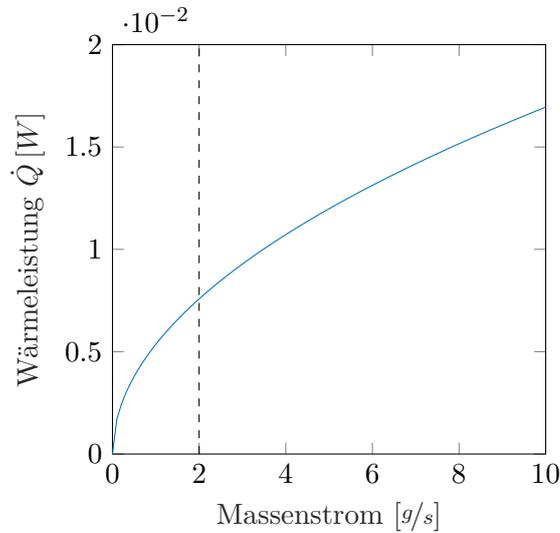


Abbildung 3.7: Theoretische Heizleistung des Heissfilms

Gemäss King's Law (Gleichung 2.4) wird die Geschwindigkeit als Leistung wahrgenommen. Die Wärmeleistung wird für Helium und Luft gleichgesetzt, um den Unterschied der Geschwindigkeiten bei gleicher Leistung festzustellen.

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{He}$$

Gemäss Formel 3.17 werden die Leistungen ersetzt.

$$Nu_L \cdot A \cdot \frac{\lambda_L \cdot \Delta T}{b} = Nu_{He} \cdot A \cdot \frac{\lambda_{He} \cdot \Delta T}{b}$$

$$0.664 \cdot \sqrt{Re_L} \cdot \sqrt[3]{Pr_L} \cdot \lambda_L = 0.664 \cdot \sqrt{Re_{He}} \cdot \sqrt[3]{Pr_{He}} \cdot \lambda_{He}$$

Die Definition für die Reynoldszahl gemäss Formel 3.2 wird eingesetzt.

$$\frac{w_L}{w_{He}} = \frac{\frac{\rho_{He}}{\rho_L}}{\frac{\mu_{He}}{\mu_L}} \cdot \left(\frac{Pr_{He}}{Pr_L} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\lambda_{He}}{\lambda_L} \right)^2$$

Das Verhältnis der Geschwindigkeiten ist konstant, sofern die Stoffparameter auf der rechten Seite konstant bleiben. Für die Bedingungen und Stoffparameter gemäss Tabelle 3.2 ergibt sich

$$w_{He} = \frac{w_L}{4.42}$$

Der mit Luft konzipierte Sensor kann bei gleicher Leistung anstelle von $100 \frac{m}{s}$ nur ca. $22.6 \frac{m}{s}$ messen.

Grösse	Wert		Einheit
	Luft	Helium	
T	293.15		K
p	1.013		bar
λ	0.0255	0.1534	$\frac{W}{m \cdot K}$
Pr	0.7197	0.6639	–
μ	$1.823 \cdot 10^{-5}$	$1.961 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s$
ρ	$12.04 \cdot 10^{-4}$	$1.664 \cdot 10^{-4}$	$\frac{kg}{m^3}$

Tabelle 3.2: Grössen und Stoffparameter zur Dimensionsanalyse des HF7

3.2.4 Differenzdruckmessung mittels mikrothermischer Durchflussmessung

Der im Venturirohr verwendete Differenzdrucksensor beruht auf dem Prinzip des konvektiven Wärmetransports. In einer Kapillaren im Sensor tritt bei einem Differenzdruck $\Delta p > 0$ ein kleiner Massenstrom \dot{m}_{BP} auf. Diese Kapillare ist mit einem Heizelement und mit einem Temperaturfühler symmetrisch vor und nach dem Heizelement ausgestattet (siehe Abbildung 3.8)⁴. Das Heizelement

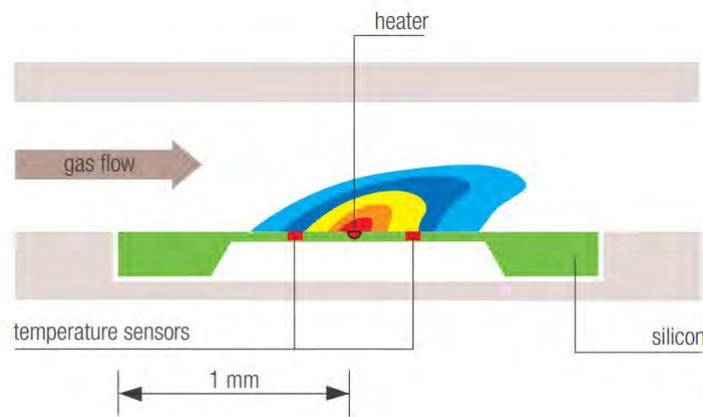


Abbildung 3.8: Schema der Kapillare der Differenzdrucksensoren von Sensirion [15]

erwärmt das Gas lokal. Durch Wärmeleitung wird die zugeführte Wärme über das Gas abgeleitet. Es entsteht somit ein Temperaturgefälle ausgehend vom Heizelement. Im Fall von $\Delta p = 0$ und $\dot{m}_{BP} = 0$ ist dieser Temperaturgradient symmetrisch, sodass dieselbe Temperatur bei beiden Temperaturfühlern vorliegt (Abbildung 3.9). Liegt aber eine Strömung vor, dann wird von der Seite des höheren Drucks kälteres Gas zugeführt, wodurch die Temperatur beim Temperaturfühler T_1 auf dieser Seite sinkt. Zusätzlich wird das erwärmte Gas in die Richtung des zweiten Temperaturfühlers

⁴In dieser Anordnung können Massenströme in beide Richtungen gemessen werden. Dies kommt hier jedoch nicht zur Anwendung, da das Venturirohr unidirektional eingesetzt wird.

T_2 transportiert, sodass die Temperaturverteilung nicht mehr symmetrisch um das Heizelement verteilt ist. Diese Verschiebung bewirkt eine Temperaturdifferenz zwischen den Heizelementen, sodass $T_1 < T_2$. Diese Temperaturdifferenz ist abhängig vom Massenstrom: $\Delta T = f(\dot{m}_{BP})$. Dadurch die Kalibrierung dieser Temperaturdifferenz mit einem bestimmten Medium lassen sich Beziehungen von Massenstrom und Temperaturdifferenz ($\dot{m} = f(\Delta T)$) oder Differenzdruck und Temperaturdifferenz ($\Delta p = f(\Delta T)$) herleiten.

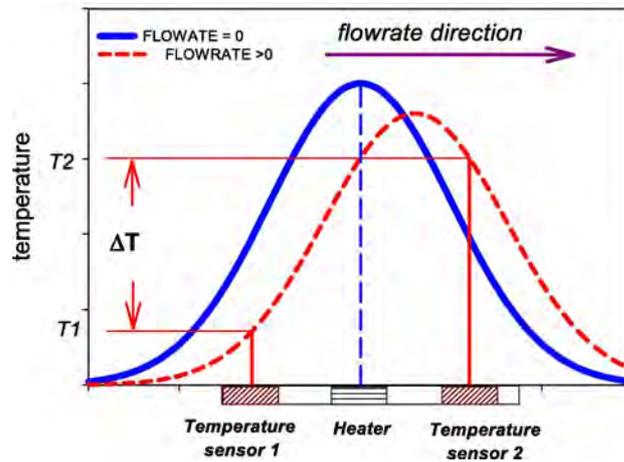


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung des Temperaturprofils in der Kapillare [16]

3.3 Differenzdruck im Venturirohr

Die Durchflussmessung mittels Venturirohr funktioniert, weil durch die Verengung des Leitungsquerschnitts der statische Druck abnimmt. Um das Gesetz der Massenerhaltung zu erfüllen wird die Strömung bei der Querschnittsreduktion beschleunigt, was zu einer Zunahme des dynamischen Drucks führt aber auch zur Abnahme des statischen Drucks. Die Bernoulli-Gleichung besagt

$$g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} = konst. \quad (3.18)$$

Diese ist unter der Voraussetzung von

- Stationarität
- Inkompressibilität
- Reibungsfreiheit
- Betrachtung entlang einer Stromlinie

anwendbar. Die Annahme der Inkompressibilität wird in Kapitel 3.3.2 begründet.

Mit $z_1 = z_2$ bei horizontaler Anordnung wird Gleichung 3.18 zu

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2}.$$

Die Geschwindigkeit w_2 wird durch das Durchmesser Verhältnis $\beta = \frac{D_2}{D_1}$ definiert:

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{D_1}{D_2} = \frac{w_1}{\beta}.$$

Wenn nach dem Differenzdruck $\Delta p = p_1 - p_2$ umgestellt wird ergibt sich

$$\Delta p = \rho \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = \rho \cdot w^2 \cdot \left(\frac{1}{\beta^4} - 1 \right). \quad (3.19)$$

Der Differenzdruck steigt somit quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit, wie in Abbildung 3.10 ersichtlich. Die horizontale Lage wird generell für Venturirohre bevorzugt, da sich der hydrostatische Druck heraus kürzt. Der hydrostatische Druck ist unabhängig von der Fliessgeschwindigkeit und somit über den ganzen Messbereich konstant. Der Einfluss wird im Einsatz mit Helium gering und beträgt ca. $\Delta p_z = g \cdot z \cdot \rho \approx 0.19 Pa$ bei 1.1 bar und 4°C. Der dadurch begangene Fehler ist klein im Vergleich mit dem Differenzdruck bei grossen Massenströmen. Bei der Differenzdruckmessung mittels einem mikrothermischen Durchflussmessers kann die Einbaulage beliebig gewählt werden. Grund dafür ist, dass das Gas den ganzen Bypass zwischen den beiden Ebenen der Druckentnahmebohrungen ausfüllt. Um dies nachzuvollziehen, kann man sich vorstellen, dass man das Venturirohr senkrecht hinstellt, sodass der oben genannte hydrostatisch bedingte Differenzdruck entsteht. Ohne äussere Einflüsse wird hier keine Zirkulation oder ein kleiner Massenstrom durch den Differenzdrucksensor entstehen. Diese Überlegung sollte dadurch eine beliebige Einbaulage des Venturirohrs im Experiment ermöglichen ohne Kalibrierung mit der gleichen Neigung.

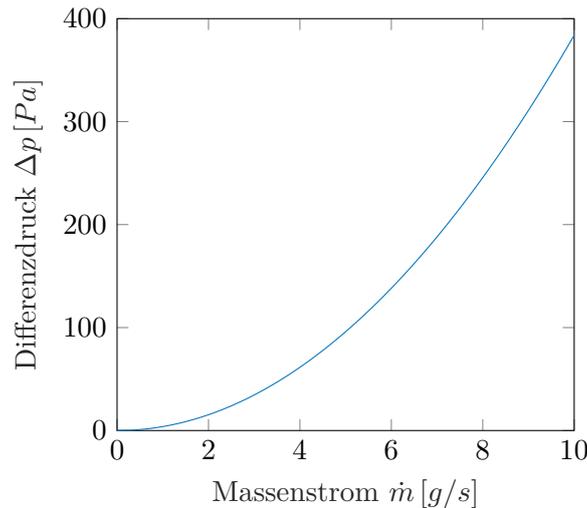


Abbildung 3.10: Differenzdruck über dem Venturirohr gemäss Formel 3.19

3.3.1 Wahl des Durchmessers

Um die Baugrösse des Venturirohrs dem Massenstrombereich anzupassen, der gemessen werden soll, kann die Gleichung 2.1 verwendet werden.

$$\dot{m} = C_D \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \quad (2.1)$$

Die limitierende Grösse ist der Differenzdruck, der vom Differenzdrucksensor gemessen werden kann. Wenn dieser und das Durchmesser Verhältnis β konstant gehalten werden, skaliert der Massenstrom

mit $A_2 = (D_1 \cdot \beta)^2 \cdot \frac{\pi}{4}$. Der Durchmesser skaliert also mit $\sqrt{\dot{m}}$. Wenn die Dichte variabel ist, skaliert der Massenstrom mit $1/\rho$. Aus den Beobachtungen zu den Versuchen des Venturirohrs in Kapitel 6.2.6 geht hervor, dass das Venturirohr bis $\dot{m}_{max} = 7 \text{ g/s}$ bei einer Dichte von $\rho_{max} = 0.22 \text{ kg/m}^3$ eingesetzt werden kann. Für genügend Spielraum wird $\dot{m}_m = 5 \text{ g/s}$ bei $\rho_m = 0.19 \text{ kg/m}^3$ als geeigneter Soll-Massenstrom für das Venturirohr mit $D_m = 31.3 \text{ mm}$ gewählt mit dem Wissen, dass es bis maximal 7 g/s eingesetzt werden könnte.

$$D = D_m \cdot \sqrt{\frac{\dot{m} \cdot \rho_m}{\dot{m}_m \cdot \rho}} \quad (3.20)$$

$$D_{min} = D_m \cdot \sqrt{\frac{\dot{m} \cdot \rho_{max}}{\dot{m}_{max} \cdot \rho}}$$

3.3.2 Vernachlässigung der Kompressibilität

Die Gleichung von Bernoulli in Formel 3.18 ist nur gültig, wenn das Fluid als inkompressibel betrachtet werden kann. Für Gasströmungen müssen folgende Voraussetzungen gegeben sein, um diese Annahme treffen zu können:

- Voraussetzung kleiner Dimensionen:

$$\frac{g \cdot L}{a^2} \ll 1.$$

Dies ist mit Ausnahme von der Meteorologie, wo grosse Strömungsgebiete betrachtet werden, für die meisten technischen Anwendungen erfüllt.

- Voraussetzung der kleinen Machzahl:

$$\frac{w^2}{a^2} = Ma^2 \ll 1.$$

Für Gasströmungen wird üblicherweise geprüft, ob $Ma < 0.3$. Für den grössten Massenstrom $\dot{m}_{max} = 10 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ in einer kleinen Rohrleitung von $D_{min} = 0.021 \text{ m}$ (gemäss Versuchsaufbau [17]) beträgt die Machzahl $Ma_{max} = 0.08$. Diese Voraussetzung wird dank der vergleichsweise hohen Schallgeschwindigkeit von Helium von $a = 1016.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bei atmosphärischen Bedingungen erfüllt.

- Voraussetzung kleiner Frequenzen:

$$\frac{L^2 \cdot f^2}{a^2} \ll 1.$$

Die Drehzahl und damit verbundene Frequenz der Turbokompressoren ist sehr hoch. Jedoch sollen pulsierende Strömungen und akustische Schwingungen im Experiment vermieden und mit entsprechenden Komponenten unterdrückt werden, da dies einen negativen Einfluss auf den Erfolg des Experiments hat. Diese Voraussetzung wird als erfüllt angenommen.

Die drei Bedingungen oben werden erfüllt. Für sämtliche Berechnungen wird Inkompressibilität und demzufolge eine konstante Dichte angenommen. In der Gleichung für Venturirohre kommt die Expansionszahl ε vor, die für kompressible Medien eingesetzt wird. Gemäss Menons Gleichung 3.21 kann die Expansionszahl in Abhängigkeit des Isentropenkoeffizienten κ , dem Druckverhältnis

$\tau = p_2/p_1$ zwischen dem grössten und kleinsten Querschnitt und dem Durchmesser Verhältnis β berechnet werden [18].

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa \tau^{2/\kappa} (\beta^4 - 1) \left(\tau^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)}{(\beta^4 \tau^{2/\kappa} - 1) (\kappa - 1) (\tau - 1)}} \quad (3.21)$$

Die Expansionszahl nimmt linear mit dem zunehmenden Differenzdruck ab und beträgt 1 bei Massenstrom null. Beim maximal messbaren Differenzdruck des *SDP816-500Pa* bei *500 Pa* beträgt die Expansionszahl 0.9953. Der Einfluss der Expansionszahl wird aufgrund dieser geringen Abweichung von 1 in der numerischen Untersuchung und der Untersuchung der Versuche des Venturirohrs vernachlässigt und $\varepsilon = 1$ angenommen.

3.4 Massenstrommessung im Bypass

Hier wird ein analytischer Ansatz gewählt, um ein Venturirohr mit Bypass als Rohrsystem mit zwei parallel geschalteten Zweigen gemäss Abbildung 3.11 zu charakterisieren.

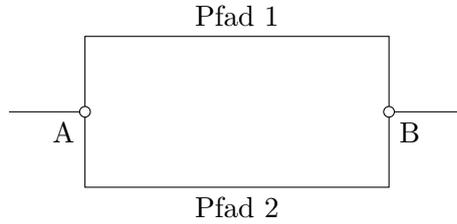


Abbildung 3.11: Parallelschaltung zweier Rohre

Analog zu den Kirchhoffschen Gesetzen für Knoten und Maschen in elektrischen Netzen lässt sich annehmen, dass $p_{A1} = p_{A2}$ und $p_{B1} = p_{B2}$ an den beiden Knoten gilt. Der Druckunterschied Δp ist dadurch über beide Pfade gleich gross. Es ist zu beachten, dass der Differenzdruck Δp über dem Venturirohr aufgrund der Beschleunigung der Strömung entsteht und Δp_V über dem Bypass aufgrund von Strömungsverlusten entsteht. Um die Massenbilanz zu erfüllen ist der gesamte Massenstrom

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \rho \cdot (\dot{V}_1 + \dot{V}_2).$$

Anstelle von Pfad 1 und 2 haben wir hier einen Pfad durch das Venturirohr und einen Pfad durch den Differenzdrucksensor im Bypass. Für das Venturirohr und den verwendeten Sensor *SDP810-500Pa* von Sensirion wird angenommen, dass der Massenstrom durch den Bypass sehr viel kleiner als der Massenstrom durch das Venturirohr ist.

$$\dot{m}_{BP} \ll \dot{m}_{Venturi} \rightarrow \dot{m} \approx \dot{m}_{Venturi}$$

Unter dieser Annahme kann auch davon ausgegangen werden, dass die Strömung durch den Bypass den Differenzdruck Δp über dem Venturirohr nicht beeinflusst. Weiter lässt sich annehmen, dass die Strömung aufgrund der kleinen Geschwindigkeiten im Bypass laminar ist. Wenn die Formel für den Differenzdruck im Venturirohr gemäss Formel 3.19 in Formel 3.5 für den Massenstrom bei laminarer Rohrströmung eingesetzt wird, findet sich ein Ausdruck für den Massenstrom im Bypass in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit vor dem Venturirohr.

$$\dot{m}_{BP} = \frac{\rho \cdot w^2}{\mu} \cdot \frac{\frac{1}{\beta^4} - 1}{\xi}$$

Wird für die Geschwindigkeit Formel 3.3 eingesetzt, ergibt sich eine direkte Abhängigkeit vom Massenstrom.

$$\dot{m}_{BP} = \frac{\dot{m}^2}{\mu \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\xi \cdot A^2} - 1 \quad (3.22)$$

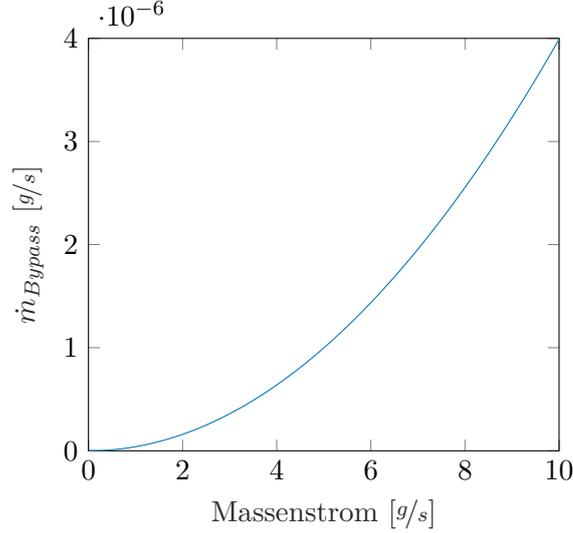


Abbildung 3.12: Bypass-Massenstrom gemäss Formel 3.22

Umgestellt nach der im Bypass gemessenen Menge ergibt sich die Übertragungsfunktion in umgekehrter Richtung, sodass mit der Messung von \dot{m}_{BP} auf den gesamten Massenstrom \dot{m} geschlossen werden kann.

$$\dot{m} = \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \cdot \sqrt{\dot{m}_{BP} \cdot \mu \cdot \rho}$$

Wenn die Temperatur im Bypass sich von der Temperatur im Venturirohr unterscheidet, müssen beide Dichten berücksichtigt werden. Wenn die Dichte für ideale Gase als $\rho = \frac{p}{RT}$ angenommen wird ergibt sich folgender Zusammenhang.

$$\dot{m} = \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \cdot \sqrt{\dot{m}_{BP} \cdot \mu_{BP} \cdot \frac{T_{BP}}{T_{VT}}}$$

Dabei wird angenommen, dass der Druck im Bypass und im Venturirohr gleich ist. Die Temperatur im Bypass kann sich von der Temperatur im Venturirohr unterscheiden, da die Strömungsgeschwindigkeit sehr klein und dadurch der konvektive Wärmetransport in den Bypass sehr klein ist. Durch die Wärmeabgabe über Rohr- oder Schlauchwände ist es möglich, dass die Temperatur im Bypass sich der Umgebungstemperatur nähert und von der Temperatur im Venturirohr abweicht. Die Zähigkeit ist gemäss Abbildung 2.1 vor allem von der Temperatur abhängig und wird deshalb in Abhängigkeit der Temperatur im Bypass berechnet. Um die Gleichung zu vervollständigen werden die Durchflusszahl und die Expansionszahl ergänzt.

$$\dot{m} = C_D \cdot \varepsilon \cdot \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \cdot \sqrt{\dot{m}_{BP} \cdot \mu_{BP} \cdot \frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \quad (3.23)$$

3.5 Joule-Thomson-Effekt

Der Joule-Thomson-Effekt beschreibt die Temperaturänderung von isenthalp expandierenden, realen Gasen. In den meisten Anwendungen sinkt die Temperatur von Gasen beim Ausströmen aus Druckbehältern (z.B. Druckluft). Der Joule-Thomson-Koeffizient μ_{JT} beschreibt die Steigung und Richtung dieser Temperaturänderung.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H$$

Helium verhält sich unter Normalbedingungen aufgrund des negativen Joule-Thomson-Koeffizienten, so dass es bei der Expansion wärmer wird.

3.6 Statistische Grössen zur Auswertung der Messungen

Für die spätere Auswertung der Messungen der Versuche und die Berechnung der Unsicherheit der Massenstrommessung werden die folgenden drei statistischen Grössen benötigt.

Arithmetisches Mittel

Bei der Auswertung der Messdaten werden Betriebspunkte, welche bis zu 60 s konstant gehalten werden und aus N Messungen bestehen, gemäss der Definition 3.24 gemittelt. Dadurch wird der Rausch-Anteil der Signale gedämpft.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3.24)$$

Standardabweichung

Die Standardabweichung zeigt wie stark eine Anzahl von N Messungen um deren Mittelwert streut. Gemittelte Werte mit grosser Streuung sind entweder nicht stationär, periodisch oder durch starkes Rauschen unsicher. In der Auswertung hier ist der Hauptgrund für grössere Standardabweichungen, dass der Messpunkt nicht stationär ist. Es wird die Definition 3.25 verwendet.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (3.25)$$

Standardfehler oder Standardunsicherheit

Der Standardfehler s oder Standardunsicherheit u kann gemäss 3.26 für eine Messreihe, die über eine Anzahl Messungen N verfügt gebildet werden.

$$s = u = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.26)$$

Die Standardunsicherheit ist gemäss GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [19] ein Fehler von *Typ A*. Diese Fehler oder Unsicherheiten beruhen auf dem empirischen Wert des Standardfehlers gemäss der Definition in Beziehung 3.26.

Messunsicherheiten vom *Typ B* basieren auf Standardunsicherheiten, welche Datenblättern oder Kalibrierscheinen von Messgeräten und Sensoren entnommen werden können. Je nach Verteilung der Unsicherheiten dieser Angaben müssen diese umgeformt werden.

- Für symmetrische Rechteckverteilungen⁵ mit Breite $2a$:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

- Für eine Normalverteilung mit Standardabweichung σ um den Mittelwert \bar{x} :

$$u = \sigma$$

- Für eine Normalverteilung unter der Angabe der erweiterten Unsicherheit $U = u \cdot k$:

$$u = \frac{U}{k}$$

Gemäss GUM wird üblicherweise die erweiterte Unsicherheit mit Faktor $k = 2$ angegeben.

Durch die Umformung in die Form einer normalverteilten Standardunsicherheit lassen sich die Unsicherheiten gemäss der Theorie der Fehlerfortpflanzung kombinieren. Dies erlaubt ebenfalls eine Kombination der Messunsicherheiten von *Typ A* und *Typ B* gemäss Gleichung 3.27.

$$u_C = \sqrt{u_{Typ A}^2 + u_{Typ B}^2} \quad (3.27)$$

3.7 Theoretische Messunsicherheit der Massenstrommessung

Die Unsicherheiten der Messmethoden werden mittels Fehlerrechnung abgeschätzt. Die Untersuchung wird hier analytisch, auf Basis von Angaben der Hersteller und Schätzungen durchgeführt. Es wird die Gauss'sche Fehlerfortpflanzung gemäss Gleichung 3.28 angewendet. Später wird die Unsicherheit der Messungen in den Versuchen und des kalibrierten Venturirohrs berechnet, wobei die Unsicherheit aufgrund empirischer Daten und Kennzahlen der verwendeten Komponenten berechnet wird.

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial x_i} y \cdot u_{x_i} \right)^2} \quad y = f(x_1 \dots x_n) \quad (3.28)$$

Die Unsicherheiten werden alle als Standardunsicherheiten angegeben. Bei Normalverteilung beträgt Wahrscheinlichkeit, dass eine Messung innerhalb dieser Unsicherheit liegt beträgt ca. 68% [19]. Für die erweiterte Unsicherheit mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% muss die Standardunsicherheit mit dem Faktor $k = 2$ verdoppelt werden.

$$U = u \cdot k \quad (3.29)$$

⁵Z.B. $\pm 1 \text{ mbar}$ entspricht einer Rechteckverteilung mit Breite $2a = 2 \text{ mbar}$.

3.7.1 Messunsicherheit des Venturirohrs

Die Unsicherheit des Venturirohrs wird durch Fehlerfortpflanzung aus Gleichung 3.30 berechnet. Diese ist äquivalent mit der Gleichung 2.1 gemäss dem Konzept in Kapitel 2.2, enthält aber nur direkt messbare Grössen, das heisst D_1 und D_2 anstatt A_1 und β oder p und T anstatt ρ .

$$\dot{m} = C_D \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{\frac{D_2^2}{4} \cdot \pi}{\sqrt{1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}}} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \frac{p}{R \cdot T}} \quad (3.30)$$

Die Messunsicherheit wird gemäss Formel 3.28 berechnet, indem die Gleichung 3.30 nach den unsicheren Grössen abgeleitet wird. Gleichung 2.1, welche im Kapitel 2.2 vorgestellt wurde, wird nicht verwendet, da keinerlei Kenntnisse über die Geometrie des Sensors und die Übertragungsfunktion des Sensors im Bezug auf den Massenstrom vorhanden sind. Die analytische Fehlerrechnung hier ist aber repräsentativ für die Unsicherheit der Lösung mit mikrothermischem Durchflusssensor. Die Beiträge zur Unsicherheit sind in Tabelle 3.3 aufgelistet. Diese umfassen die Unsicherheiten der Gleichung 3.30. Die Unsicherheit der elektronischen Messung und Signalübertragung aller Sensoren wird nicht berücksichtigt.

Grösse	Unsicherheit	Einheit	Kommentar
C_D	± 3	%	vom Wert
p	± 1	%	vom Messwert
T	± 1	K	Schätzung
Δp	± 0.1	Pa	Nullpunkt
Δp	± 5	%	Temperatur- und allg. Messunsicherheit
D_1	± 0.15	mm	Toleranz ISO 2768-m
D_1	± 0.1	mm	Toleranz ISO 2768-m

Tabelle 3.3: Beiträge zur Unsicherheit des Venturirohrs

Aus Abbildung 3.14 ist ersichtlich, dass die Fertigungstoleranzen viel zur Unsicherheit beitragen. Dieser Anteil ist durch genaues Messen der gefertigten Teile reduzierbar. Die Unsicherheit der Durchflusszahl kann theoretisch durch Wiederholungsmessungen reduziert werden⁶. Die Messung von Druck und Temperatur haben einen geringen Einfluss.

Die Übertragungsfunktion zeigt klar, dass der Differenzdruck am Differenzdrucksensor am Ein- und Austritt nicht gleich gross ist, wenn derselbe Massenstrom durch das Venturirohr strömt. Die absolute Unsicherheit (Fehlerbalken in Abbildung 3.13) nimmt mit zunehmendem Massenstrom zu. Die relative Unsicherheit nimmt gemäss Abbildung 3.15 mit zunehmendem Massenstrom auf 2.3% im Eintritt und 2.85% im Austritt abnimmt. Die Unsicherheit ist im Austritt dadurch grösser.

⁶Die Ermittlung der Durchflusszahl C_D muss generell durch Versuche erfolgen.

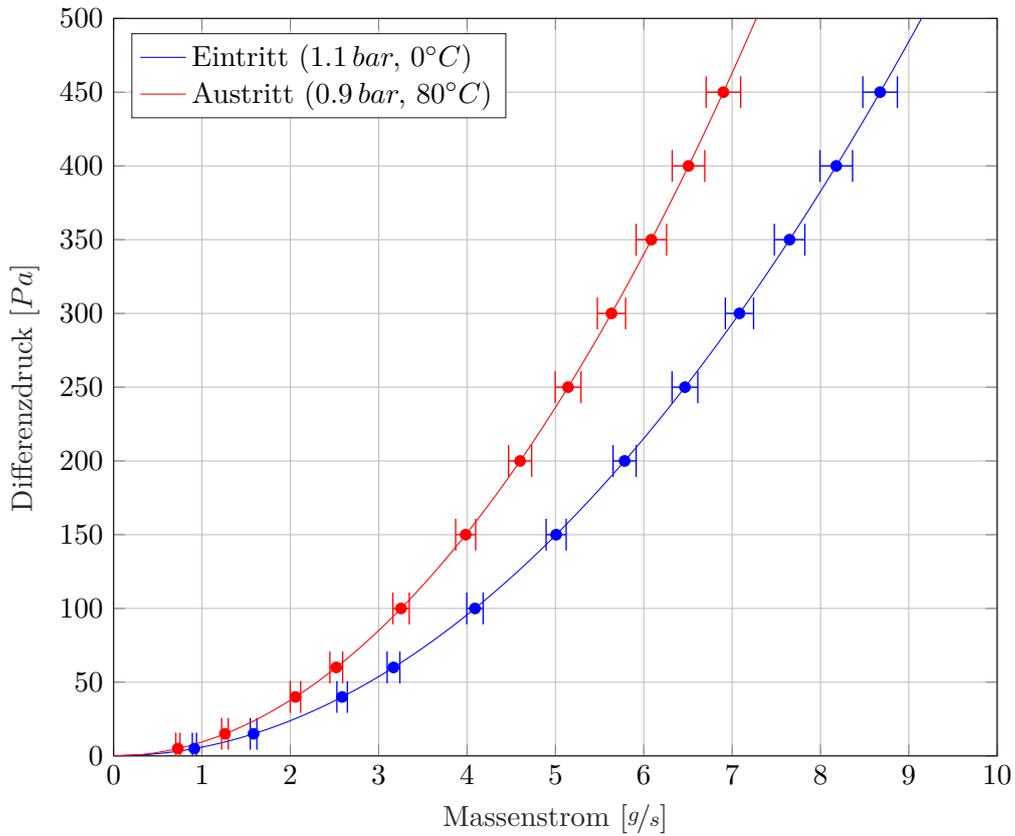


Abbildung 3.13: Übertragungsfunktion des Venturirohrs mit Unsicherheit

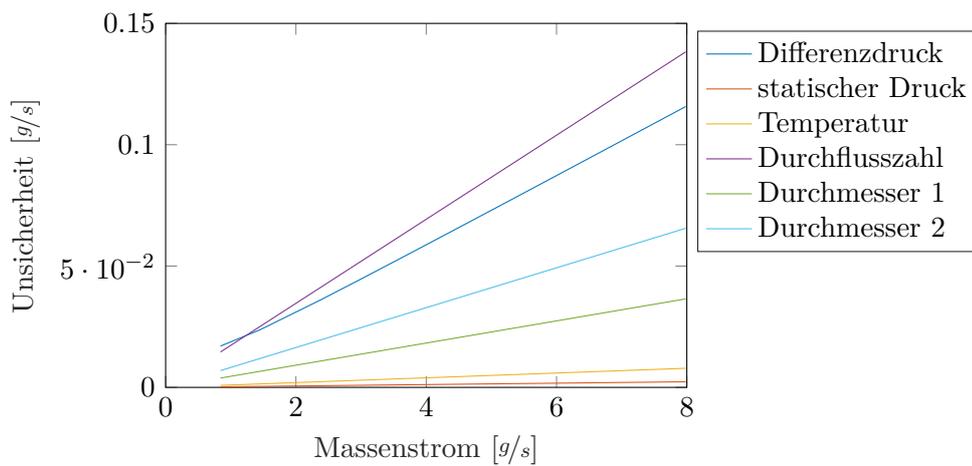


Abbildung 3.14: Beiträge zur Unsicherheit des Venturirohrs

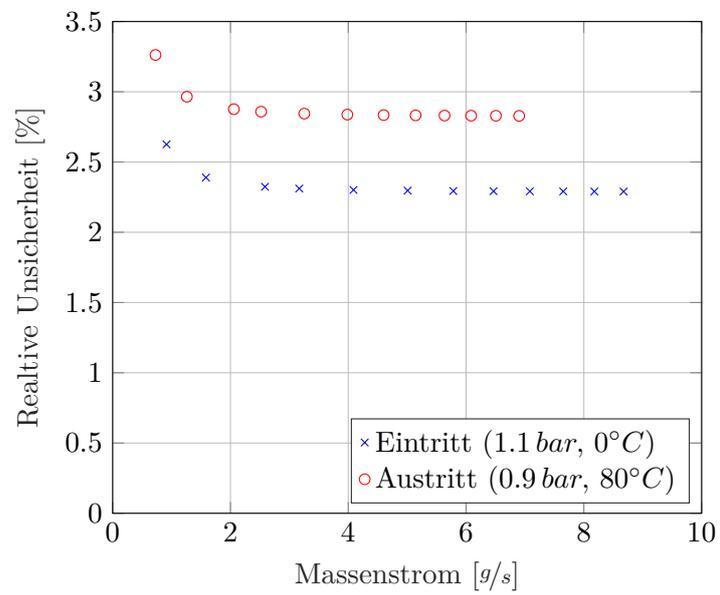


Abbildung 3.15: Relative Unsicherheit des Venturirohrs

3.7.2 Messunsicherheit des Heissfilmsensors

Die mittlere Geschwindigkeit ist gemäss der Beziehung 3.31 proportional zum Massenstrom.

$$w = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi} \quad (3.31)$$

$$w_{lok, lam} = w \cdot 2 \cdot \left(1 - \frac{(R - L_{HF})^2}{R^2}\right) \quad (3.32)$$

Für den laminaren Fall ist die Steigung der Geschwindigkeit im Punkt bei L_{HF} grösser. Somit ist die Positionierung des Heissfilms im laminaren Fall mit einer grösseren Unsicherheit verbunden. Die lokale Geschwindigkeit im laminaren Fall verhält sich gemäss der Beziehung 3.32, die in Kapitel 3.1 vorgestellt wurde. Die Unsicherheit der lokalen Geschwindigkeit ergibt sich aus

$$u_{w_{lok, lam}} = \frac{\partial w_{lok, lam}}{\partial L_{HF}} \cdot u_{L_{HF}}$$

Wenn der Massenstrom anstelle der Geschwindigkeit eingesetzt wird, wird die Unsicherheit für den laminaren Fall

$$u_{w_{lok, lam}} = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \frac{32 \cdot (D - 2 \cdot L_{HF})}{D^4 \cdot \pi} \cdot u_{L_{HF}} \quad (3.33)$$

Die Unsicherheit des Sensors trägt bei grossen Massenströmen am stärksten zur Unsicherheit bei. Durch eine Kalibrierung ohne nachträgliches Austauschen oder Verstellen der Position des Sensors lässt sich die Unsicherheit aufgrund der Einstecktiefe im laminaren und turbulenten Fall minimieren. Die Unsicherheit des Sensorsignals wird angenommen als proportional zur Unsicherheit der Heizleistung und somit wird die Unsicherheit des Signals als Unsicherheit der Heizleistung angenommen.

$$u_{\dot{Q}} = \sqrt{\left(\frac{3\%}{\sqrt{3}} \cdot \dot{Q}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial L_{HF}} \cdot u_{L_{HF}}\right)^2} \quad (3.34)$$

Mit Daten aus der Simulation des Heissfilmsensors im freien Strömungsfeld (Abbildung 3.17) lässt sich die Unsicherheit der Massenstrommessung folgendermassen berechnen.

$$u_{\dot{m}} = \frac{\partial \dot{m}_{Sim}}{\partial \dot{Q}_{Sim}} \cdot u_{\dot{Q}} \quad (3.35)$$

Die Unsicherheit wird dabei auf die Heizleistung angewendet, die gemäss Abbildung 3.17 auf Null korrigiert wurde (y-Achsenabschnitt der gefitteten Kurve).

Grösse	Wert	Einheit	Kommentar
\dot{Q}	± 3	%	vom Messwert mit Nullpunktkorrektur
L_{HF}	± 0.5	mm	Schätzung

Tabelle 3.4: Beiträge zur Unsicherheit des Heissfilmsensors

Wie schon bei Abbildung 3.7 bemerkt ist die Steigung der Heizleistung im Bereich ab $2 \frac{g}{s}$ eher flach. Dadurch führt die Unsicherheit der Heizleistung zu einer noch grösseren Unsicherheit der Massenstrommessung.

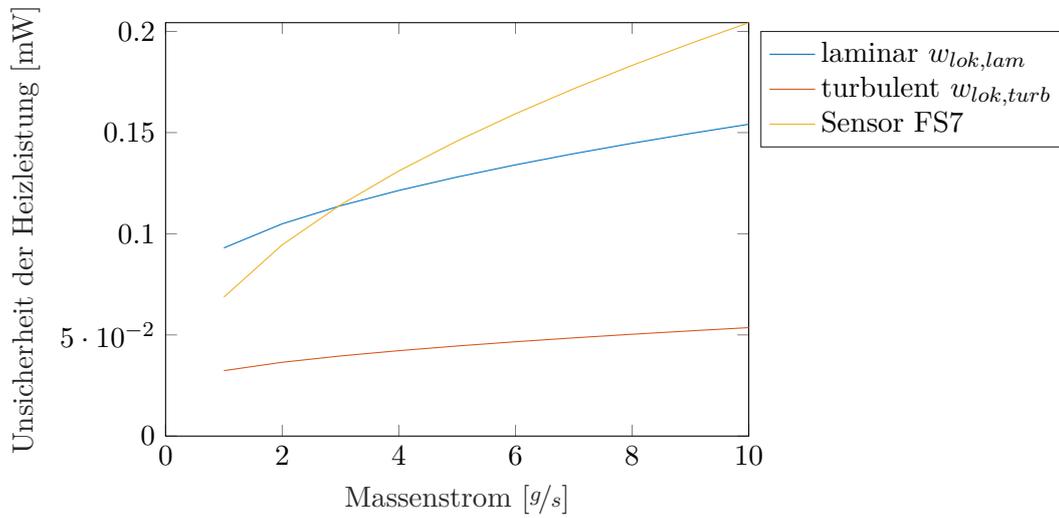


Abbildung 3.16: Beiträge zur Unsicherheit des Heissfilmsensors

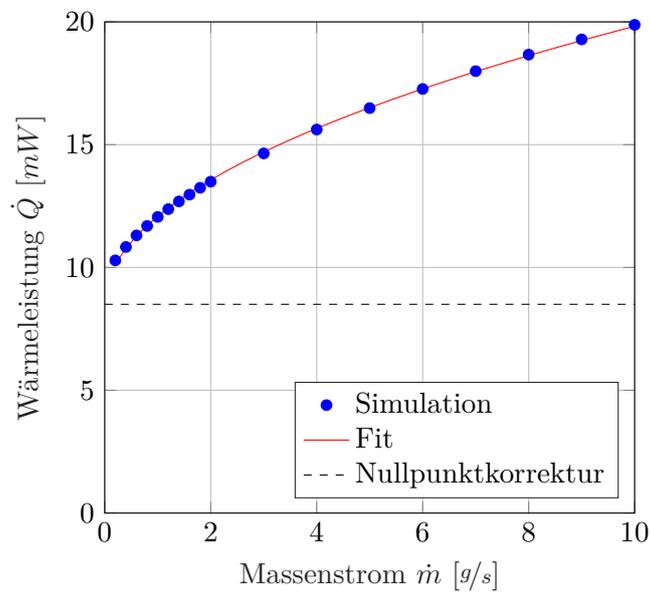


Abbildung 3.17: Fit der Heizleistung aus der Simulation im freien Strömungsfeld

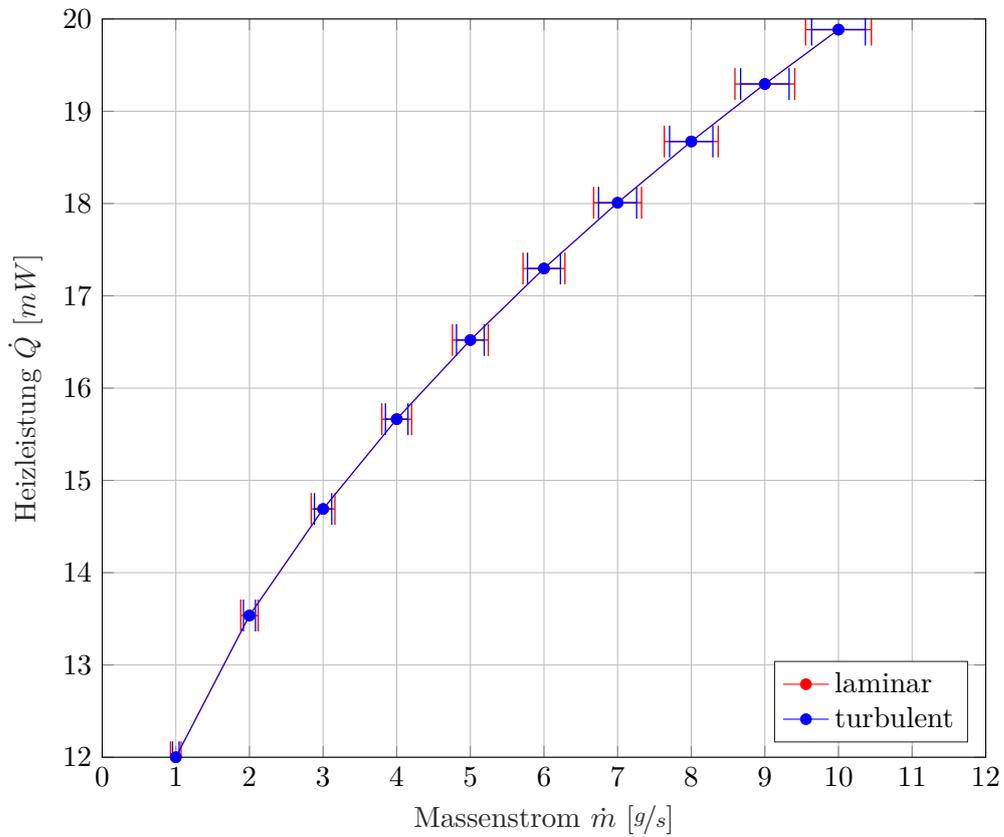


Abbildung 3.18: Übertragungsfunktion des Heissfilmsensors mit Unsicherheit

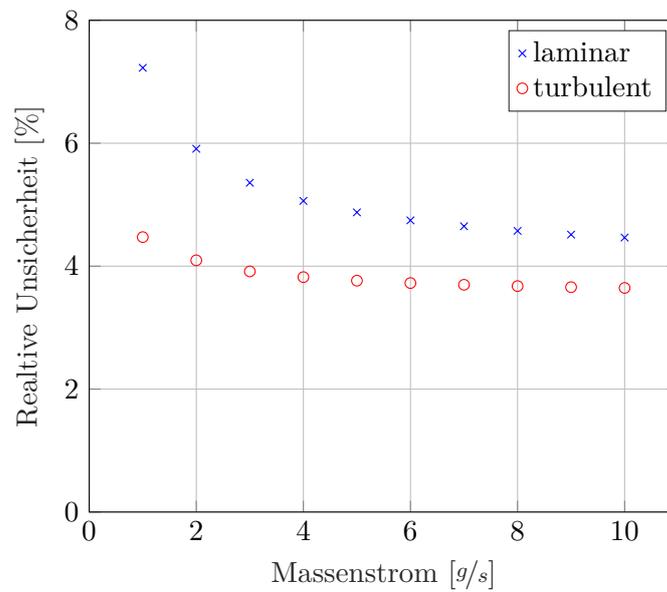


Abbildung 3.19: Relative Unsicherheit des Heissfilmsensors

3.8 Modellierung der Messdaten mittels Regressionsanalyse

Bei der Kalibrierung wird ein Modell oder eine sogenannten Ausgleichskurve bestimmt. Diese Kurve beschreibt die gesuchte Grösse, den Massenstrom, analytisch in Abhängigkeit der Messgrössen (Temperatur, Druck, Strom, ...).

$$\dot{m} = f(x)$$

Die Parameter werden ausgeglichen, sodass das Modell möglichst genau ist, werden Parameter (β_1, β_2, \dots) eingeführt, welche die Abhängigkeit des Massenstroms von den Messgrössen charakterisieren. Die Abweichung des Modells von den erfassten Messdaten soll dadurch minimiert werden, indem geeigneten Parameter bestimmt werden. Dies wird mit den Gauss-Newton Verfahren erreicht. Dabei werden die Parameter des Modells so bestimmt, dass die Quadratsumme S der Residuen an den Messpunkten minimal wird [20].

$$S(\beta_1, \beta_2, \dots) = \sum_{i=1}^N [\dot{m}_i - f(x_i)]^2 \quad (3.36)$$

Diese Summe ist abhängig von den Parametern und soll minimiert werden. Dazu wird die Methode der kleinsten Quadrate angewendet, wobei die Ableitungen von S nach den Parametern gebildet und Null gesetzt wird, sodass das Minimum gefunden werden kann. Dieser Prozess kann für lineare, als auch für nichtlineare Gleichungen durchgeführt werden und wird mittels numerischen Werkzeugen (nichtlinearer Solver) gelöst. Der Erfolg der Regressionsanalyse und die Aussagekraft der Parameter sind vom Modell und den Messdaten abhängig. Eine grosse Variation der Messgrössen (z.B. unterschiedliche Temperaturen und Drücke) verbessert die Aussagekraft der Resultate der Regressionsanalyse. Dabei kann festgestellt werden, ob das Modell von den einzelnen Messgrössen stark oder nur Schwach abhängig ist. Es sollen nicht zu viele Parameter verwendet werden, da sonst die Aussagekraft der einzelnen Parameter abnimmt und Vorhersagen mit anderen Messgrössen unsicher werden. Sodass der Solver konvergiert, müssen Näherungswerte für die Parameter angegeben werden, welche iterativ vom Solver angepasst werden. Diese werden aufgrund der physikalischen Hintergründe der Modellgleichung oder früheren Regressionsanalysen festgelegt.

Diese Aufgabe wird mit *MATLAB* von *MathWorks* [21] gelöst. Dessen *Statistics and Machine Learning Toolbox* verfügt über die Funktion *fitnlm* (fit nonlinear regression model), welches geeignet ist, um die hier nichtlinearen Zusammenhänge zu approximieren. Dem Solver werden folgende Inputs übergeben:

- Beobachtungen $y = \dot{m}$, welches ein Vektor der Messungen des Referenz-Messgeräts ist
- Eine Matrix X , welche die Beobachtungen, aus denen der Massenstrom berechnet werden soll enthält (Spannungssignale, Temperatur, ...)
- Die symbolische Modellgleichung $f(X, \beta)$, die die Fitparameter enthält
- Näherungswerte der Parameter in Form eines Vektors β_0 mit der Anzahl vorkommenden Parametern in der Modellgleichung

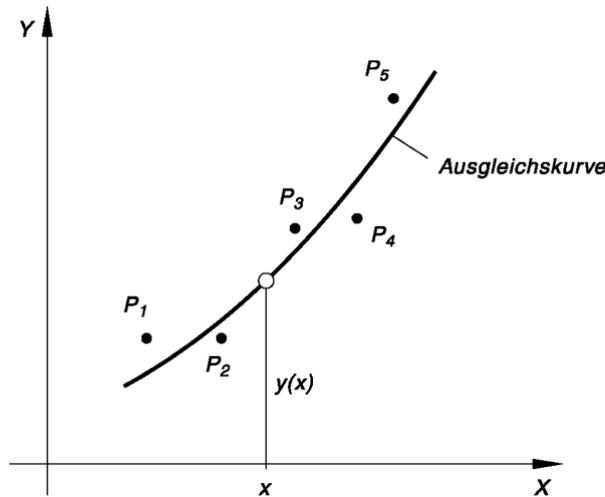


Abbildung 3.20: Exemplarische Abweichungen des Modells von den Messpunkten [20]

3.9 Lösen nichtlinearer Gleichungen mit dem Tangentenverfahren

Beim Venturirohr ist bekannt, dass die Druckflusszahl C_D von der Reynolds-Zahl abhängt, welche wiederum eine Funktion vom Massenstrom ist. Es handelt sich um eine nichtlineare Gleichung, da aufgrund der Charakteristik von C_D die Beziehung für das Venturirohr auf $\dot{m} = f(1/\sqrt{Re}) = f(1/\sqrt{\dot{m}})$ reduziert werden kann⁷. In diesem Fall ist f die gemäss Kapitel 3.8 bestimmte Modellgleichung. Um diese nichtlineare Gleichung nach dem Massenstrom aufzulösen, kann im Messbetrieb die numerische Methode des Newtonschen Tangentenverfahrens genutzt werden. Das Newtonsche Tangentenverfahren bestimmt die Nullstellen einer analytisch gegebenen Funktion. Dabei wird von einem sinnvoll gewählten Näherungswert x_0 iterativ ein besserer Wert für die gesuchte Nullstelle ζ berechnet. Die Iterationsvorschrift lautet:

$$x_n = x_{n-1} - \frac{f(x_{n-1})}{f'(x_{n-1})} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.37)$$

Grob gesagt wird beim Ausgangspunkt $(x_0/f(x_0))$ eine Tangente mit Steigung $f'(x_0)$ an die Kurve gelegt. Der Schnittpunkt dieser Tangente mit der Abszisse ist die neue Näherung x_1 . Mit diesem Wert wird das Vorgehen wiederholt, sodass

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}.$$

Es wird solange iteriert bis die Bedingung

$$|x_n - x_{n-1}| < \epsilon$$

erfüllt wird. Der Wert für ϵ wird gemäss der verlangten Genauigkeit gewählt (z.B. 10^{-8}). Da hier die Nullstelle bestimmt wird, wird die Gleichung des Venturirohrs nach Null umgestellt:

$$0 = \dot{m} - f\left(\frac{1}{\sqrt{\dot{m}}}\right)$$

⁷Zu beachten ist, dass diese Beziehung eine Näherung ist, welche nicht bei tiefen Reynolds-Zahlen und tiefen Massenströmen verwendet werden soll.

3.9 Lösen nichtlinearer Gleichungen mit dem Tangentenverfahren

Die Funktion ist *gutmütig*, in dem Sinne dass sie ausgehend von den Startpunkten im Bereich $2 \dots 10$ g/s schnell gegen ζ konvergiert, nur eine nichttriviale Nullstelle aufweist und man sich um Konvergenz keine Sorgen machen muss.

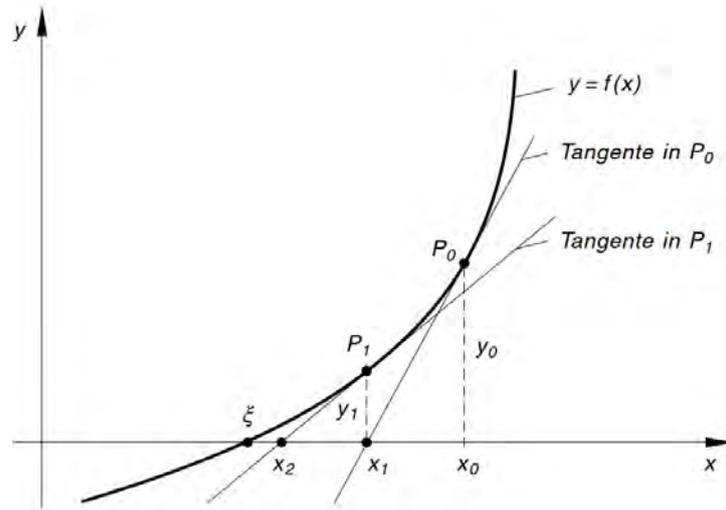


Abbildung 3.21: Exemplarischer Verlauf des Newtonschen Tangentenverfahrens [20]

4 Numerische Simulation

Die beiden Messmethoden Venturirohr und Heissfilmsensor werden in diesem Kapitel simuliert. Nachdem auf das Vorgehen der Simulationen im Allgemeinen eingegangen wird, werden die Simulationen beschrieben, welche unter anderem zur Wahl der Messmethode dienen. Zusätzliche Resultate der Simulationen werden im Anhang A aufgeführt. Es werden keine Optimierungen der Messgeräte im Verlaufe der Simulationen vorgenommen. Die entworfenen Konzepte werden mit dem Stand gemäss Kapitel 2.2 und 2.3 untersucht.

4.1 Planung der CFD-Simulationen

In diesem Abschnitt werden die Strömungssimulationen geplant. Die zu beantwortenden Fragen stellen die Ziele der Simulationen dar. Die Antworten auf diese Fragen erlauben es, die Funktionalität der erarbeiteten Konzepte zu verstehen und deren Eignung für den Einsatz im Mu3e-Experiment zu beurteilen. Vorerst wird das Vorgehen, der *Workflow*, definiert.

4.1.1 CFD-Workflow

Die das Vorgehen der numerischen Strömungsanalyse wird hier in die fünf folgenden Schritte unterteilt.

Schritt 1: Planung

Eine Fragestellung wird formuliert. Benötigte Geometrien und Parameter werden identifiziert. Die zu simulierenden Szenarien werden festgehalten. Mithilfe von Handrechnungen werden die Strömungsbedingungen abgeschätzt und Erwartungen formuliert.

Die quantitativen Erwartungen entsprechen den Berechnungen gemäss Theorie aus Kapitel 3 für den Differenzdruck über dem Venturirohr in Abhängigkeit des Massenstroms, der Temperatur und des Drucks und die Kühlleistung, die der Heissfilmsensor bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Massenströmen erfährt.

Schritt 2: Auswahl der Grundgleichungen und Randbedingungen

Randbedingungen werden festgelegt: Ein- und Austritt, Wände mit Haftbedingung oder Wärmeübertragung und die Fluideigenschaften. Diskrete Werte für die Strömungsparameter werden festgelegt: Temperatur, Druck, Massenstrom und ev. eine Geschwindigkeitsverteilung am Eintritt. Relevante, zu simulierende physikalische Effekte werden ausgewählt: Kompressibilität, Wärmetransport, laminare oder turbulentes Verhalten.

Die hier geplanten Simulationen werden alle stationär und inkompressibel gelöst. Für veränderliche Grössen, wie der Massenstrom zwischen $2 \dots 10 \text{ g/s}$, wird dieser Bereich in diskrete Schritte (2, 4, 5, 6, 8, 10 g/s) unterteilt und für jeden Betriebspunkt individuell gelöst, wobei das dynamische Verhalten beim Ändern des Betriebspunktes nicht simuliert wird.

Schritt 3: Geometrie und Netzgenerierung, auch *Pre-Processing*

CAD-Modelle der Strömungsgebiete werden modelliert. Vorhandene CAD-Modelle werden vereinfacht und bei der Netzgenerierung in Zellen unterteilt (Diskretisierung). Diese Zellen beschreiben

Punkte im Strömungsgebiet, für welche der Strömungszustand berechnet werden sollen. Das verwendete Programm ist ICEM CFD. Mittels eines geeigneten *Pre-Processors* wird das generierte Netz importiert, die physikalischen Modelle gewählt und die zuvor festgelegten Parameter aufgetragen. Die Netze des Venturirohrs und Heissfilms können mit strukturierten Netzen aufgelöst werden. Dabei ist jedes der Volumenelemente ein Hexaeder (quaderähnlicher Block). Die Netze sind in Kapitel 4.2 zum Venturirohr und in Kapitel 4.5 zum Heissfilm abgebildet.

Schritt 4: Berechnen, auch *Processing*

Ein *Solver* löst mittels numerischer Methoden die strömungsmechanischen Gleichungen für jedes Element des Netzes [22]. Der Fortschritt der Berechnung, welche iterativ für das ganze Rechengebiet durchgeführt wird, wird mithilfe von Monitorpunkten überwacht. Als Monitorpunkt wurde z.B. die Änderung der Heizleistung der warmen Fläche des Heissfilms (integraler Wert als Summe aller Elemente dieser Fläche) von Iteration zu Iteration gewählt. Dadurch kann überprüft werden, ob die Simulation zu einer stationären Lösung konvergiert. Die Abbruchkriterien werden z.B. für die Standardabweichung oder den RMS (Root Mean Square oder quadratisches Mittel) des Monitorpunkts festgelegt, sodass die Simulation nach dem Unterschreiten des Grenzwertes beendet wird.

Das hier verwendete Rechenmodell ist RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulations) von Ansys CFX. Dadurch werden turbulente Effekte zwar simuliert, aber nicht direkt dargestellt. Wirbel werden dadurch nicht sichtbar, was für die Fragestellungen hier aber auch nicht benötigt wird. Für turbulente Rohrströmungen wird SST (Shear Stress Transport Turbulenz Modell) als Turbulenzmodell verwendet. Es bietet sich hier an, da es die Vorteile des $k - \omega$ Modells in Wandnähe und die des $k - \epsilon$ Modells in der wandfernen Rohrmitte vereint.

Schritt 5: Datenauswertung, auch *Post-Processing*

Die Resultate werden visualisiert, interpretiert und mit den Erwartungen verglichen (Kapitel 4.2 bis 4.5). Nach dieser Nachbearbeitung sollen die Fragen aus **Schritt 1** beantwortet werden können und ev. neue Erkenntnisse vorhanden sein.

4.1.2 Plan der CFD-Simulationen des Venturirohrs

Das im Kapitel 2.2 beschriebene Konzept der Mengemessung mittels Venturirohr soll untersucht werden.

Zu beantwortende Fragen

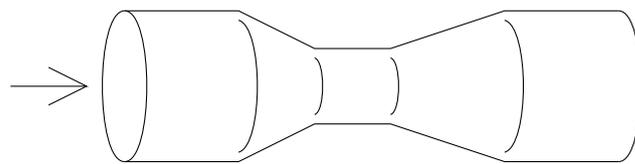
1. Welcher **Differenzdruck** tritt bei den Druckentnahmebohrungen in Abhängigkeit des Massenstromes auf?
2. Wie empfindlich reagieren das Venturirohr und der Wanddruck auf **Rohreinbauten** im Einlaufbereich (zwei windschiefe 90°-Winkel)?
3. Wie stark hängt der **Differenzdruck** von der Temperatur und dem statischen Druck im System ab?

Benötigte Geometrien und Netze

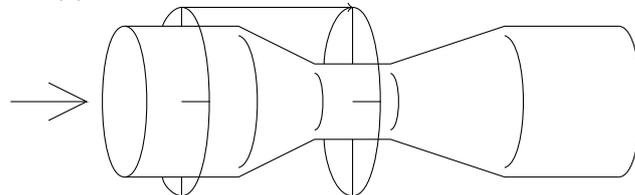
Um die oben gestellten Fragen zu beantworten, soll folgende Geometrie des Venturirohrs vernetzt werden (siehe Abbildung 4.1).

- (a) Venturirohr ohne Druckentnahmebohrungen (Abbildung 4.1a)
- (b) Venturirohr mit vier Druckentnahmebohrungen pro Ebene am Umfang verteilt (Abbildung 4.1b)

Auf die Simulation des Venturirohrs mit Druckentnahmebohrungen aus Abbildungen 4.1b wurde verzichtet, da die Simulation ohne Druckentnahmebohrungen an den vier Punkten am Umfang einen geringen Druckunterschied bei einer verwinkelten Einlaufstrecke aufwies (siehe Kapitel 4.3, Abbildung 4.16). Als vereinfachende Annahme wurde als Differenzdruck die Differenz der Mittelwerte vier simulierten Druckentnahmepunkte in den zwei Ebenen berechnet. Die Modellierung des Bypasses ist nicht essenziell, um die Funktionalität des Venturirohrs mit einem β -Ratio ausserhalb der Norm nachzuweisen. Der spätere Aufwand kann dennoch durch die Simulationen reduziert werden, z.B. durch verwinkelte Einlaufstrecken, die nicht aufgebaut werden müssen.



(a) Venturirohr ohne Druckabnahmebohrungen



(b) Venturirohr mit Druckabnahmebohrungen und Bypass

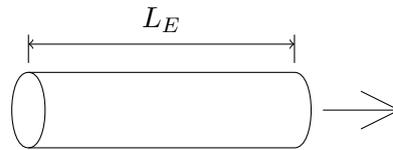
Abbildung 4.1: Geometrien des Venturirohrs zur Simulation

Benötigte Einlaufstrecken

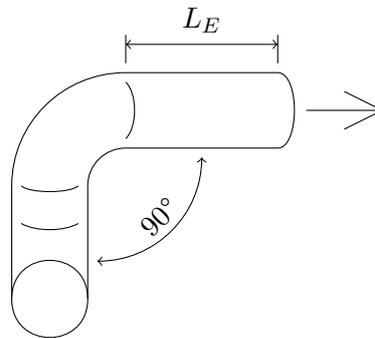
Folgende Einlaufstrecken sollen unterschiedliche Strömungsprofile am Eintritt des Venturirohrs verursachen (siehe Abbildung 4.2).

- (a) Gerade Einlaufstrecke mit variabler Länge (Abbildung 4.2a)
- (b) Einlaufstrecke mit variabler Länge und zwei um 90° versetzte 90° -Winkel (Abbildung 4.2b)

Die Simulation der Einlaufstrecken wird getrennt vom Venturirohr (und vom Heissfilm) durchgeführt. Das resultierende Geschwindigkeitsprofil am Austritt wird als Randbedingung der Simulation des Messgeräts aufgetragen.



(a) gerader Einlauf



(b) Einlauf mit Winkeln

Abbildung 4.2: Benötigte Geometrien des Einlaufs

Variable Parameter

Gemäss den Fragen werden folgende Parameter als variabel definiert.

- Massenstrom \dot{m}
- Statischer Druck p
- Temperatur am Eintritt T
- Einlaufgeometrie
 - gerade
 - mit Winkeln
- Einlauflänge L_E (nur bei Einlauf mit Winkeln)

4.1.3 Plan der CFD-Simulationen des Heissfilmsensors

Das im Kapitel 2.3 beschriebene Konzept der Mengenmessung mittels Heissfilmsensor soll untersucht werden. Das Vorgehen entspricht dem Kapitel 4.1.2.

Zu beantwortende Fragen

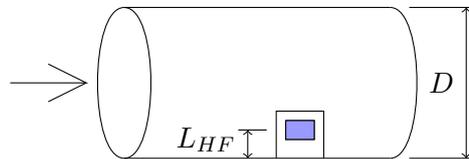
1. Welche **Kühlleistung** tritt am Heissfilm in Abhängigkeit des Massenstromes oder der Strömungsgeschwindigkeit auf?

2. Hängt die **Kühlleistung** von der Temperatur und dem statischen Druck im Strömungsgebiet ab?
3. Wie empfindlich reagiert der Heissfilmsensor auf **Rohreinbauten** im Einlaufbereich (zwei windschiefe 90° -Winkel)?

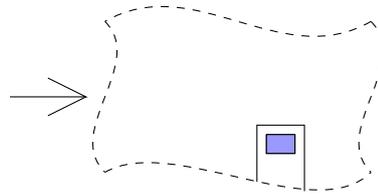
Benötigte Geometrien und Netze

Um die oben gestellten Fragen zu beantworten, sollen folgende Geometrien des Heissfilmsensors vernetzt werden (siehe Abbildung 4.3).

- (a) Eingebauter Heissfilm mit Rohrdurchmesser D und Einstecktiefe L_{HF} (Abbildung 4.3a)
- (b) Heissfilm in freiem Strömungsfeld (Abbildung 4.3b)



(a) Eingebauter Heissfilmsensor



(b) Heissfilmsensor im freien Strömungsfeld

Abbildung 4.3: Benötigte Geometrien des Heissfilmsensors

Benötigte Einlaufstrecken

Um vergleichbare Resultate zu erhalten, werden dieselben Einlaufgeometrien wie für das Venturirohr verwendet (siehe Abbildung 4.2), welche auf den grösseren Durchmesser $D = 100 \text{ mm}$ skaliert werden. Der Massenstrom wird jedoch nicht skaliert, sondern entspricht denselben Werten wie beim Venturirohr.

Variable Parameter

Gemäss den Fragen werden folgende Parameter als variabel definiert.

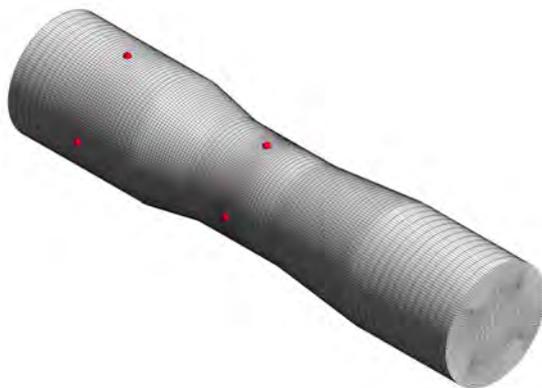
- Massenstrom \dot{m} oder Geschwindigkeit w
- Statischer Druck p

- Temperatur am Eintritt T
- Einlaufgeometrie
 - gerade
 - mit Winkeln
- Einlauflänge L_E (nur bei Einlauf mit Winkeln)

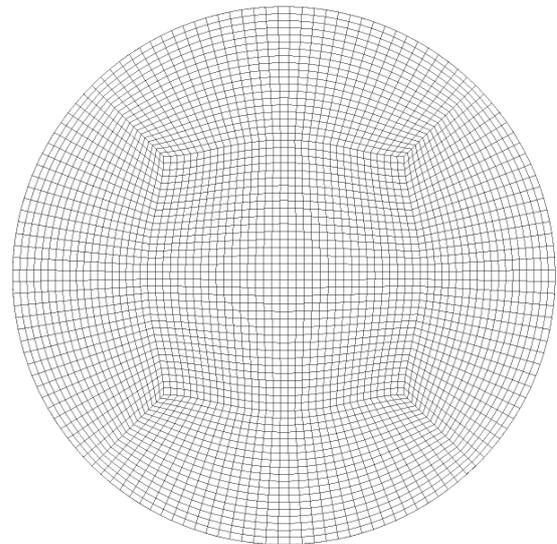
Für die Untersuchung mit unterschiedlichen Einlauflängen wird auf die Simulation des Heissfilmsensors verzichtet. Dabei wird die lokale Geschwindigkeit untersucht, welcher der Heissfilmsensor ausgesetzt würde. So kann das Strömungsgebiet gröber aufgelöst werden und die Simulation wird deutlich vereinfacht.

4.2 Simulation des Venturirohrs mit gerader Einlaufstrecke

Das Venturirohr wird strukturiert vernetzt unter der Verwendung von sogenannten *Ogrids*, wodurch die Wölbung des Rohrs besser vernetzt werden kann (Abbildung 4.4b). Die Geometrie ist rotationssymmetrisch und vollständig mit Hexaedern (quaderähnliche Volumenelemente) aufgelöst. Die Radien der Übergänge zum Diffusor und Konfusor werden entfernt. Die Druckentnahmebohrungen werden nicht simuliert. Stattdessen wird der lokale Druck bei den Knoten (rote Punkte in Abbildung 4.4a) ausgelesen und der Differenzdruck berechnet.



(a) Vernetzung des Venturirohrs, rote Punkte anstelle der Druckbohrungen



(b) Querschnitt des Netzes

Abbildung 4.4: Geometrie und Vernetzung des Venturirohrs

4.2.1 Simulations-Einstellungen des Venturirohrs

Dieses Kapitel ist ev. besser im Kapitel Simulation des Venturirohrs mit gerader Einlaufstrecke.

Inkompressibel Siehe Kapitel 4.1.1, Schritt 2.

Stationär	Siehe Kapitel 4.1.1, Schritt 2.
Wärmeübertragung	Konvektion und Wärmeleitung werden vernachlässigt.
Schwerkraft	Gravitation wird keine vorgegeben. Natürliche Konvektion wird vernachlässigt.
Eintritt	Eine Geschwindigkeitsverteilung wird gemäss dem Resultat der Simulation der Einlaufstrecke aufgetragen. Es wird die Temperatur T_{He} und Druck p und somit die Dichte ρ und Viskosität μ gemäss Tabelle 3.1 für das ganze Strömungsfeld vorgegeben. Die Bedingungen werden für Simulationen mit anderer Temperatur oder anderem Druck angepasst.
Austritt	Am Austritt herrscht ein relativer Druck von $0 Pa$.
Wände	Für alle Wände wird eine Haftbedingung (no slip condition) aufgetragen. Die Wände sind glatt und adiabat.
Turbulenz	SST wird für alle Simulationen verwendet, aufgrund der erwarteten Reynolds-Zahlen ($Re_{VT} > 4000$ gemäss Tabelle 3.1).

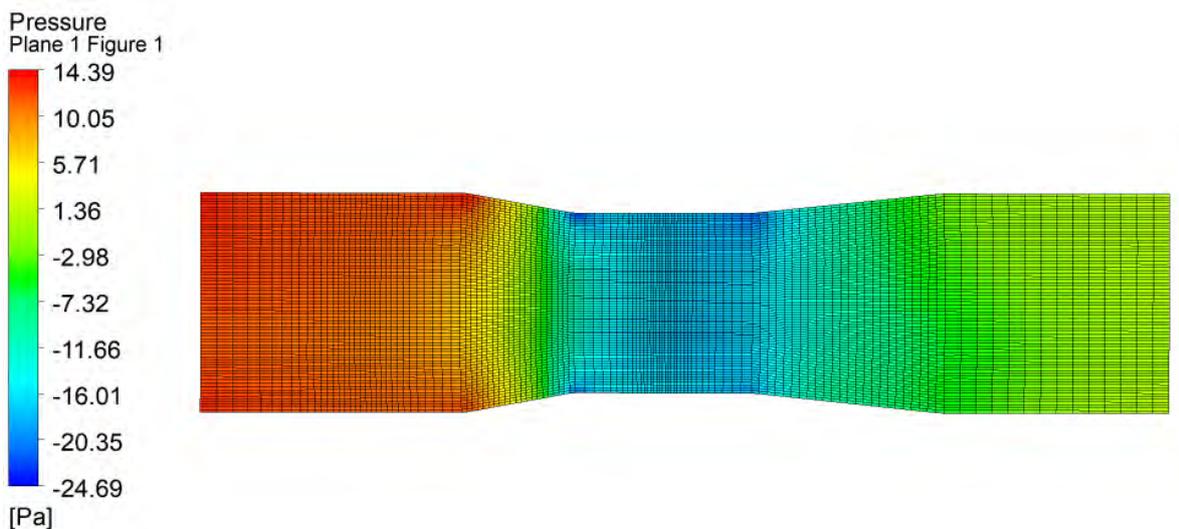


Abbildung 4.5: Druckverlauf im Venturiorohr bei $\dot{m} = 2 g/s$

4.2.2 Simulationsresultate des Venturiorohrs mit gerader Einlaufstrecke

Abbildung 4.5 zeigt den Druckverlauf durch das Venturiorohr. Abbildung 4.6 zeigt, dass der Wanddruck am Eintritt des Venturiorohrs mit zunehmendem Massenstrom zunimmt. Dieser Wert entspricht dem Druckverlust durch das Venturiorohr bei dem simulierten Massenstrom. Der Druckverlust der gesamten Messstrecke berechnet sich aus diesem Wert und dem Druckverlust in der Ein- und Auslaufstrecke gemäss Gleichung 3.7.

$$\Delta p_V = \Delta p_{V,VT} + \Delta p_{V,E} + \Delta p_{V,A}$$

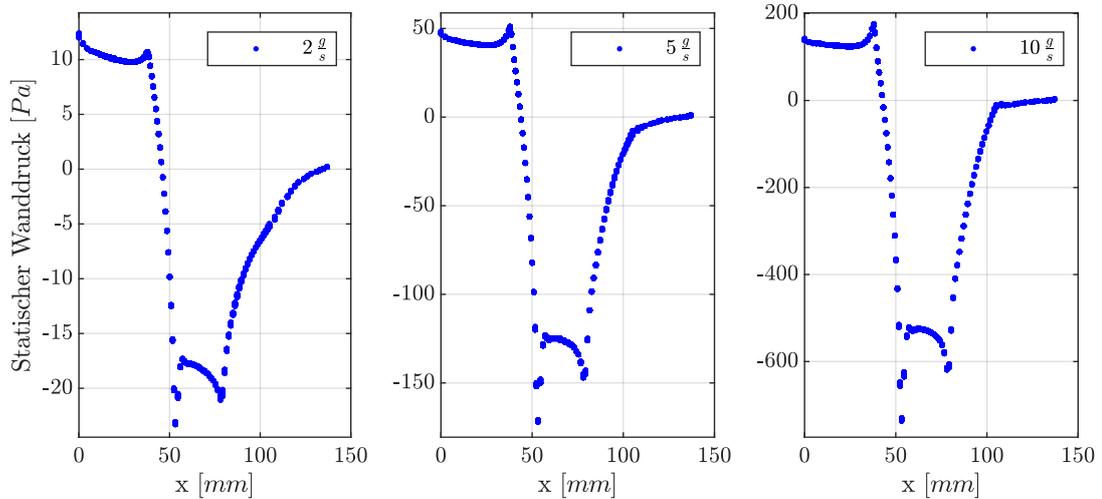


Abbildung 4.6: Wanddruck im Venturirohr mit geradem Einlauf

Für 5 g/s beträgt dieser Wert

$$\Delta p_V = \Delta p_{V,T} + \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{L_E + L_A}{D} = 146 \text{ Pa.}$$

Für λ wird die Rohrreibungszahl

$$\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}}$$

gemäss der Beziehung 3.6 nach Blasius eingesetzt. Der Druckverlust für das Venturirohr inklusive Ein- und Auslaufstrecke von $20D + 5D$ verursacht einen Druckverlust gemäss Abbildung 4.7. Als Eckpunkte werden $\Delta p_V(5 \text{ g/s}) \approx 150 \text{ Pa}$ und $\Delta p_V(7 \text{ g/s}) \approx 260 \text{ Pa}$ Druckverlust notiert. Dies gilt für die Bedingungen der Simulation mit reinem Helium bei 20°C und 1 bara .

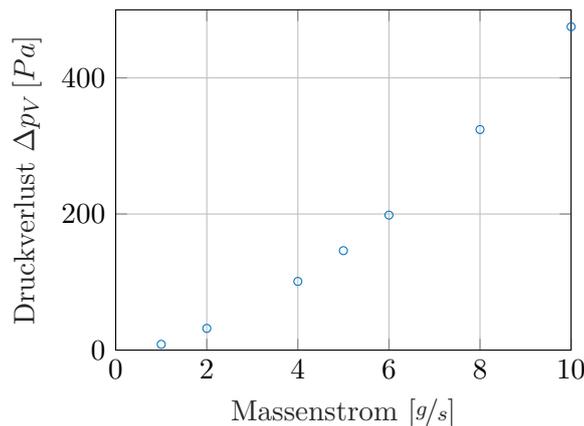


Abbildung 4.7: Wanddruck im Venturirohr mit geradem Einlauf

Abbildung 4.6 zeigt ebenfalls den Differenzdruck zwischen den Druckentnahmestellen bei $x = 27 \text{ mm}$ und $x = 67 \text{ mm}$, der mit zunehmendem Massenstrom steigt. Dieser Differenzdruck steigt gemäss Abbildung 4.8 mit dem Massenstrom.

4.2.3 Verifizierung und Durchflusszahl des simulierten Venturirohrs

Der Differenzdruck des simulierten Venturirohrs wird zur Überprüfung der Simulation mit der Handrechnung gemäss Kapitel 3.3 verglichen. Dabei wird die Handrechnung für die Bedingungen der Simulation durchgeführt und in Abbildung 4.8 dargestellt.

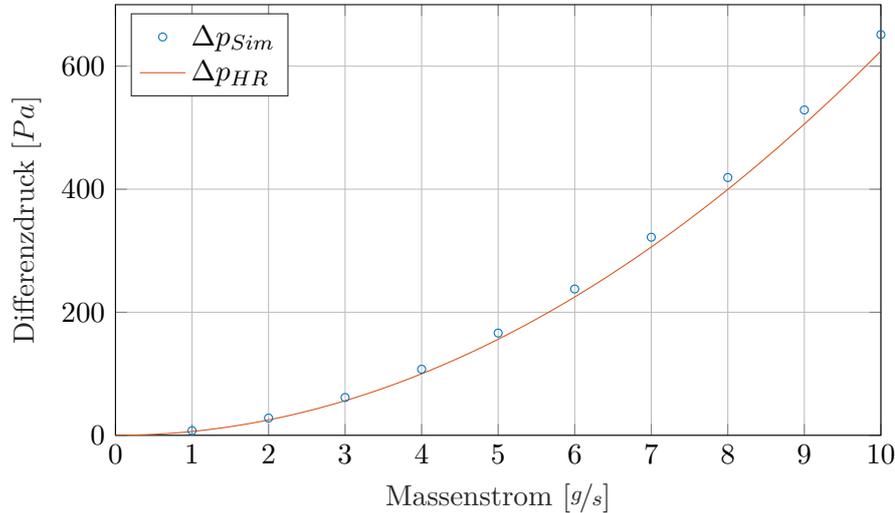


Abbildung 4.8: Vergleich des Resultate der Simulation und der Handrechnung

Offensichtlich steigt der Differenzdruck in der Simulation schneller mit dem Differenzdruck als die Handrechnung. Dies kann auf die Haftbedingung zurückgeführt werden, die in der Handrechnung nicht berücksichtigt wird. Dies bedeutet, dass ein Bruchteil des Differenzdruck nicht durch die Beschleunigung, sondern auch durch Reibung erzeugten Druckverlust entsteht. Die Differenz kann durch die Durchflusszahl C_D charakterisiert werden. Die Durchflusszahl für das modellierte Venturirohr wird mithilfe der Simulationsdaten berechnet.

$$C_D = \sqrt{\frac{\Delta p_{HR}}{\Delta p_{Sim}}}$$

Für Δp_{HR} kann der Wert eingesetzt werden, der mittels Gleichung 3.19 berechnet wurde. Der Trend der Durchflusszahl für Venturirohre wird für turbulente Strömungen oft in folgender Form beschrieben [18]. Dabei strebt die Durchflusszahl mit zunehmendem Massenstrom gegen die Konstante a , die nahe bei 1 liegt für Venturirohre.

$$a - b \cdot \sqrt{\frac{1}{Re}}$$

Für gedrehte Venturirohre mit hoher Oberflächengüte strebt C_D schneller gegen 1. Das Durchmesser-Verhältnis β hat dabei einen Einfluss auf den Faktor b . Als geeigneter Fit werden im Modell für a und b eine folgende Werte eingesetzt.

$$C_D = 1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{Re}} \quad (4.1)$$

Dabei kann dieses Modell nicht ausserhalb dieses Reynoldszahl-Bereichs verwendet werden, da die Durchflusszahl bei grossen Massenströmen grösser als 1 werden könnte. Zudem ist die Annäherung mittels dieser Form für kleine Reynoldszahlen weniger realitätsnahe als bei hohen [23].

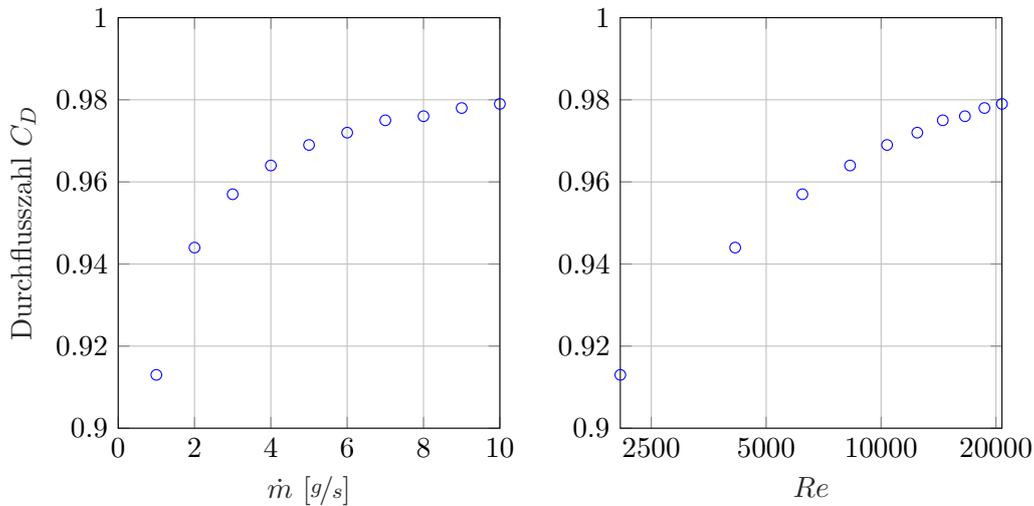


Abbildung 4.9: Berechnete Durchflusszahl in Abhängigkeit des Massenstroms

Allgemein sind die Simulationsergebnisse sinnvoll, da sie dem parabelförmigen Trend folgen und sich nur um einen kleinen Faktor unterscheiden. Zusätzlich ist die Durchflusszahl schon in anderen Arbeiten für ähnliche Bereiche der Reynolds-Zahl numerisch und in Versuchen untersucht worden. Abbildung 4.10 zeigt die Ergebnisse einer Untersuchung an der *Utah State University* mit einem Venturirohr, die einen qualitativ und quantitativ ähnlichen Verlauf der Durchflusszahl zeigt, wie die Ergebnisse in Abbildung 4.1 rechts.

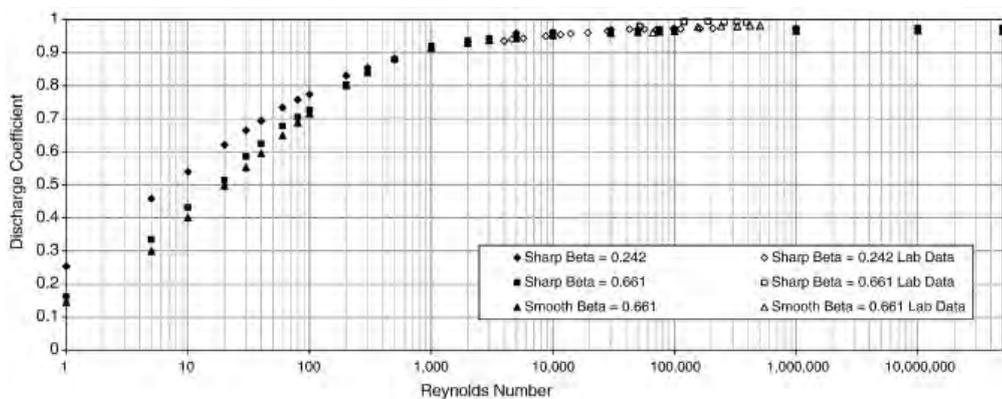


Abbildung 4.10: Verlauf der Durchflusszahl für ein Venturirohr in Abhängigkeit der Reynoldszahl [24]

4.2.4 Validierung der Durchflusszahl

Um die Simulation des Venturirohrs und die daraus ermittelte Durchflusszahl für dieses spezifische Venturirohr zu validieren wird die Berechnung gemäss Bernoulli für die realen Bedingungen im Versuchsaufbau wiederholt. Die Simulation wurde unter anderen Bedingungen und mit reinem Helium durchgeführt, wodurch sie nicht direkt mit den Messresultaten vergleichbar ist. Die Messresultate

werden in Kapitel 6.5 untersucht. Die hier verwendeten Messresultate zur Validierung stammen von einem Differenzdrucksensor, bestehend aus zwei einzelnen Absolutdrucksensoren, der nicht für die Mengemessung eingesetzt wird, sondern zu Vergleichszwecken parallel zum Differenzdrucksensor des Venturirohrs eingebaut wurde und um die statischen Drücke vor und im Venturirohr zu messen. Um eine Brücke zwischen der Simulation und den Versuchen zu bauen, wird die Durchflusszahl C_D gemäss Gleichung 4.1 aus dem vorherigen Kapitel 4.2.3 eingesetzt, um vom theoretischen Differenzdruck auf den effektiven Differenzdruck zu kommen. Der theoretische Differenzdruck Δp_{HR} wird mit der effektiven Dichte und Massenstrom im Versuch berechnet, durch C_D^2 geteilt und mit dem gemessenen Differenzdruck Δp_m in Abbildung 4.11 verglichen.

$$\Delta p = \Delta p_{HR}(\dot{m}_m, T_m, p_m) \cdot C_D^{-2}(\dot{m}_m, T_m)$$

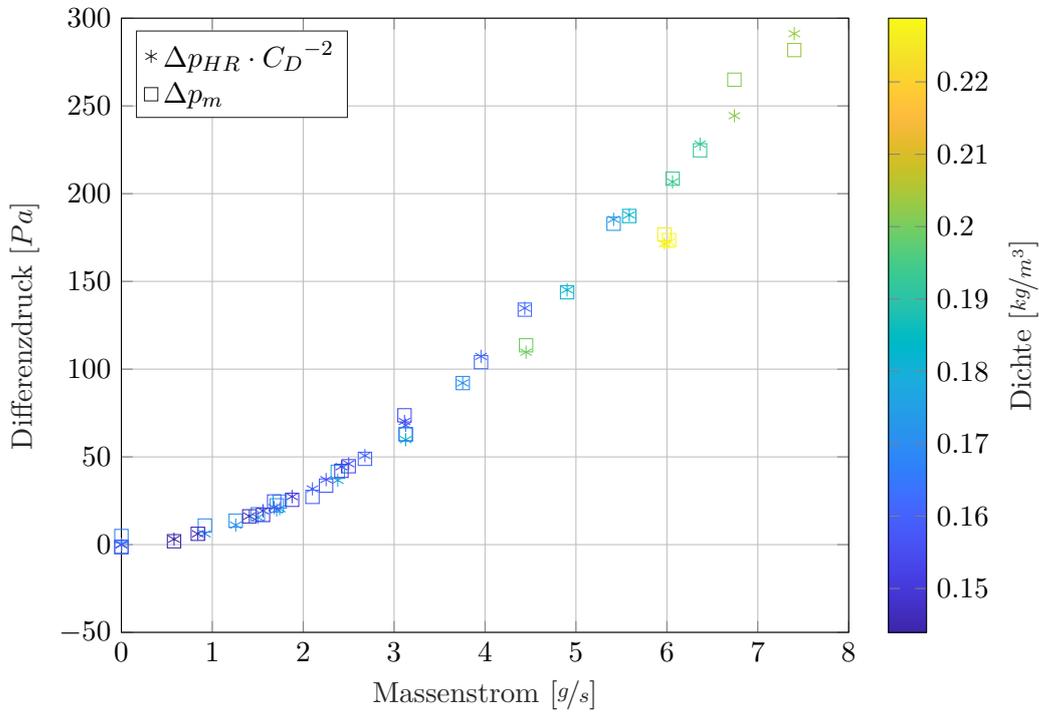


Abbildung 4.11: Vergleich der Differenzdrücke aus Versuchen und der Handrechnung mit der ermittelten Durchflusszahl

Der verwendete Differenzdrucksensor wird hier in einem Bereich eingesetzt, in dem die Unsicherheit gross wird. Grund dafür ist, dass die zwei Absolutdrucksensoren bis 3 bara messen können und jeder dieser Werte entsprechend unsicher ist. Nun wird, um der Differenzdruck zu bilden die Differenz dieser Messungen gebildet, was dazu führt, dass die Unsicherheiten geometrisch addiert werden. Wenn nun die Differenz im Vergleich mit 3 bara klein ist, wird die relative Unsicherheit sehr gross.

$$u_{\Delta p} = \sqrt{u_{p_1}^2 + u_{p_2}^2}$$

Für die Messunsicherheit $\leq 0.05\%$ der Absolutdrucksensoren ergibt sich folgende Unsicherheit [25].

$$u_{\Delta p_m} = \sqrt{2 \cdot (300'000\text{ Pa} \cdot 0.05\%)^2} = 150\text{ Pa}$$

Da die Messung Δp_m stark unsicher ist, ist diese Validierung mit Vorsicht zu geniessen. Die relative Abweichung der Handrechnung von der Messung in Abbildung 4.12 bestätigt, dass die Differenzdruckmessung sehr unsicher ist bei kleinen Werten. Sie zeigt auch, wie die Abbildung 4.11, dass die Handrechnung unter Verwendung der Durchflusszahl gemäss Simulation mit einem Fehler von $\pm 10 \dots 20\%$ auf die Messwerte zutrifft. Es kann somit angenommen werden, dass bei der Modellierung des Venturirohrs kein grober Fehler begangen wurde und die Durchflusszahl eine annehmbare Annäherung für die Kalibrierung ist. Frage 1 des Venturirohrs lässt sich damit beantworten.

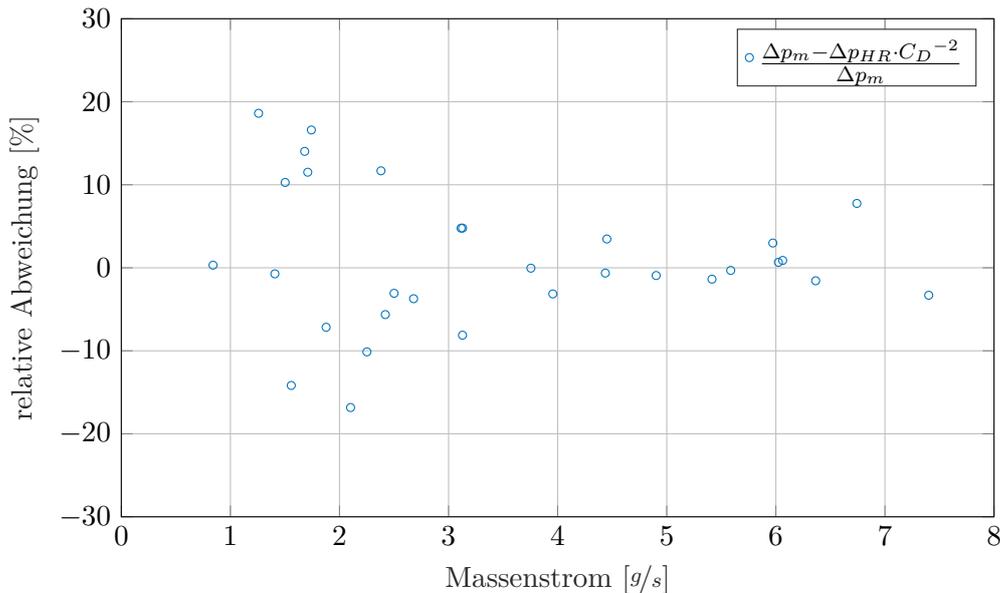


Abbildung 4.12: Abweichung der Handrechnung mit der ermittelten Durchflusszahl von den Messungen

4.2.5 Simulationsresultate des Venturirohrs mit Temperatur- und Druckvariation

Abbildung 4.13 zeigt, dass der Differenzdruck, der bei höherer und tieferer Temperatur aufgrund der variierenden Dichte den Erwartungen gemäss Handrechnung entspricht. Der zu erwartende Differenzdruck der Handrechnung entspricht

$$\Delta p = \Delta p_{HR} \cdot C_D^{-2}.$$

Abbildung 4.14 zeigt, dass der Differenzdruck, der bei höherem und tieferem Druck aufgrund der variierenden Dichte den Erwartungen gemäss Handrechnung entspricht. Frage 3 ist somit beantwortet.

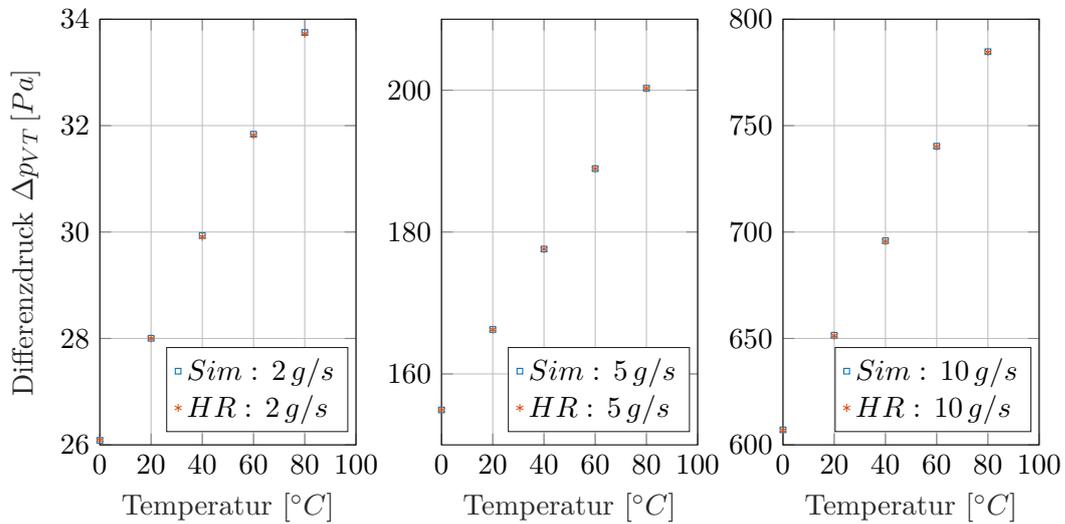


Abbildung 4.13: Differenzdruck in Abhängigkeit der Temperatur

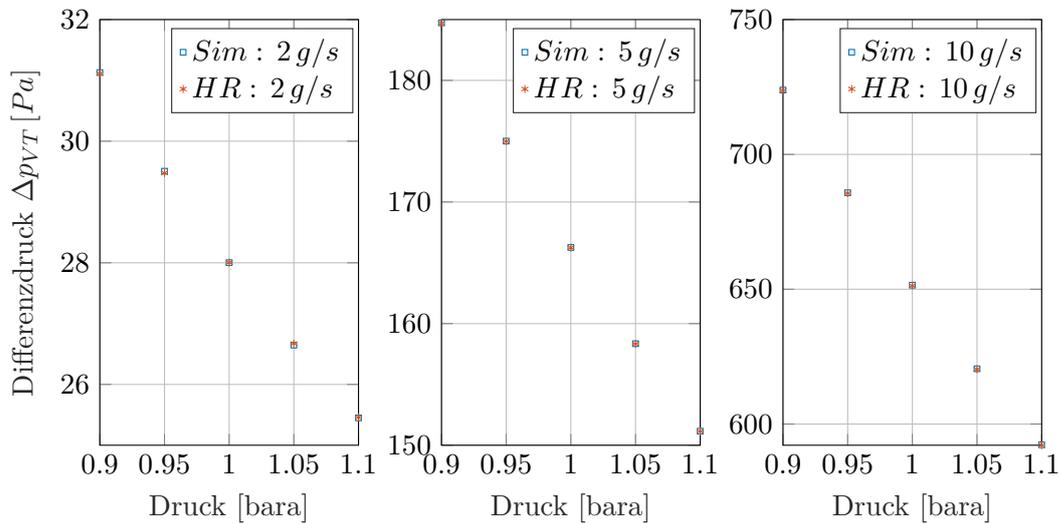


Abbildung 4.14: Differenzdruck in Abhängigkeit des Drucks

4.3 Simulation des Venturirohrs mit verwinkelter Einlaufstrecke

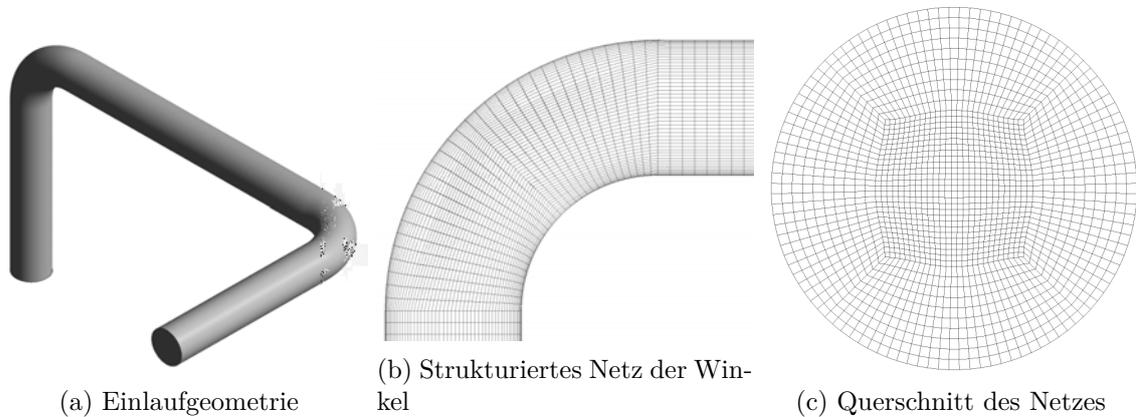


Abbildung 4.15: Geometrie und Vernetzung der verwinkelten Einlaufstrecke

Die Einlaufstrecke wird mit einem strukturierten Netz aufgelöst (Abbildung 4.15). Es wird ein möglichst ungünstiger Fall von Rohreinbauten gewählt, um den auftretenden Fehler des simulierten Venturirohrs zu ermitteln. Die mittleren Radien der Winkel sind $1.5 \cdot D$. Die geraden Einlauf- und Auslaufstrecke messen $5D$. Zwischen den Winkeln ist eine gerade Strecke mit Länge $8D$. Die Winkel sind um 90° versetzt. Dadurch entstehen Sekundärströmungen, die eine lange Beruhigungsstrecke zum Abklingen benötigen [26]. Dieselbe Geometrie wird auf $D = 100\text{mm}$ skaliert für die Simulation der verwinkelten Einlaufstrecke des Heissfilmsensors.

4.3.1 Simulationsresultate des Venturirohrs mit verwinkelter Einlaufstrecke

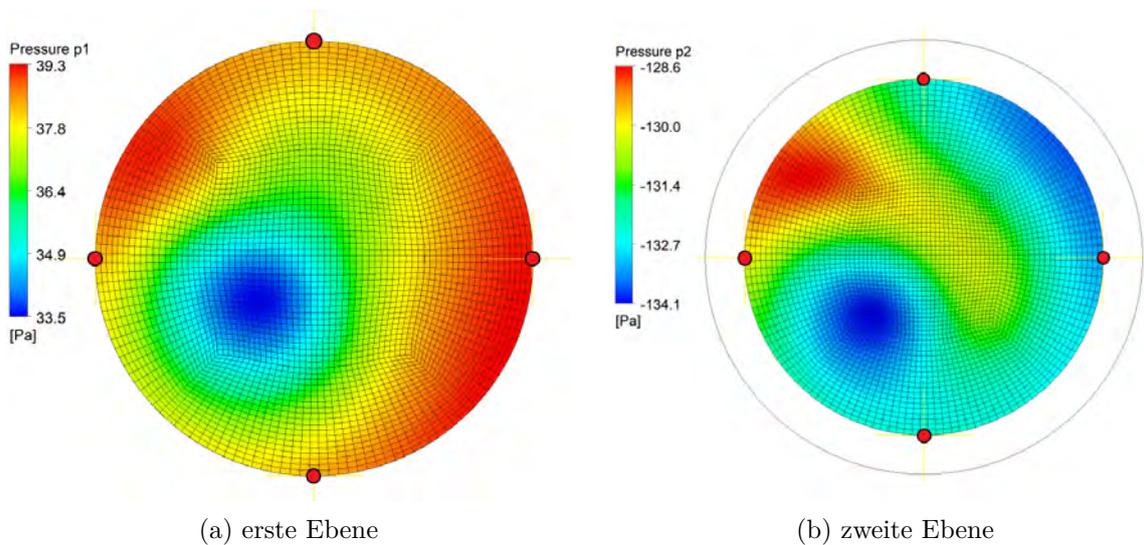


Abbildung 4.16: Druckverteilung in den zwei Ebenen des Venturirohrs bei verwinkeltem Einlauf und 5 g/s und $L_E = 10D$

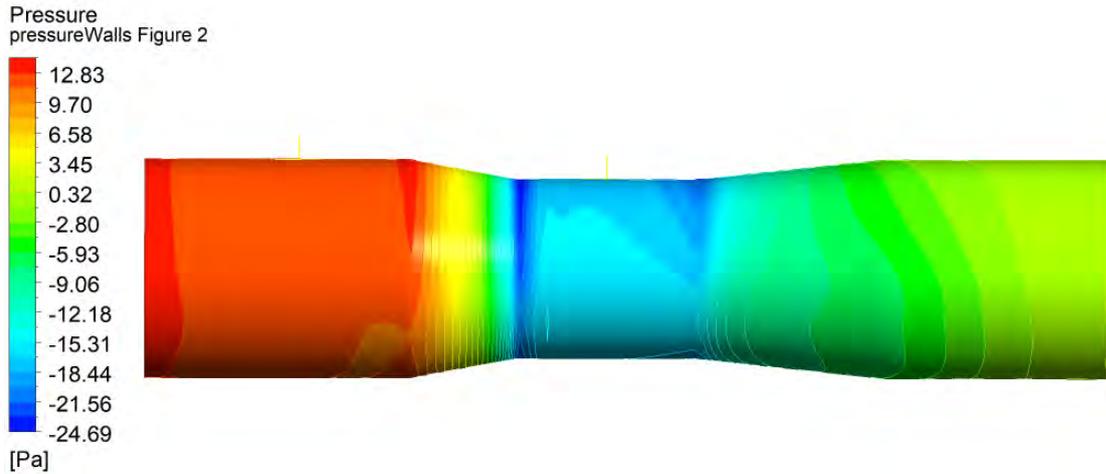


Abbildung 4.17: Wanddruck im Venturirohr bei $\dot{m} = 2 \text{ g/s}$, verwinkelter Einlaufstrecke und $L_E = 10D$

Die Resultate der Simulation zeigen eine ungleiche Druckverteilung in den Ebenen der Druckentnahme im Venturirohr. Abbildung 4.16 zeigt, dass die grösste Differenz innerhalb einer Ebene ca. 6 Pa bei 5 g/s erreicht. Abbildung 4.18 zeigt im Vergleich mit Abbildung 4.6, dass der Wanddruck nun eine Streuung aufweist. Somit kommt es zu kleinen Unterschieden, je nach Anordnung der Druckentnahmebohrungen. Es ist daher essenziell, dass mehrere Druckentnahmebohrungen am Umfang angebracht werden, um eine Mittelung dieser unterschiedlichen Drücke zu erreichen. Die Simulation zeigt zusätzlich, dass die Mittelung dieser vier Drücke nicht vollständig ausreicht, um den Fehler zu eliminieren. Der simulierte Differenzdruck weicht bei Winkeln im Einlauf von den Simulationsergebnissen mit geradem Einlauf ab (Abbildung 4.19).

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\Delta p_{gerade} - \Delta p_{verwinkelt}}{\Delta p_{gerade}}$$

Dabei wird der Differenzdruck zwischen den arithmetischen Mittelwerten der vier Druckentnahmebohrungen berechnet.

$$\Delta p = \left(\frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 p_{1,i} \right) - \left(\frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 p_{2,i} \right) = \bar{p}_1 - \bar{p}_2$$

Der relative Fehler, der bei einer Einlaufstrecke mit $20D$ begangen wird, ist vermutlich unter 2% . Der Fehler bei einer Einlaufstrecke von $10D$ kann bis zu 3% betragen. Ein klarer Trend ist in diesen Datenpunkten nicht erkennbar und grössere Fehler können nicht ausgeschlossen werden. Frage 2 des Venturirohrs ist somit beantwortet. Durch die Anordnung zweier windschiefer Winkel entstehen Sekundärströmungen. Diese sind in der Untersuchung der verwinkelten Einlaufstrecke des Heissfilmsensors in Abbildung 4.28 ebenfalls erkennbar. Abbildungen der Geschwindigkeitsverteilung im und nach dem verwinkelten Einlauf sind im Anhang A ersichtlich.

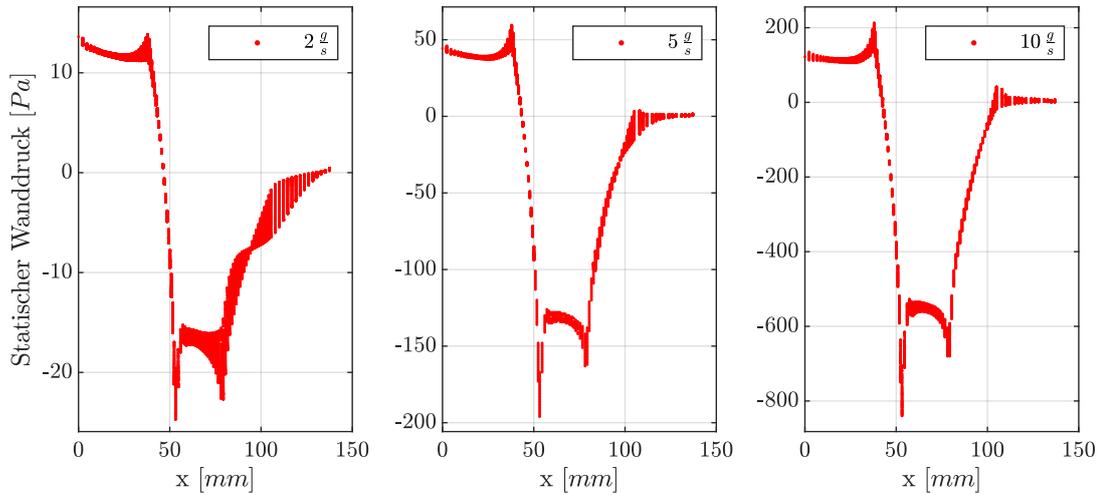


Abbildung 4.18: Wanddruck im Venturirohr mit verwinkelter Einlaufstrecke und $L_E = 10D$

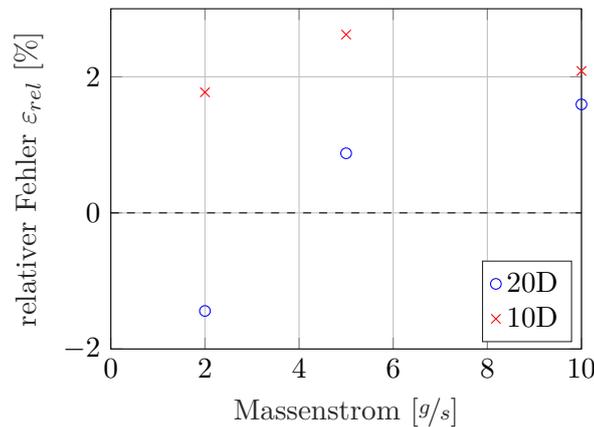


Abbildung 4.19: Abweichung der Differenzdrücke bei zwei windschiefen Winkeln im Einlauf

4.4 Simulation des Heissfilmsensors im freien Strömungsfeld

Der Heissfilmsensor wird in einem quaderförmigen Strömungsgebiet modelliert. Dabei werden sämtliche Einflüsse von Rohrwänden ausser Acht gelassen. Das Ziel der Simulation ist, dass der Einfluss der lokalen Geschwindigkeit auf den Sensor simuliert werden kann. Der Heissfilmsensor wird vereinfacht modelliert, indem die beheizte Fläche als Rechteck definiert wird, wie bei der analytischen Berechnung in Kapitel 3.2. Die Wärmeleistung ist somit nicht direkt vergleichbar mit der effektiven Wärmeleistung des Heissfilms. Die Auflösung wird an den Rändern des Heissfilms erhöht, sodass die Gebiete, wo viel Wärme übertragen wird aufgrund der grösseren Temperaturdifferenzen, ausreichend fein aufgelöst sind. In Abbildung 4.20 ist der Heissfilmsensor bei der entsprechenden lokalen Geschwindigkeit von $4 m/s$ bei einem Massenstrom von $5 g/s$ abgebildet. Dargestellt wird der dimensionslose Wandabstand y^+ , welcher ein Mass für die Auflösung der Zellen in Wandnähe in Zusammenhang mit den Strömungsbedingungen ist. Eine Netzstudie wurde nicht durchgeführt. Aufgrund der generell tiefen y^+ -Werte wurde auf ein Wandmodell verzichtet.

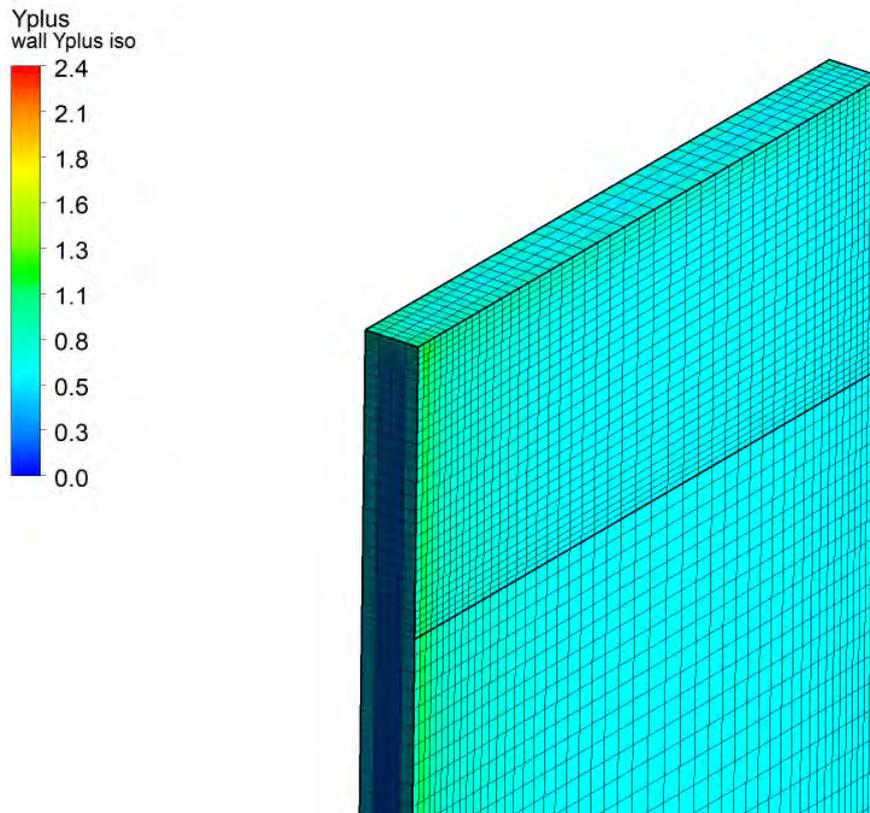


Abbildung 4.20: Yplus des Heissfilms

4.4.1 Simulationseinstellungen des Heissfilmsensors im freien Strömungsfeld

Inkompressibel	Siehe Kapitel 4.1.1, Schritt 2.
Stationär	Siehe Kapitel 4.1.1, Schritt 2.
Wärmeübertragung	Konvektive Wärmeübertragung ist aktiviert.
Schwerkraft	Gravitation wird keine vorgegeben. Natürliche Konvektion wird vernachlässigt.
Eintritt	Eine gleichförmige Geschwindigkeit wird parallel zum Sensor auf der Eintrittsfläche aufgetragen. Die Geschwindigkeit entspricht der zu erwartenden Geschwindigkeit bei vorgegebenen Massenstrom an der Position des Heissfilms gemäss den Überlegungen zur lokalen Geschwindigkeit bei ausgebildeter Rohrströmung in Kapitel 3.1.3 ($L_{HF} = 15.3 \text{ mm}$ und $\frac{w}{1.0377} = w_{lok}$). Temperatur $T_{He} = 20^\circ\text{C}$ und Druck $p = 1 \text{ bar}$ werden vorgegeben bei der Variation des Massenstroms. Bei der Variation von Temperatur oder Druck wird der Massenstrom beibehalten.
Austritt	Am Austritt herrscht ein relativer Druck von 0 Pa .

Wände

Für die Begrenzung des Strömungsgebiets gilt keine Haftbedingung (free slip). Für den Heissfilm und die Halterung gilt eine Haftbedingung (no slip condition). Die Wände sind glatt und adiabat mit Ausnahme des Heissfilms, welcher eine erhöhte Temperatur hat ($\Delta T = 15\text{ K} \rightarrow T_{HF} = 35^\circ\text{C}$). Bei der Variation der Temperatur des Gases am Eintritt wird die Temperatur des Heissfilms entsprechend angepasst, dass ΔT gemäss CTA konstant bleibt.

Turbulenz

SST wird für alle Simulationen verwendet.

4.4.2 Simulationsresultate des Heissfilmsensors im freien Strömungsfeld

Es wird die Wärmeleistung des Heissfilms als Flächenintegral der Wärmestromdichte über den Heissfilm berechnet (siehe Abbildung 4.23). Die berechnete Wärmeübertragung wird in Abbildung 4.21 dargestellt. Auffällig ist vor allem, eine grosse Verschiebung zur Handrechnung. Als möglicher Grund dafür ist, dass die Nusselt-Korrelation für eine ebene Platte für grosse, breite Platten und nicht für schmale Streifen geeignet ist. So ist der Randeinfluss, welcher in der Handrechnung nicht berücksichtigt wird, ziemlich gross. In Abbildung 4.23 ist ersichtlich, dass die Wärmestromdichte am oberen, unteren und hinteren Rand des Heissfilms grösser ist als in der Mitte. Am oberen und unteren Rand kann Wärme an das Fluid ober und unterhalb des Heissfilms abgegeben werden, auch wenn es nicht genau über der beheizten Fläche durchströmt. Das ist in Abbildung 4.24 ersichtlich an der erhöhten Temperatur des Heliums ober- und unterhalb des Heissfilms. Am hinteren Rand kann kälteres Fluid von der Rückseite des Heissfilms ebenfalls aufgewärmt werden. Die Randzonen des Heissfilms machen also einen grossen Anteil der gesamten Fläche aus. Dadurch ist zu erklären, warum die simulierte Heizleistung grösser ist als die erwartete. Es wird angenommen, dass die Verschiebung aus einem konstanten Offset und einem konstanten Skalierungsfehler besteht. Dieser Fit wird für die Berechnung der Unsicherheit des Heissfilmsensors verwendet. Dieser Verlauf beantwortet Frage 1.

4.4.3 Simulationsresultate des Heissfilmsensors mit Temperatur- und Druckvariation

Abbildung 4.13 zeigt, dass die Heizleistung des Heissfilms tatsächlich kaum von der Temperatur und dem Druck des Gases abhängt. Dies beantwortet Frage 2 zum Heissfilm.

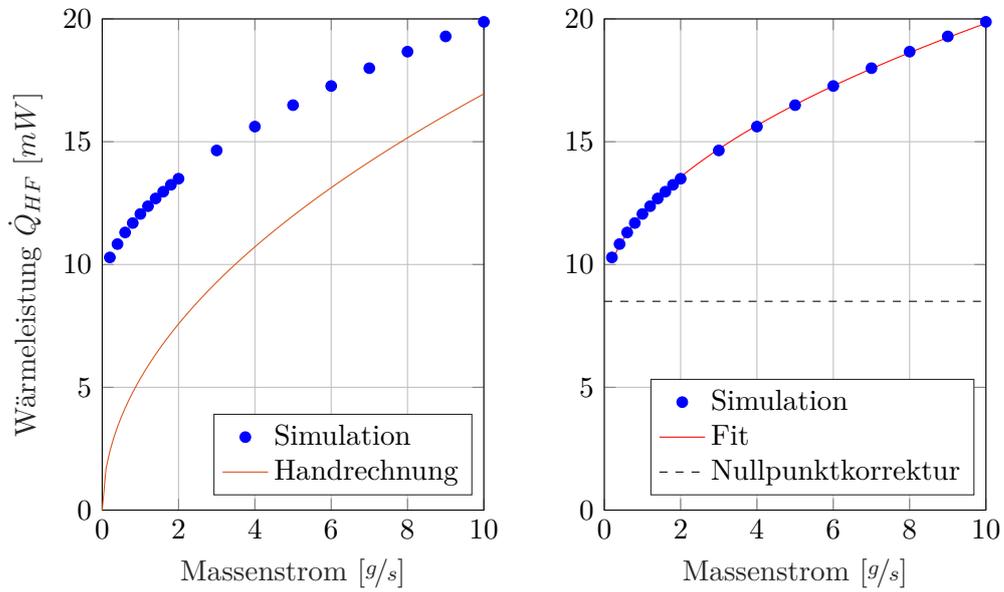


Abbildung 4.21: Wärmeleistung des Heissfilms gemäss Handrechnung und Simulation

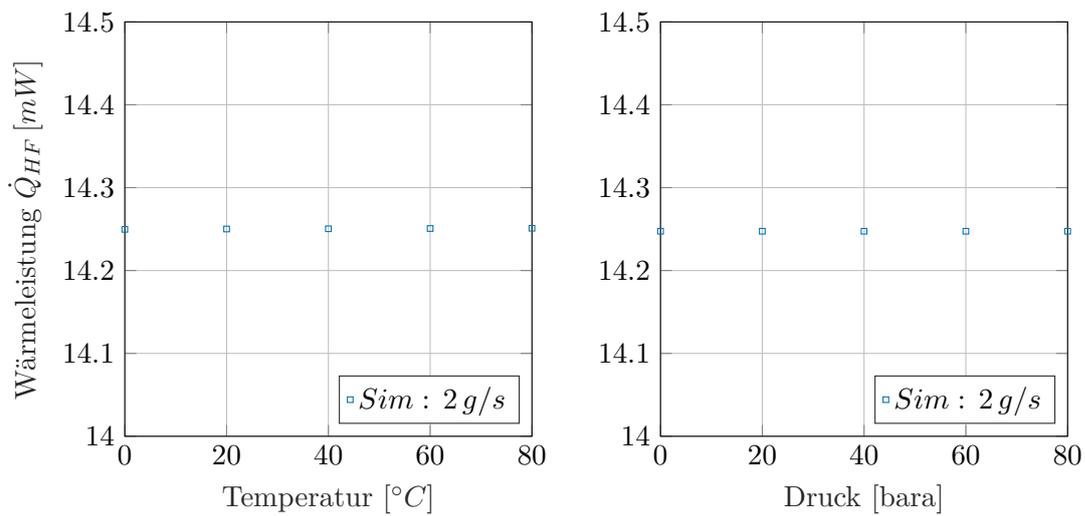


Abbildung 4.22: Heizleistung in Abhängigkeit der Temperatur und Druck

4.5 Simulation des Heissfilmsensors mit gerader Einlaufstrecke

Der Heissfilmsensor wird erneut strukturiert vernetzt. Dabei wird nur ein sehr kurzes Rohrstück simuliert, da das Strömungsgebiet um den Heissfilm aufgrund dessen Grösse sehr fein aufgelöst werden muss.

4.5.1 Simulationseinstellungen des Heissfilmsensors

Inkompressibel	Siehe Kapitel 4.1.1, Schritt 2.
Stationär	Siehe Kapitel 4.1.1, Schritt 2.
Wärmeübertragung	Konvektive Wärmeübertragung ist aktiviert.
Schwerkraft	Gravitation wird keine vorgegeben. Natürliche Konvektion wird vernachlässigt.
Eintritt	Eine Geschwindigkeitsverteilung wird gemäss dem Resultat der Simulation der Einlaufstrecke aufgetragen. Temperatur $T_{He} = 20^{\circ}C$ und Druck $p = 1\ bar$ werden vorgegeben.
Austritt	Am Austritt herrscht ein relativer Druck von $0\ Pa$.
Wände	Für alle Wände wird eine Haftbedingung (no slip condition) aufgetragen. Die Wände sind glatt und adiabat mit Ausnahme des Heissfilms, welcher eine erhöhte Temperatur hat ($\Delta T = 15\ K \rightarrow T_{HF} = 35^{\circ}C$).
Turbulenz	SST wird für alle Simulationen verwendet. Aufgrund der erwarteten Reynolds-Zahlen ($Re_{HF} = 1283 \dots 6416$ gemäss Tabelle 3.1) wird nicht immer turbulentes Verhalten erwartet. Um die Simulationen vergleichen zu können, werden sie dennoch mit demselben Rechenmodell durchgeführt.

4.5.2 Simulationsresultate des Heissfilmsensors mit gerader Einlaufstrecke

In Abbildung 4.23 wird die Wärmestromdichte des Heissfilms gezeigt. Die Variation der Wärmestromdichte über die Zellen am Rand des Heissfilms ist gross. Die Ränder des Heissfilms sind möglicherweise nicht fein genug aufgelöst. Abbildung 4.24 zeigt die Temperatur des Heissfilms und des Gases. Der Heissfilmsensor ist tatsächlich Druck- und Temperaturunabhängig, wenn die Regelung der Temperatur und der Heizleistung entsprechend funktioniert. Eine weitere Abbildung der Temperatur beim Heissfilm ist in Abbildung A.6 und die Geschwindigkeiten in der Nähe des Heissfilms in Abbildung A.7 und A.8 im Anhang A einsehbar.

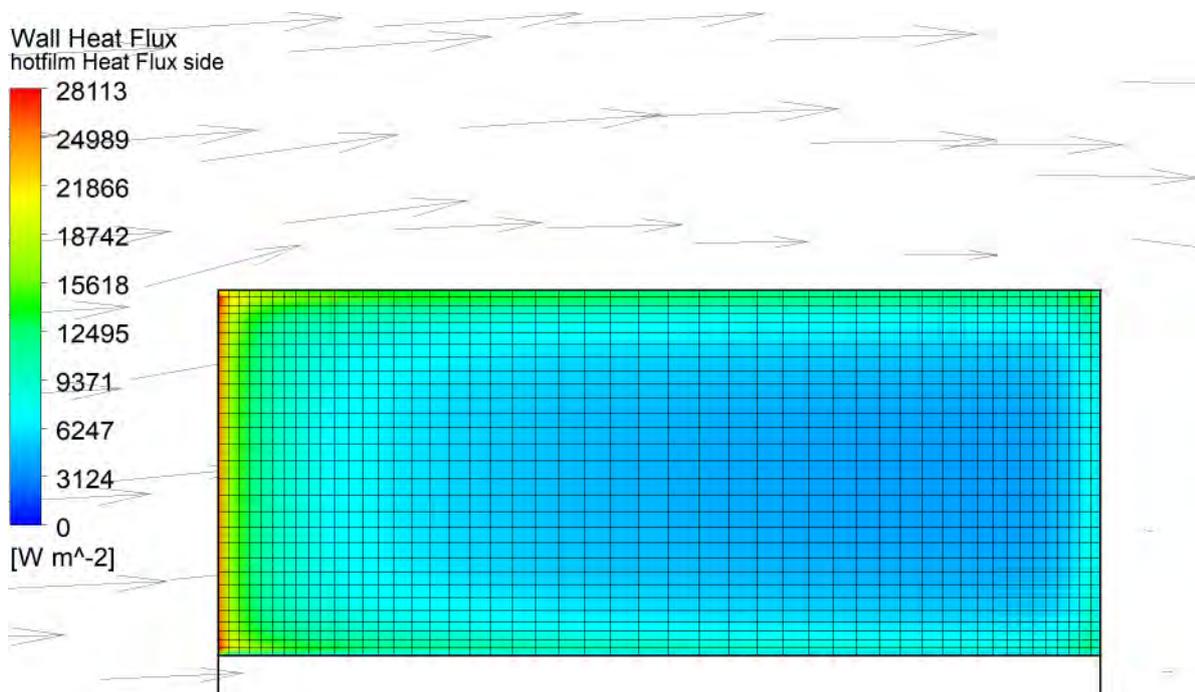


Abbildung 4.23: Wärmeflussdichte auf dem Heissfilm bei $\Delta T = 15 K$ und $\dot{m} = 5 g/s$

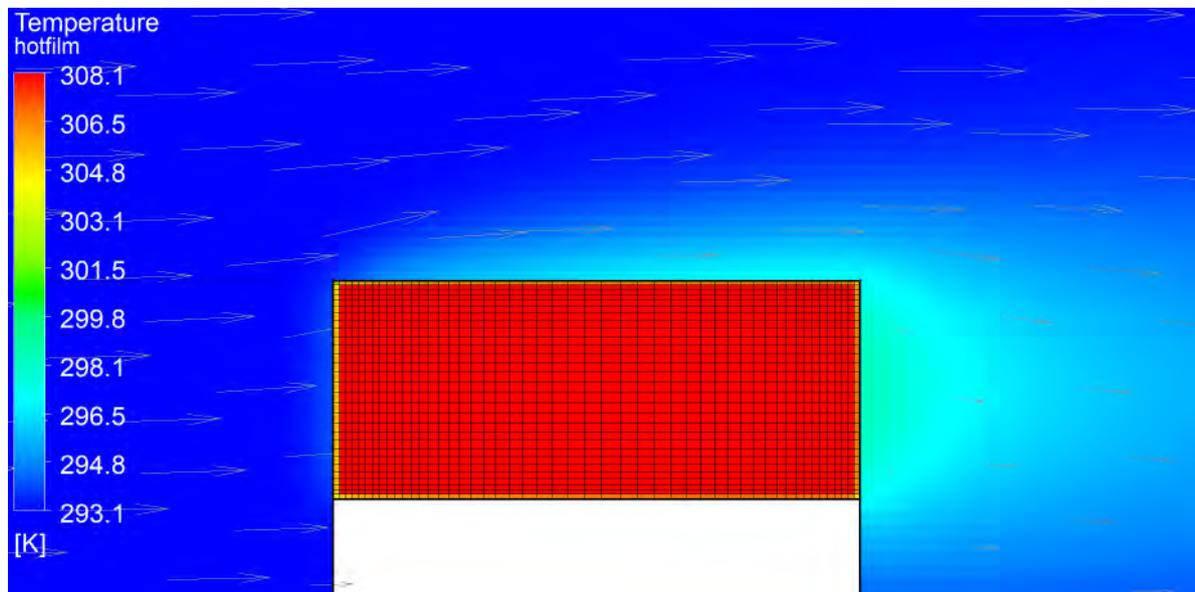


Abbildung 4.24: Temperatur in der Umgebung des Heissfilms, $\Delta T = 15 K$, $\dot{m} = 5 g/s$

4.6 Simulation der verwinkelten Einlaufstrecke des Heissfilmsensors

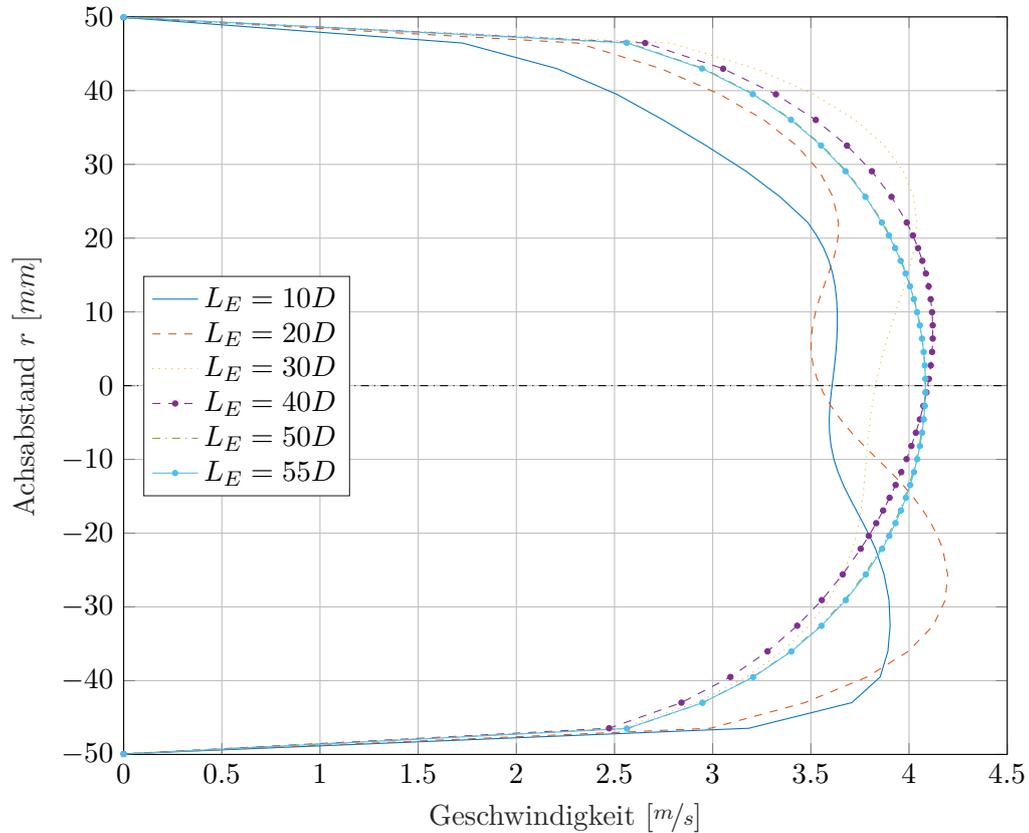


Abbildung 4.25: Geschwindigkeitsprofile für 5 g/s nach verwinkeltem Einlauf und unterschiedlichen Einlaufstrecken

Die Geschwindigkeitsprofile in Abbildung 4.25 zeigen, wie die Geschwindigkeit in Z-Richtung variiert. Bis $30D$ scheint die Geschwindigkeitsverteilung noch sehr asymmetrisch. Es ist ersichtlich, dass sogar bei $50D$ ($L_E = 5\text{ m}$) noch ein asymmetrisches Geschwindigkeitsprofil vorhanden ist. Für eine vollständig ausgebildete Strömung muss somit im turbulenten Fall bei 5 g/s eine Einlaufstrecke bis zur 5.5 m vorgesehen werden.

Um eine grobe Idee davon zu erhalten, wie sich die Geschwindigkeitsprofile in der Nähe des Übergangsbereiches verhalten, wird dieselbe Strömung mit und ohne Turbulenzmodell simuliert. Diese Betrachtung ist quantitativ ungenau, da die Wahl des Turbulenzmodells vom zu erwartenden Strömungszustand abhängen sollte und nicht umgekehrt. Wie in Tabelle 3.1 aufgezeigt wurde, können beim Heissfilmsensor turbulente und laminare Strömungszustände auftreten, je nach Massenstrom. Somit ist es wichtig, den Übergangsbereich zu betrachten. Wenn nun keine ausreichend lange Einlaufstrecke vorhanden ist, können sich die lokalen Geschwindigkeiten beim Heissfilmsensor gemäss Abbildung 4.26 unterscheiden. An zwei betrachteten Einbaupositionen für den Heissfilm treten gemäss den Resultaten der zwei Simulationen unterschiedliche Geschwindigkeiten auf, wenn turbulent oder laminar gerechnet wird. Es ist somit möglich, dass sich dieser Unterschied ebenfalls in Realität als Sprung der lokalen Geschwindigkeit bemerkbar macht.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, kann der Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung

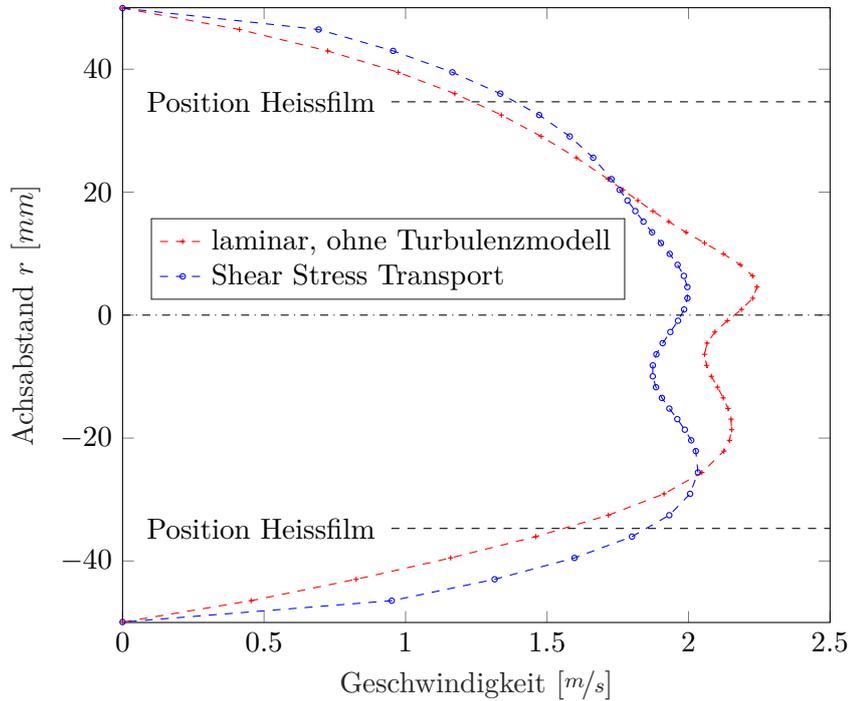


Abbildung 4.26: Geschwindigkeitsprofile für 2 g/s mit und ohne Turbulenzmodell nach $L_E = 20D$

bei unterschiedlichen Reynolds-Zahlen auftreten, abhängig davon in welche Richtung der Übergang stattfindet. Vor allem Strömungen mit leichten Gasen wie Helium tendieren dazu, beim gleichmässiger Geschwindigkeitserhöhung länger laminar zu bleiben. Die Konsequenz ist eine Art Hysterese des Heissfilmsensors im Übergangsbereich, die qualitativ dem Verlauf in Abbildung 4.27 folgen könnte. Es ist in diesem Bereich nicht möglich, zu bestimmen, ob man auf der turbulenten oder laminaren Kurve ist. Die Messung wird dadurch sehr unsicher. Frage 3 zum Heissfilm ist damit teilweise beantwortet, da die Unsicherheit nicht quantifiziert werden kann. Die Überlegung der äquivalenten, lokalen Geschwindigkeit ist somit in diesem Fall nur mit genauen Kenntnissen über den Strömungszustand im Übergangsbereich möglich. Andere Messgeräte, z.B. das *t-mass* von Endress + Hauser, umgehen dieses Problem indem sie nur für grosse Reynolds-Zahlen über $Re = 4000$ eingesetzt werden [26].

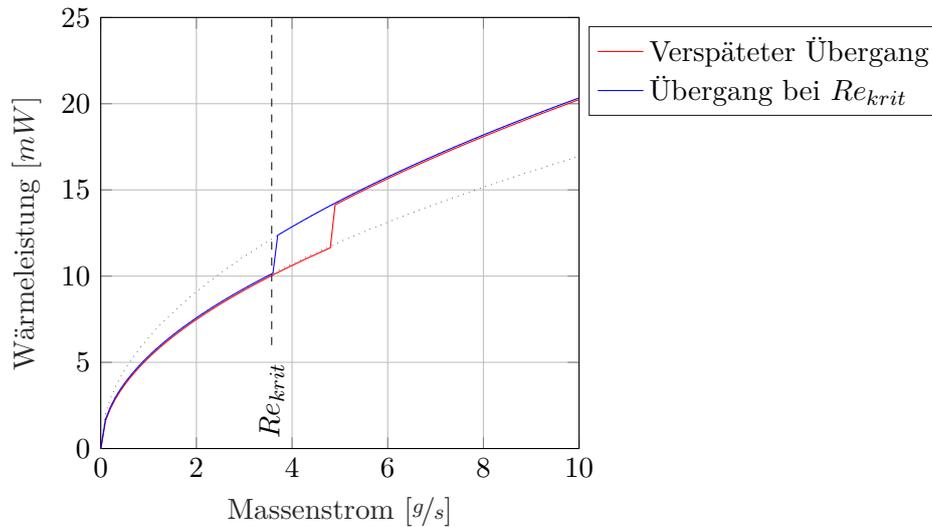


Abbildung 4.27: Möglicher Verlauf der Wärmeleistung im Übergangsbereich

4.6.1 Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung beim verwinkelten Einlauf

Abbildung 4.28 zeigt, wie sich die Geschwindigkeitsverteilung im Rohr mit zunehmender Einlauf­länge entwickelt. Es sind in Abbildung 4.28a zwei gegenläufige Wirbel erkennbar. Diese entstehen durch den ersten Winkel. Der Vergleich mit Abbildung 4.28b zeigt, dass diese Wirbel sich umeinander drehen und das Gebiet der tiefen Geschwindigkeit (grün) am Umfang im Uhrzeigersinn wandert. Die Position des Heissfilmsensors erfährt somit bei jeder Einlauf­länge eine andere Geschwindigkeit. Die maximale Abweichung bei der gewählten Einstecktiefe L_{HF} ist in Abbildung 4.28a und 4.28b ca. 2 m/s .

Um die Simulationsergebnisse weiterzuverwenden, können sie mit Resultaten anderer CFD-Simulationen mit Winkeln verglichen werden. Eine Untersuchung zur Durchflussmessung von Wasser nach Winkel­stücken publizierte die Simulationsergebnisse in Abbildung 4.29 [27]. Diese zeigen dieselben zwei Wirbel, die in der Simulation für den Heissfilm nach dem zweiten Winkel in Abbildung 4.28a immer noch erkennbar sind. Dazwischen in Wandnähe befindet sich das grösste Gebiet mit kleinerer Strömungsgeschwindigkeit. Sollte der Heissfilmsensor in diesem Bereich messen, erfährt er eine viel kleinere lokale Geschwindigkeit als an anderen Messstellen.

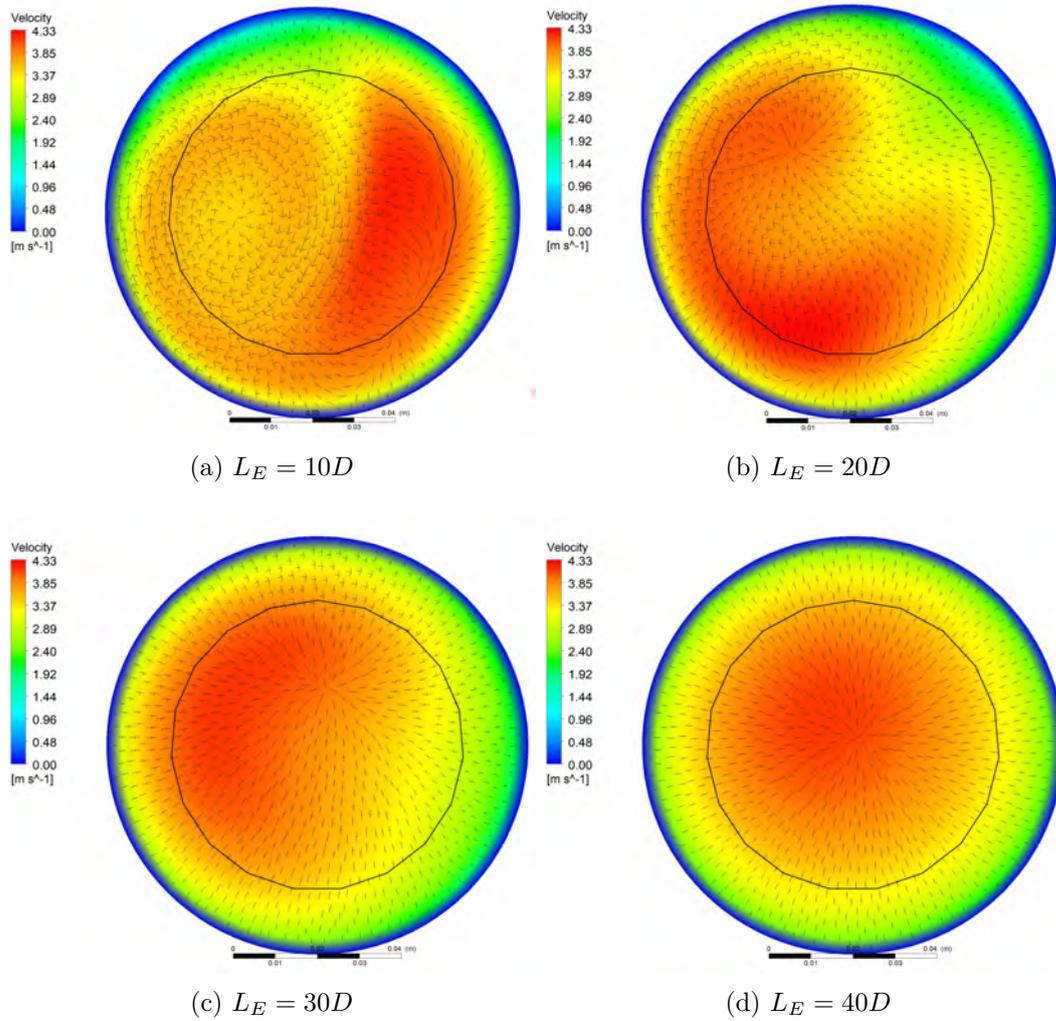


Abbildung 4.28: Lokale Geschwindigkeiten nach verwinkeltem Einlauf und variierender Einlaufstrecke, (Der schwarze Ring entspricht der Einstecktiefe des Heissfilmsensors)

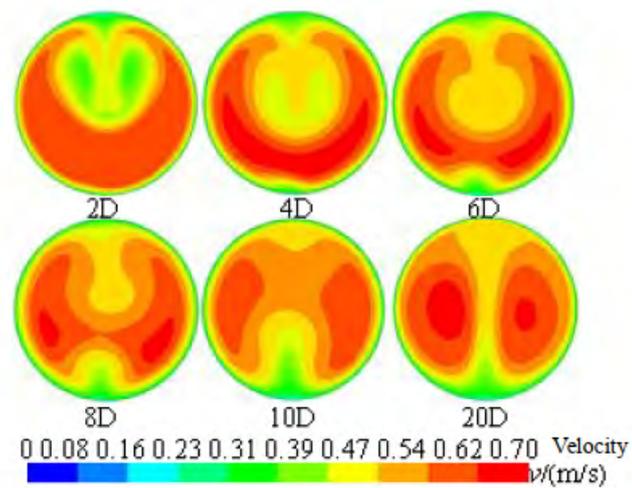


Abbildung 4.29: Geschwindigkeitsverteilung in einer Studie zur Messunsicherheit bei Strömungen nach einem Winkelstück mit Radius $1.5D$ [27]

5 Wahl des Venturirohrs als Lösungsvariante

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Simulationen, Handrechnungen und Unsicherheitsanalysen konnte entschieden werden, dass das Venturirohr besser für den Einsatz im Mu3e-Experiment geeignet ist. Aufgrund einer Vorteil-Nachteil-Analyse wurden die beiden Lösungsvarianten verglichen (siehe Protokoll Nr. 12 [28]). Eine Zusammenfassung der Analyse ist in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die Ausschlaggebenden Argumente sind vor allem, die Messunsicherheit und der ungewisse Erfolg des Heissfilmsensors, welche gegen das Weiterverfolgen dieses Konzeptes sprechen.

Venturirohr

Vorteile

- Zuverlässiges Messverfahren
- Unempfindlich auf nicht vollständig ausgebildete Strömung
- Einfaches Austauschen der Sensoren im Bypass
- Einlaufstrecke von ca. 0.63 m
- Theoretische Standardunsicherheit von $2.8 \dots 3.7\%$

Nachteile

- Druckabfall von bis zu 500 Pa bei 10 g/s
- Temperaturmessung im Venturirohr und im Bypass wird benötigt
- Kunststoff und Harz wird im Bypass benetzt
- Unterschiedliche Baugrößen werden für geringe Druckverluste und tiefe Messunsicherheit benötigt

Heissfilmsensor

Vorteile

- Schnelle Messungen sind möglich
- Sehr geringer Druckabfall, auch für lange Einlaufstrecken
- Unabhängig von Druck und Temperatur
- Keine Benetzung von Kunststoffen

Nachteile

- Grosse Unsicherheit im Übergangsbereich bei unausgebildeter Rohrströmung (Hysterese) oder eine sehr lange Beruhigungsstrecke bis zu 5 m wird benötigt
- Theoretische Standardunsicherheit von $3.6 \dots 5.9\%$
- Vor-Ort-Kalibrierung muss für jede Einbaulage durchgeführt werden
- Zeitaufwand für die Entwicklung und Kalibrierung ist zu gross, um eine einsetzfähige Lösung innerhalb des P6 zu erarbeiten
- Regelung für den Heissfilm muss für die Verwendung im Mu3e-Experiment entwickelt werden

Tabelle 5.1: Vorteil-Nachteil-Analyse

6 Untersuchung des Venturirohrs mittels Versuchsaufbau

Das Ziel der Versuche ist es, die konzipierte Mengenummessung mittels Venturirohr unter ähnlichen Bedingungen wie im Mu3e-Experiment zu kalibrieren. Dabei werden möglichst alle Bedingungen variiert, um Abhängigkeiten von einzelnen Messgrößen festzustellen. Zusätzlich sollen mit den Messdaten die Simulationen aus dem Kapitel 4 validiert werden können.

Der im P5 erarbeitete Versuchsaufbau kann nicht den ganzen Bereich an Massenströmen abfahren, für die die Mengenummessung eingesetzt werden soll. Um diese Massenströme im Mu3e-Experiment zu fördern, werden Turbokompressoren parallelgeschaltet. Eine Möglichkeit, um grosse Massenströme bis zu 10 g/s über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten, besteht am PSI, wo Helium auf grossem Druckniveau in Gasflaschenbatterien gespeichert wird. Versuche wurden somit am Versuchsaufbau *Verdichterkreislauf* in Kapitel 6.1 und in einem zusätzlichen Versuchsaufbau *Kalibrierstrecke* in Kapitel 6.2 durchgeführt.

6.1 Versuchsaufbau Verdichterkreislauf

Der Versuchsaufbau an der FHNW (Fachhochschule Nordwestschweiz) wurde in Zusammenarbeit mit dem Projekt Turbokompressor betrieben. Die Versuchstage wurden gemeinsam genutzt, da das Abfahren des Kennfelds des Kompressors viele Datenpunkte bei unterschiedlichen Bedingungen für die Mengenummessung lieferte. Der Versuchsaufbau wurde parallel für Versuche mit einem Mockup der zu kühlenden Detektoren im Mu3e-Experiment verwendet, welches zwischenzeitlich ein- und wieder ausgebaut wurde.

6.1.1 Setup

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 6.1 und real in Abbildung 6.2 abgebildet. Die Tabelle 6.1 liefert die Messstellen und Messgeräte für die Mengenummessung.

Bezeichnung	Messgrösse	Messgerät	Hersteller
\dot{m}	Massenstrom	t-mass DN25	Endress + Hauser
T_{VT}	Temperatur	Thermoelement Typ K	Electric Sensor
T_u	Umgebungstemperatur	Thermoelement Typ K	Electric Sensor
p_1, p_2	Absolutdruck	PD-39X	Keller AG
x_{O_2}	Sauerstoffgehalt	FCX-TR	Pewatron
y_{He}	Helium-Massenanteil	BGA (Binary Gas Analyzer)	SRS
\dot{m}_{BP}	Differenzdruck	SDP816-500Pa	Sensirion

Tabelle 6.1: Messstellenliste Verdichterkreislauf gemäss Schema in Abbildung 6.1

6.1.2 Referenzmessung des Massenstroms

Der Massenstrom wird mittels einem kalibrierten Durchflussmessgerät, einem *Proline t-mass 65*, von Endress + Hauser gemessen. Das *t-mass* ist ein kalorimetrisches Messgerät, welches nach dem

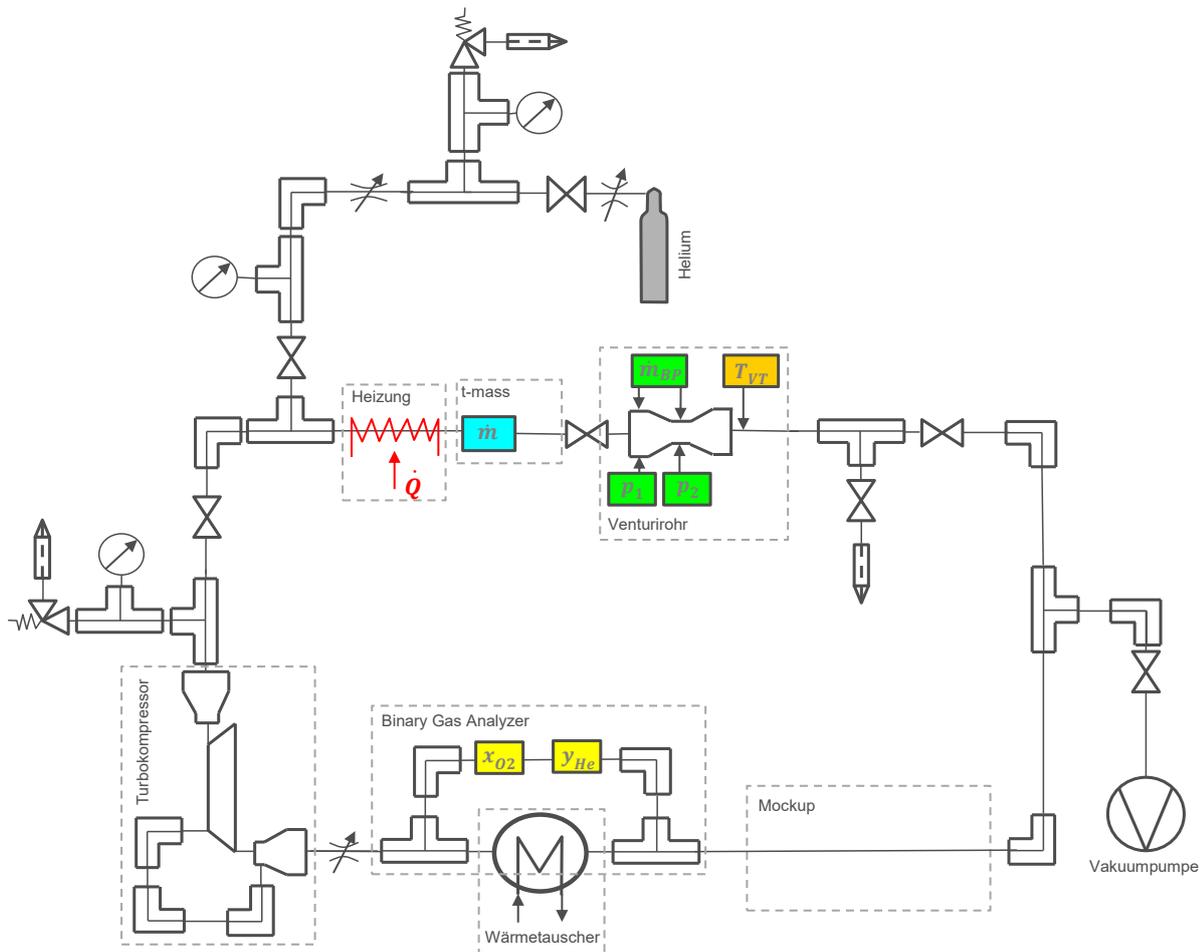


Abbildung 6.1: Schema des Verdichterkreislaufs mit Messstellen der Mengenmessung

Prinzip des konvektiven Wärmetransports funktioniert. Als Temperaturfühler und Heizelement werden dabei PT100 verwendet, die auf gleicher Höhe in die Strömung ragen [29]. Als Ausgangssignal wird der Stromausgang ($4 \dots 20 \text{ mA}$) verwendet. Um dieses Signal zu messen wird die Spannung ($2 \dots 10 \text{ V}$) über einen Widerstand ($500 \Omega \pm 0.1\%$) gemessen, der zwischen GND und Signalausgang des *t-mass* geschaltet ist.

6.1.3 Erzeugung und Steuerung des Massenstroms

Der Massenstrom wird durch das Verdichten durch den verbauten Turbokompressor der Firma *Celeroton* erzeugt. Der Massenstrom stellt sich als Funktion der Kompressordrehzahl und der Druckdifferenz von Kompressoreintritt und -austritt ein.

6.1.4 Heliumqualität im Versuch

Vor der Messung wird der Versuchsaufbau mittels einer Vakuumpumpe evakuiert ($p \leq 10 \text{ mbar}$) und anschliessend mit Helium 4.6 (volumetrischer Heliumanteil $y_{He} \geq 99.996\%$). Dieser Vorgang

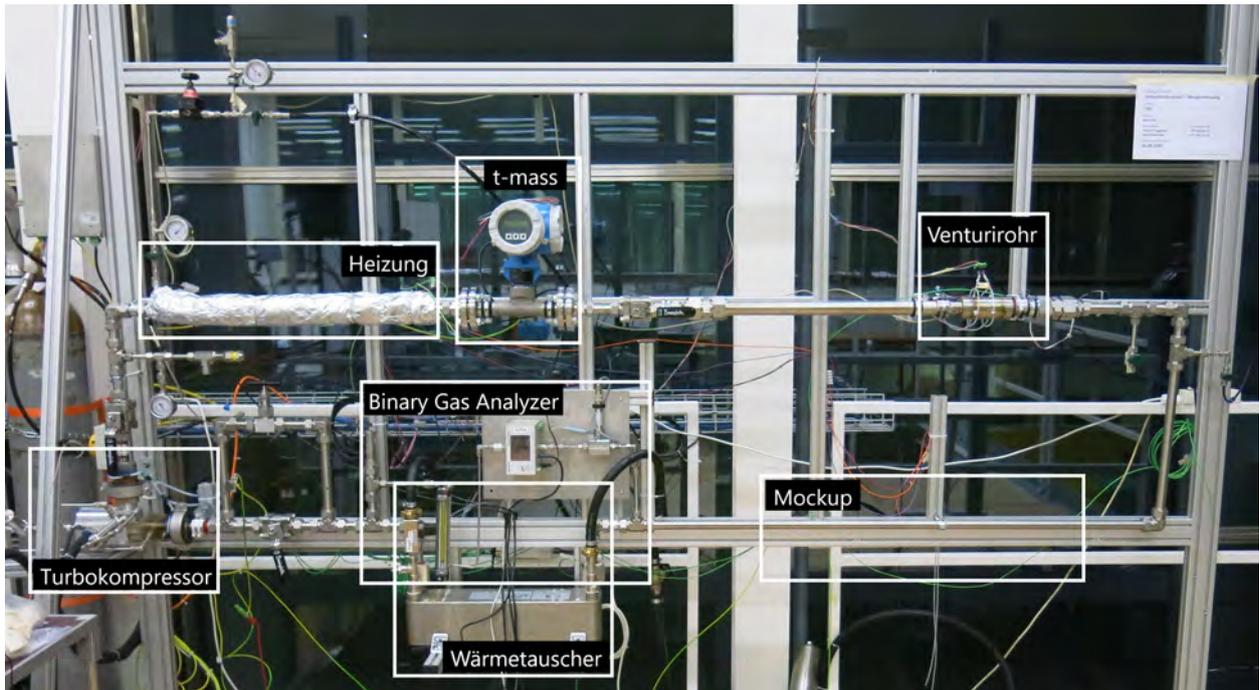


Abbildung 6.2: Verdichterkreislauf komplett

wurde vor Versuchen zwei bis drei Mal wiederholt, um einen geringen Fremdgasanteil zu erhalten. Der Helium-Anteil des Gemisches im Kreislauf wurde mit dem BGA überwacht. Dieser kann unter Angabe der zwei vorhandenen Gase im Gemisch (Helium und trockene Luft) die Zusammensetzung aus der gemessenen Schallgeschwindigkeit bestimmen. Eine weitere Quelle von Fremdgasen können die Klebstoffe und Kunststoffkomponenten im Kontakt mit der Heliumatmosphäre sein. Diese können bei dem kleinen Druck beim Evakuieren und im Betrieb mit Helium ausgasen und das Helium weiter verunreinigen. Diese Verunreinigung konnte nicht quantifiziert und gemessen werden. Die Dichtigkeit des Versuchsaufbaus wurde nach Abschluss der Manipulationen der gasführenden Komponenten mittels Lecksuchmittel geprüft, um das Ansaugen von Umgebungsluft und den Verlust von Helium ausschliessen zu können.

6.1.5 Variation der Gastemperatur

Die durch den Verdichter zugeführte Energie dissipiert aufgrund von Reibung und muss in Form von Wärme wieder abgeführt werden. Dies wird mit einem Wärmetauscher, der auf der kalten Seite mit Wasser durchströmt wird. Die Eintrittstemperatur des Verdichters ist somit immer bei ca. 15°C . Im Verdichterkreislauf wird das Helium verdichtet, was eine Erwärmung gemäss der Beziehung 6.1 für isentrope Zustandsänderungen zur Folge hat.

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (6.1)$$

Das Verhältnis p_2/p_1 wird auch als Druckverhältnis π angegeben. Die maximal zulässige Eintrittstemperatur des Verdichters beträgt $T_1 = 35^{\circ}\text{C}$, was bei einem Druckverhältnis von $\pi = 1.15$ auf $T_2 = 53^{\circ}\text{C}$ führt. Im realen Verdichter ist die Austrittstemperatur T_2 höher, da die Verdichtung

nicht mehr isentrop ist. Die Eintrittstemperatur lässt sich nur sehr langsam ändern, da die thermische Trägheit des Wärmetauschers sehr gross ist. Um einen grösseren Bereich von Temperaturen einstellen zu können, wird das Gas nach dem Verdichter über die Rohrwände mit einem Heizband ($P = 540\text{ W}$) erwärmt.

6.1.6 Variation des Drucks

Der Druck beim Venturirohr ist abhängig vom Betriebspunkt des Kompressors. Ein Verdichterverhältnis π verursacht einen höheren Druck beim Venturirohr, da der grösste Druckabfall im Wärmetauscher und in der Drosselung des Massenstromes kurz vor dem Kompressor geschieht. Der Druck ist aber auch abhängig vom Druck beim Befüllen des Kreislaufs ($1.05 \dots 1.15\text{ bar}_a$), wobei die Gasmenge im System von diesem Druck abhängt.

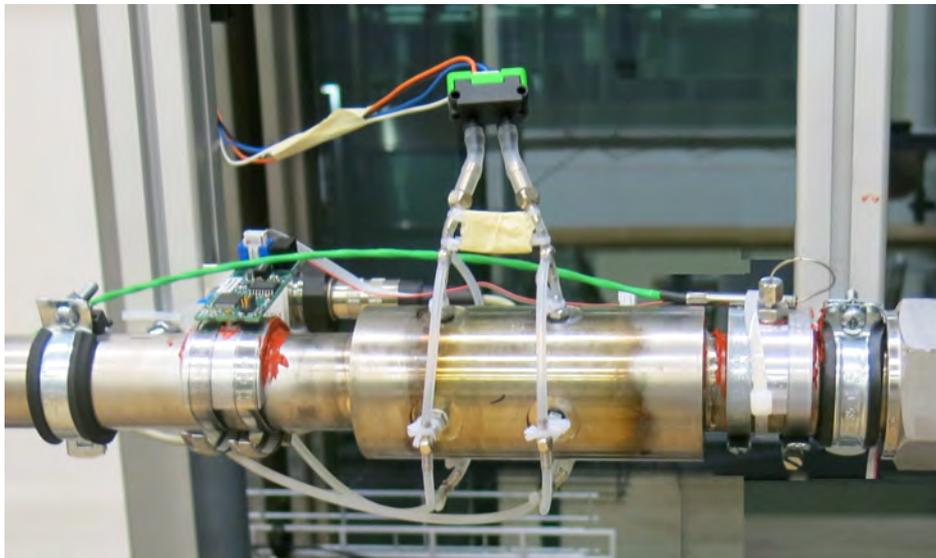


Abbildung 6.3: Verdichterkreislauf: Venturirohr

6.1.7 Beobachtungen

- Die Temperatur beim Venturirohr ist am trägsten. Nach $10 \dots 15\text{ min}$ bei derselben Drehzahl und demselben Druckverhältnis über dem Kompressor wird die Temperatur beim Venturirohr erst stationär. Die Temperatur ändert jedoch nur mit ca. 0.5 K/min .
- Die Strömungsgeschwindigkeit ist nicht hörbar. Die Geräuschentwicklung des Turbokompressors ist grösser und vor allem bei grosser Drehzahl und grossem Druckverhältnis hörbar.
- Die Temperatur im Bypass liegt näher an der Umgebungstemperatur als an der Temperatur, die im Venturirohr gemessen wird. Sie steigt jedoch mit zunehmender Temperatur im Venturirohr.

6.1.8 Schwierigkeiten der Versuche mit dem Verdichterkreislauf

Geschlossenes System Die Gasmenge im System ist konstant. Dadurch ist der Druck und die Temperatur über das ideale Gasgesetz gekoppelt: $pV = nRT$. Nur durch

die Variation des Drucks im System beim Befüllen lassen sich andere Kombinationen und Temperatur und Druck erreichen.

- Kompressor** Die Temperatur ist abhängig vom Druckverhältnis und der Kompressor-drehzahl. Mit zunehmender Drehzahl steigt der Massenstrom aber auch die Temperatur. Somit ist im System die Temperatur automatisch an die Kompressordrehzahl gekoppelt. Nur durch zusätzliches Heizen (oder Kühlen) nach dem Kompressor kann von dieser Korrelation abgewichen werden.
- Hohe Temperaturen** Mit der Leistung des Heizbands konnten keine Temperaturen über 55°C erreicht werden, da die Wärme über das Helium und den Wärmetauscher und über Verluste an die Umgebung abgegeben wird.
- Heliumreinheit** Der Heliumanteil ist nicht über längere Zeit konstant, was entweder bedeutet, dass Luft angesogen wird, Helium entweicht oder Kunststoffe im Kreislauf ausgasen. Die Eigenschaften des Gasgemischs im Kreislauf können sich dadurch leicht mit der Zeit ändern.

6.2 Versuchsaufbau Kalibrierstrecke

Der Versuchsaufbau am PSI dient zur Kalibrierung der Mengemessung und ist entsprechend für Massenströme bis 10 g/s ausgelegt. Am PSI werden einige Anlagen mit Helium versorgt. Grosse Mengen verdichtetes Helium sind verfügbar und es existiert ein Netz von Leitungen, die zur Rückgewinnungsanlage für Helium führen. Expandiertes Helium kann über diese Leitungen in einen Auffangballon geleitet geführt werden. Von dort wird es mit Kolbenkompressoren abgesaugt und wieder bei hohem Druck in einer Flaschenbatterie gespeichert.

Bezeichnung	Messgrösse	Messgerät	Hersteller
\dot{m}	Massenstrom	Promass DN4	Endress + Hauser
T^0	Temperatur	Thermoelement Typ K	Electric Sensor
T_{VT}	Temperatur	Thermoelement Typ K	Electric Sensor
T_u	Umgebungstemperatur	Thermoelement Typ K	Electric Sensor
p^0	Relativdruck vor der Düse		
p_{BGA}	Druck vor dem BGA		Keller AG
p_1, p_2	Absolutdruck	PD-39X	Keller AG
p_{rel}	Relativdruck	HDIB001DUF8H5	First Sensor
p_u	Umgebungsdruck	HCA0811ARH8	First Sensor
x_{O_2}	Sauerstoffgehalt	FCX-TR	Pewatron
y_{He}	Helium-Massenanteil	BGA	SRS
\dot{m}_{BP}	Bypass-Massenstrom ⁸	SDP816-500Pa	Sensirion

Tabelle 6.2: Messstellenliste Kalibrierstrecke gemäss Schema in Abbildung 6.4

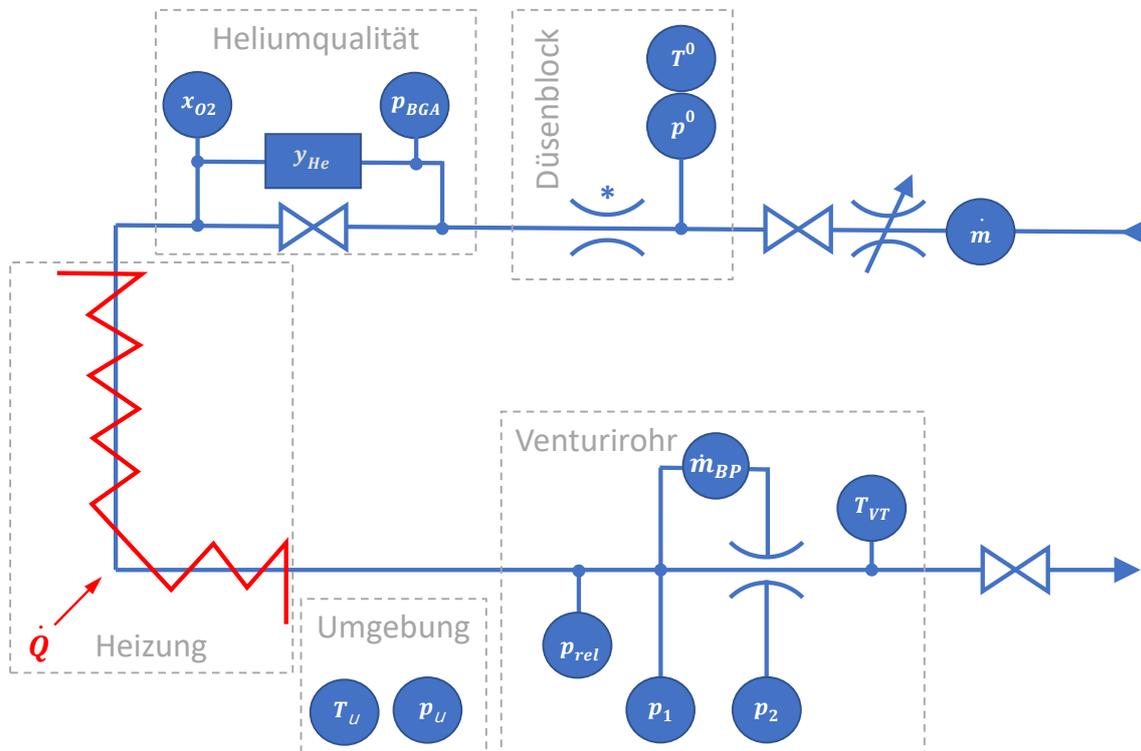


Abbildung 6.4: Schema der Kalibrierstrecke

6.2.1 Referenzmessung des Massenstroms

Der Massenstrom wird mittels einem kalibrierten Durchflussmessgerät, einem *Proline Promass 83A*, von Endress + Hauser gemessen (Abbildung 6.5 rechts im Bild). Das Promass funktioniert nach dem Coriolis-Prinzip. Die lineare Bewegung des fließenden Gases und die Rotationsbewegung der oszillierenden, gebogenen Leitungen im Messgerät werden überlagert, wodurch Corioliskräfte auftreten. Je grösser der Massenstrom und dadurch die Geschwindigkeit des Gases ist, umso stärker sind diese Kräfte, wodurch eine grösser werdende Phasenverschiebung der oszillierenden Bewegung der gebogenen Rohre von Eintritt zu Austritt hervorgerufen wird [30]. Diese Messmethode ist sehr genau und weist unter den Bedingungen im Versuch eine Unsicherheit von $\pm 0.5\%$ auf. Als Ausgangssignal wird der Stromausgang ($4 \dots 20 \text{ mA}$) verwendet, welcher gleich wie beim *t-mass* (Kapitel 6.1.2 gemessen wird. Die Dichte der Kalibrierstrecke wurde mit einem Lecksucherät (Massenspektrometer) geprüft, sodass der Massenstrom beim *Promass* demselben Massenstrom, wie beim Venturirohr entspricht.

6.2.2 Erzeugung und Steuerung des Massenstroms

Der Massenstrom wird mittels Druckminderer eingestellt. Dem Druckminderer liegen auf der Hochdruckseite 160 bar an. Der Solldruck auf der Niederdruckseite kann mit einer Spindel eingestellt

⁸Der Differenzdruck wird von den mikrothermischen Durchflusssensoren als Funktion des Massenstroms berechnet. Somit kann das analoge Signal als Mass für den Massenstrom durch den Sensor interpretiert werden.

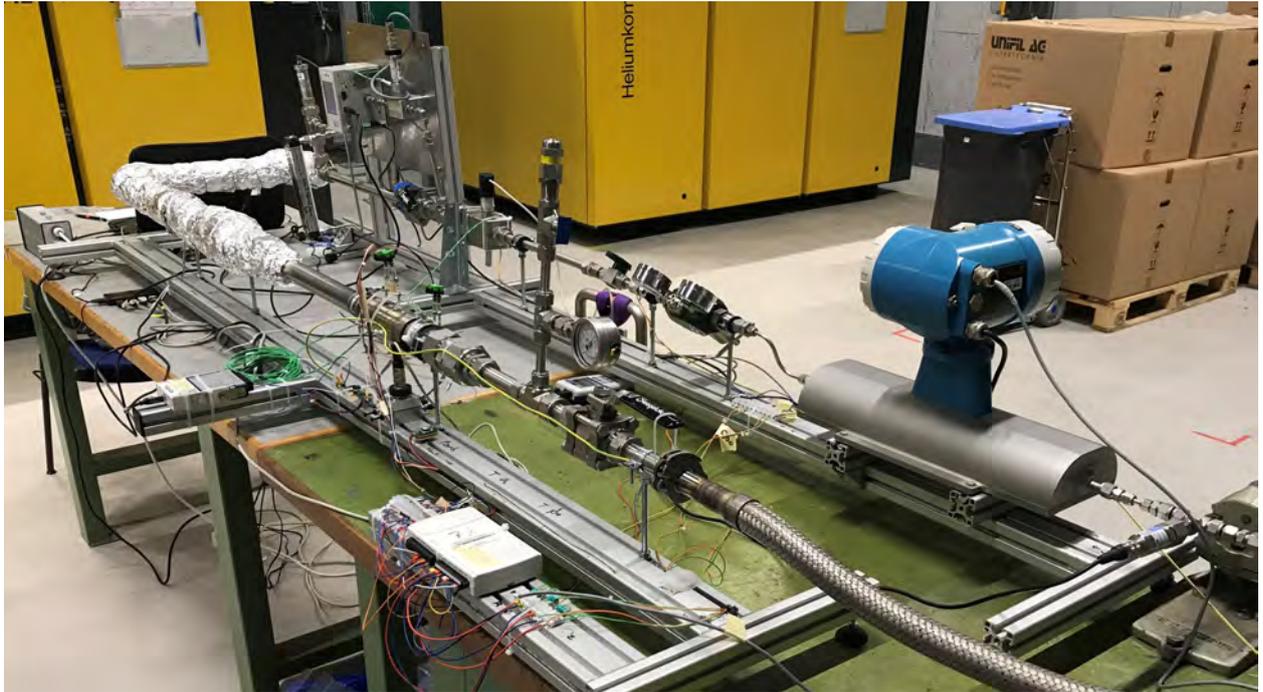


Abbildung 6.5: Kalibrierstrecke komplett

werden. Wenn der Druck auf der Niederdruckseite unter den Solldruck fällt, öffnet ein Ventil im Druckminderer, sodass Gas hindurchströmen kann. Nach dem Druckminderer ist der Düsenblock (Abbildung 6.6) eingebaut. Der engste Querschnitt im Düsenblock beträgt $d_{throat} = 2.2 \text{ mm}$. Bei einem Druckverhältnis von $p_1/p_2 > 2.05$ über der Düse sperrt diese, da oberhalb von diesem kritischen Druckverhältnis im engsten Querschnitt Schallgeschwindigkeit auftritt [12]. Der Massenstrom stellt sich bei dieser Bedingung gemäss Beziehung 6.2 ein, wobei A^* der engste Querschnitt bei d_{throat} ist, und der Druck vor der Düse den Term $\sqrt{p^0 \cdot \rho^0}$ definiert.

$$\dot{m} = A^* \cdot \sqrt{p^0 \cdot \rho^0} \cdot \sqrt{\kappa \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (6.2)$$

Dadurch lässt sich mit der Einstellung des Druckminderers der Massenstrom einstellen. Nach der Düse tritt eine Nachexpansion auf und es stellt sich der Druck ein, der durch den Druck im Rückgewinnsystem und den Druckabfall der Rohrleitungen bis zum Auffangballon gegeben ist.

6.2.3 Heliumqualität im Versuch

Es stehen 120·50 l-Flaschen mit Helium bei 160 bar zur Verfügung. Dieses Helium wurde verdichtet, nachdem es in anderen Experimenten am PSI in die Rückgewinnung geleitet wurde. Es ist deshalb mit Fremdgasen kontaminiert (Massenanteil $y_{He} \approx 90\%$, Volumenanteil $x_{He} \approx 98.5\%$). Es wird angenommen, dass diese Fremdgase hauptsächlich trockene Luft ist. Diese Verunreinigung wird erneut mit dem BGA (Abbildung 6.7) überwacht. Der letzte Versuch wurde mit zertifiziertem Helium 4.6 durchgeführt, um den Einfluss der Verunreinigung zu schliessen.

6.2.4 Variation der Gastemperatur

Durch den Joules-Thomson hervorgerufene Effekt der Erwärmung des Gemischs verursacht einen Temperaturanstieg bei der Expansion im Druckminderer und bei der Nachexpansion nach der Düse. Zusätzlich wurde für Versuche mit höherer Gastemperatur die Rohrleitung mit einem Heizband (gemäss Kapitel 6.1.5) erwärmt. Da die Temperatur nicht konstant hoch gehalten werden konnte, besonders bei Massenströmen grösser als 3 g/s , musste die Rohrleitung beim null Massenstrom aufgeheizt werden, sodass anschliessend während wenigen Sekunden ein Helium-Strom mit hoher Temperatur (bis zu 80°C) gemessen werden konnte. Die Isolation wurde nach dem Heizband verlängert, um Wärmeverluste über die Rohrwände bis zum Venturirohr zu reduzieren.

6.2.5 Variation des Drucks

Der Druck beim Venturirohr ist vom Druck im Auffangballon und dem Druckabfall in der Leitung bis zum Ballon abhängig. Der Druckabfall nach dem Venturirohr kann mit dem Kugelhahn am Austritt des Prüfstandes beeinflusst werden, indem dieser um wenige Grad geschlossen wird. Der Massenstrom wird davon nicht beeinflusst, da das kritische Druckverhältnis über der Düse immer noch gegeben ist.



Abbildung 6.6: Kalibrierstrecke: Düsenblock

6.2.6 Beobachtungen

- Der Joule-Thomson-Effekt macht sich durch eine Erwärmung der Rohrleitungen nach dem Druckminderer und nach der Düse bemerkbar. Für reines Helium beträgt die Temperaturerhöhung bei 25°C nach einer Expansion von 160 bar auf 1 bar ca. 10 K . Dies unterscheidet sich für das Gemisch mit Luft nur geringfügig. Der Temperaturanstieg ist nicht sofort in den

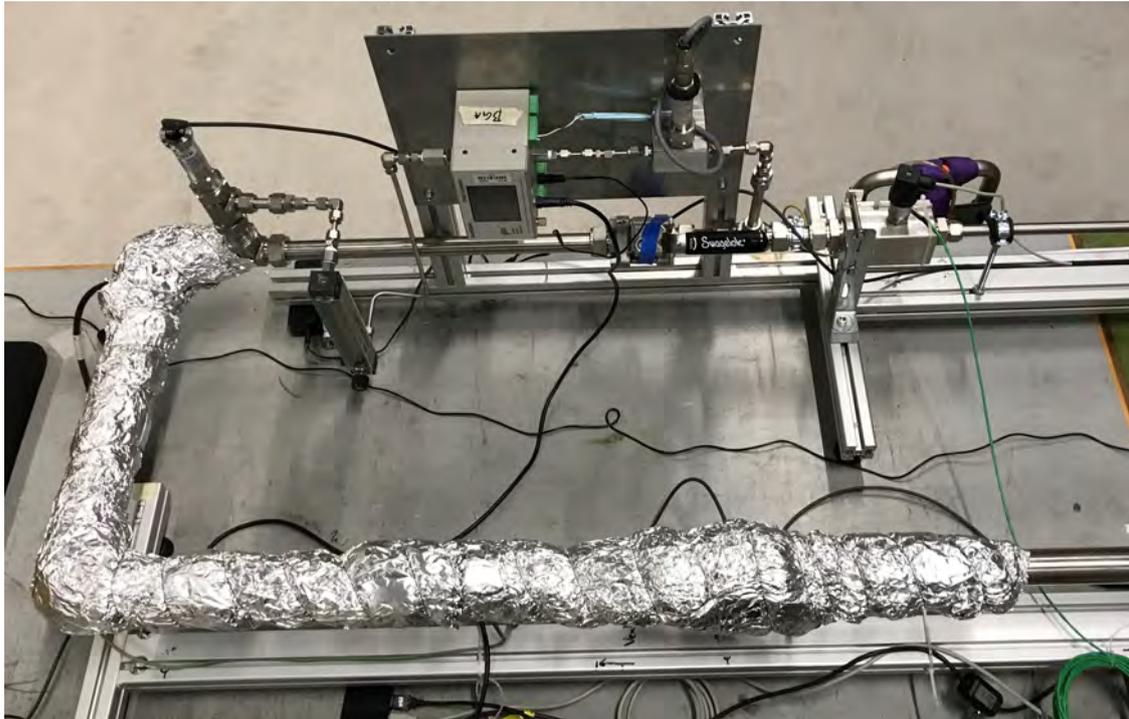


Abbildung 6.7: Kalibrierstrecke: BGA und Heizband

Messwerten erkennbar, da das ganze Rohrsystem zuerst das warme einströmende Gas kühlt. Nach wenigen Minuten steigt die Temperatur sogar beim Venturirohr merkbar an.

- Die grossen Geschwindigkeiten werden durch Schall registriert. Aufgrund des gewellten Innenschlauchs des Hochdruckschlauches entsteht ab 5 g/s ein lauter werdendes Pfeifen.
- Nach dem Verstellen der Spindel des Druckminderers stellt sich der Massenstrom nicht sofort ein, sondern nähert sich dem neuen Wert und pendelt leicht während der Druckminderer leicht öffnet und schliesst, um den Druck auf der Austrittsseite zu regeln.
- Der Druck beim Venturirohr steigt mit dem Massenstrom quadratisch an. Der Druck beim Venturirohr ist die Summe aus dem Druck im Auffangballon (Atmosphärendruck) und dem Druckverlust der Leitungen. Der grösste Anteil dieses Druckabfalls wird durch den Schlauch zwischen Versuchsaufbau und Rückgewinnung erzeugt. Nach ersten Versuchen wurde dieser gekürzt, da der Druck bei ca. 7 g/s über 1.4 bara stieg.
- Beim Versuch mit Helium 4.6 ergab die Messung der Gemischzusammensetzung teilweise Werte von $y_{He} > 100\%$, was physikalisch unmöglich ist und somit auf eine grössere Unsicherheit hinweist als die, die vom BGA angegeben wird.
- Bei grossen Massenströmen wurde vom BGA teilweise ein Fehler ausgegeben. Ev. ist dies auf die höheren Drücke beim BGA aufgrund des grossen Druckabfalls über die Kalibrierstrecke zurückzuführen.
- Ab einem Massenstrom von 7.5 g/s stieg das Signal des Differenzdrucksensors nicht mehr

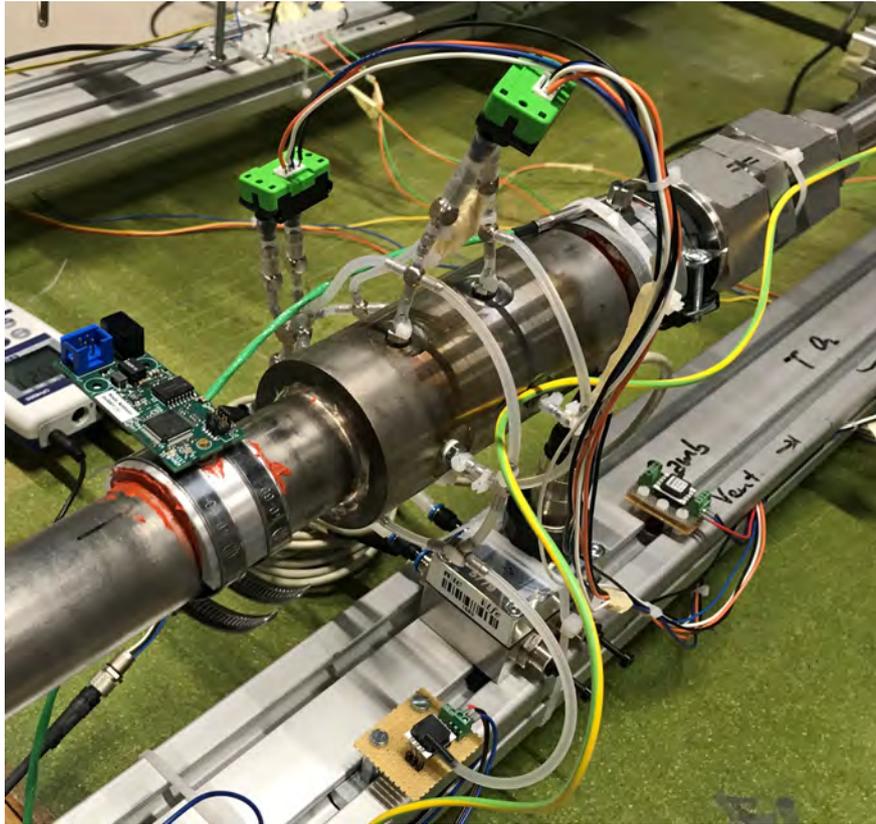


Abbildung 6.8: Kalibrierstrecke: Venturirohr mit parallel angeschlossenen Differenzdrucksensoren

an. Bei $U_{VT}/U_s = 0.9$ ist der maximale messbare Wert des Differenzdrucksensors erreicht (Sättigung).

6.2.7 Schwierigkeiten der Versuche mit der Kalibrierstrecke

- Messdauer** Da das Helium nach der Kalibrierstrecke in die Rückgewinnung geleitet wird, ist die Messdauer begrenzt durch das Fassungsvermögen der Auffangballone. Diese wurde vorsichtshalber nicht ausgereizt. Das bedeutet, dass die Betriebspunkte mit kleinen Massenströmen in der Regel 60 s lang gefahren wurden. Betriebspunkte mit grossem Massenstrom wurden kürzer mit 20 . . . 30 s gemessen. Als Konsequenz sind die gemittelten Messwerte unsicherer.
- Temperatur** Wie im Kapitel 6.2.4 erwähnt, konnten hohe Temperaturen nur kurzzeitig und nur instationär erreicht werden. Da hier kein stationäres Verhalten erreicht wurde können keine definitiven Aussagen zur Temperaturabhängigkeit gemacht werden aufgrund der Messdaten. Für stationäre, hohe Temperaturen würde sich das Venturirohr ebenfalls erwärmen, was einen Einfluss auf die Temperatur im Bypass haben könnte.
- Massenstrom** Der Massenstrom wird über den Druck vor der kritischen Düse gesteuert.

Das Regelverhalten des Druckminderers scheint bei grossen Massenströmen (grossen Geschwindigkeiten) weniger stabil zu sein und ev. mit der Temperatur zu korrelieren, sodass der Betriebspunkt nicht immer konstant ist, sondern zu driften scheint. Die Mittelung der Messpunkte wird deshalb über kürzere Zeitfenster vorgenommen.

6.3 Datenerfassung

Die Signale der unterschiedlichen Sensoren werden über USB-Schnittstellen und Messkarten von NI (National Instruments) zusammengeführt und über LabVIEW aufgezeichnet. Ein Programm für den Verdichterkreislauf wurde von Carsten Hersberger erarbeitet und für Anpassungen für die Kalibrierstrecke zur Verfügung gestellt. Pro Sekunde wird ein Messpunkt für alle eingehenden Grössen aufgezeichnet. Die schnelleren Messungen (z.B. der Spannungsmesskarte mit 33 Messungen pro Sekunde) werden über diese eine Sekunde gemittelt und als Resultat ausgeschrieben. Alle analogen Spannungs- und Stromsignale wurden mittels einer NI-Spannungsmesskarte gemessen und vom Programm in die entsprechenden physikalischen Messgrössen konvertiert. Die Spannungen der Thermoelemente wurden mittels einer NI-Thermoelement-Messkarte gemessen und vom Programm in Temperaturen umgerechnet. Die Messgrössen der Keller-Drucksensoren und des BGA wurden nicht umgerechnet, nur gleich gemittelt.

6.4 Datenaufbereitung

- Mittelung über festgelegtes Zeitfenster
- Standardabweichung über festgelegtes Zeitfenster berechnen
- Heliumanteile über 100% werden durch 99.97% ersetzt.
- Fehlermeldungen des BGA werden durch den vorher gemessenen Wert ersetzt, da die Zusammensetzung des Gemischs während dem Betrieb ziemlich konstant ist.
- Messwerte über 7.5 g/s wurden entfernt, da diese vom Differenzdrucksensor nicht mehr gemessen werden können.

6.5 Untersuchung der Messergebnisse

Die Messungen wurden aufgrund der Daten, verbauten Sensoren und verfügbaren Heliumqualität in folgende Messtage aufgeteilt.

6.5.1 Vergleich der Messergebnisse des Verdichterkreislaufs und der Kalibrierstrecke

Die Sensorsignale der Versuche am PSI mit der Kalibrierstrecke und die Resultate der Versuche an der FHNW mit dem Verdichterkreislauf ergeben ähnliche, aber nicht gleiche Übertragungsfunktionen des Differenzdrucksensors. Die Steigung der Messungen mit dem Verdichterkreislauf in Abbildung 6.9 scheinen schneller mit dem Massenstrom zu steigen. Der Grund für diese Abweichung ist nicht ganz klar. Eine Möglichkeit ist, dass der Differenzdrucksensor nicht dasselbe Signal liefert aufgrund der Verkabelung oder der Einbauweise. Die Einbausituation und Einlaufstrecke des Venturirohrs ist identisch in den beiden Versuchsaufbauten. Es wurde derselbe Sensor (Sensor A) eingesetzt. Die einzige Änderung ist die Länge der Sensorkabel. Eine andere Möglichkeit ist, dass

Messtag	Datum	Heliumqualität	SDP 1 (analog)	SDP 2 (analog)	SDP 3 (digital)
1	25.06.2020	98%	A	-	-
2	14.07.2020	98%	A	-	-
3	20.07.2020	90%	A	-	D
4.1	21.07.2020	90%	A	B	D
4.2	21.07.2020	90%	A	C	D
5.1	22.07.2020	90%	A	C (bidirektional)	D
5.2	22.07.2020	99.97%	A	C	D

Tabelle 6.3: Messtage des Verdichterkreislaufs und der Kalibrierstrecke

die Messgeräte zur Referenz-Massenstrommessung $t\text{-mass}$ und $Promass$ unterschiedliche Signale ausgeben. Aufgrund der Funktionsweise und Unsicherheit des Messgerätes ist das Promass das zuverlässigere Messgerät [30][29]. Der Vergleich der Heliumqualität in Kapitel 6.5.4 zeigt, dass dieser Unterschied nicht allein für diese Abweichung zuständig ist. In einem Versuch mit dem Mockup sind zwei Messpunkte mit dem digitalen $SDP810$ (Sensor D) aufgenommen worden, welche mit den Resultaten der Kalibrierstrecke verglichen werden können. Die zwei Datenpunkte können eine leicht grössere Steigung vermuten lassen. Diese Datenmenge reicht jedoch nicht für eine sichere Bestätigung, dass die Diskrepanz aufgrund des $t\text{-mass}$ vorliegt.

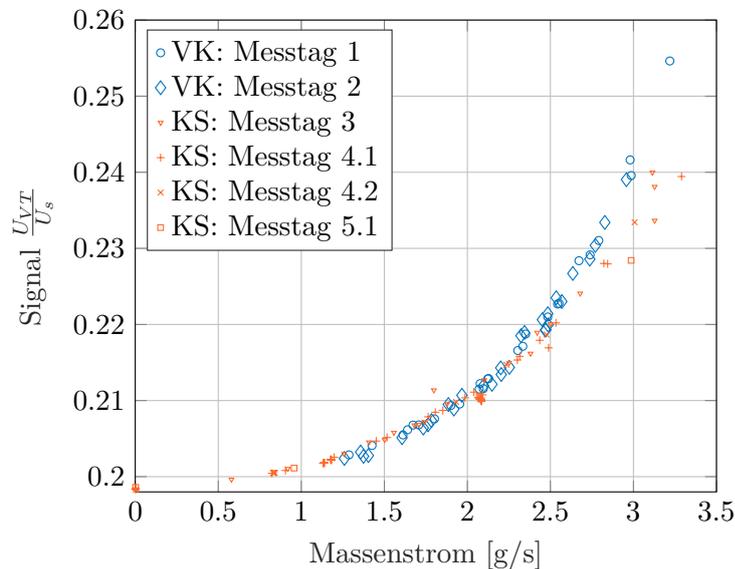


Abbildung 6.9: Vergleich des Sensorsignals des SDP des Verdichterkreislaufs und der Kalibrierstrecke

Die Auswertung der Daten der Versuche und Regressionsanalyse wird ausschliesslich mit Messungen der Kalibrierstrecke durchgeführt (Messtag 3, 4.1, 4.2, 5.1 und 5.2). Dadurch sind die Messtage vergleichbar, da die Messgeräte nicht ändern.

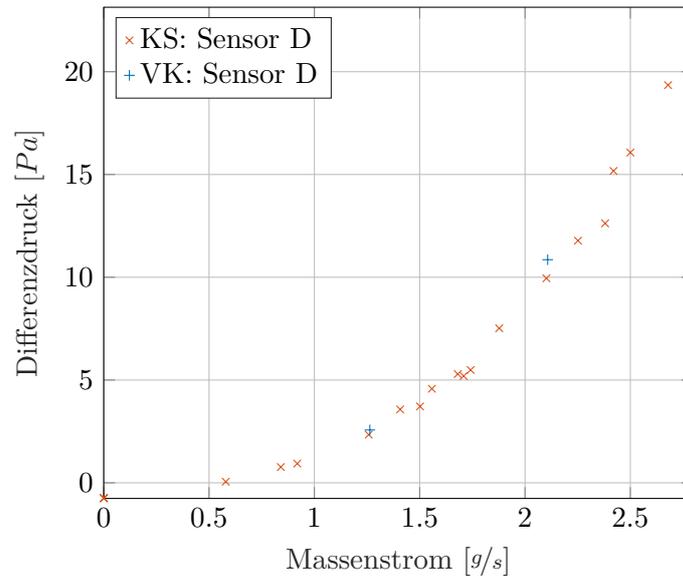


Abbildung 6.10: Vergleich der digitalen Sensorsignale des Verdichterkreislaufs und der Kalibrierstrecke

6.5.2 Vergleich von parallel geschalteten Sensoren

Die Signale der drei verwendeten analogen Sensoren zeigen nicht die gleiche Übertragungsfunktion. Bei der Regressionsanalyse zeigt sich, dass sich die Signale vor allem um einen Skalierungsfaktor unterscheiden, der die Übertragungsfunktion in x-Richtung in Abbildung 6.11 streckt. Der Sensor B und Sensor C wurden am gleichen Tag alternierend eingesetzt, jedoch mit identischen Schlauchlängen, sodass die Signale vergleichbar sind. Diese unterschiedlichen Signale bedeuten, dass die Sensoren individuell kalibriert werden müssen für eine genaue Messung. Solange die Einbauweise gleich ist, könnten mehrere Sensoren für ein Venturirohr kalibriert werden und an Lager gehalten werden, sodass bei Defekt diese schnell ausgetauscht werden können, ohne das Venturirohr ausbauen zu müssen.

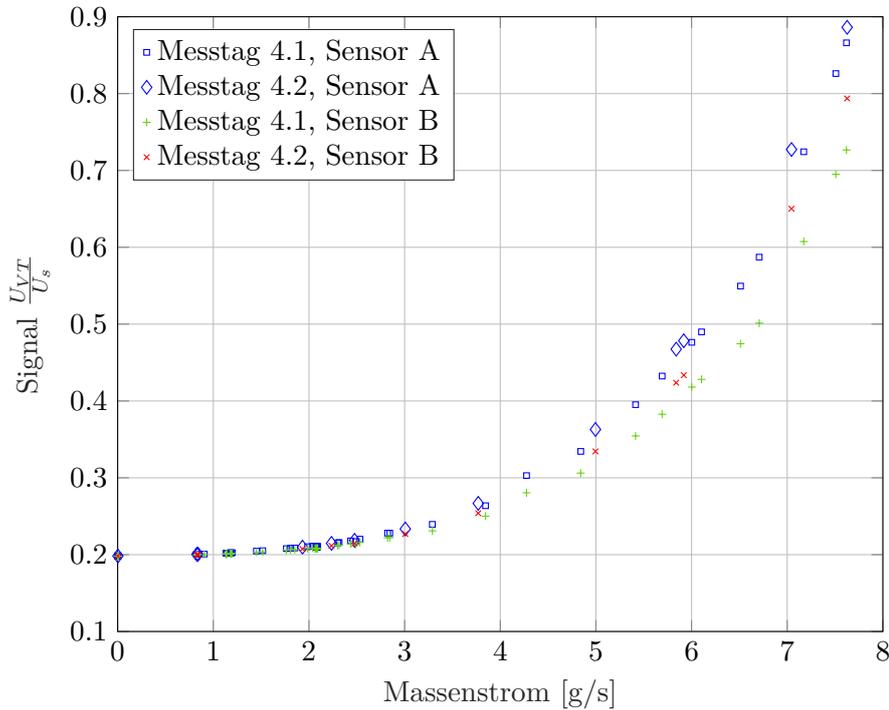


Abbildung 6.11: Vergleich von drei baugleichen Sensoren

6.5.3 Variation der Bedingungen der Kalibrierstrecke

Um das Messverhalten des Venturirohrs mit mikrothermischer Durchflussmessung im Bypass zu untersuchen wurden die drei Parameter Massenstrom \dot{m} , Temperatur T und Druck p variiert. Die Abbildung 6.12 zeigt diese drei Grössen aus verschiedenen Perspektiven über die Messtage mit der Kalibrierstrecke. Es ist offensichtlich im obersten Plot, dass der Druck abhängig vom Massenstrom ist, wie in Kapitel 6.2.6 angemerkt. Die anderen Grössen zeigen keine klare Abhängigkeit und wurden somit unabhängig voneinander variiert. Die Messungen bei ca. 35°C häufen sich im untersten Plot. Messungen bei grossen Massenströmen konnten nur bei tieferen Temperaturen bis ca. 50°C durchgeführt werden.

In Abbildung 6.13 fällt auf, dass die Krümmung der Übertragungsfunktion des SDP (Sensirion Differential Pressure Sensor) eine grössere, positive Krümmung aufweist. Die Beziehung 3.19 ist vermutlich nicht zutreffend für die Mengemessung mit dem SDP. Der maximale Differenzdruck in Abbildung 6.14 ist ca. 280 Pa . Der Sensor ist für bis zu 500 Pa Differenzdruck mit Luft kalibriert. Der Sensor geht somit in der Anwendung mit Helium schon früher in Sättigung.

In Abbildung 6.14 ist ersichtlich, dass das Signal des Differenzdrucksensors nicht wirklich den Differenzdruck abbildet. Der Differenzdruck, welcher gemäss Beziehung 3.19 über dem Venturirohr herrschen sollte variiert viel stärker je nach Druck und Temperatur als das Signal des SDP. Dies weist darauf hin, dass die Temperatur- und Druckempfindlichkeit deutlich kleiner ist als beim herkömmlichen Venturirohr. Für den Einsatz im Mu3e-Experiment sollte dies vorteilhaft sein, da vor allem die Temperaturen beim Hochfahren variieren und sich möglicherweise von den Bedingungen beim Kalibrieren unterscheiden.

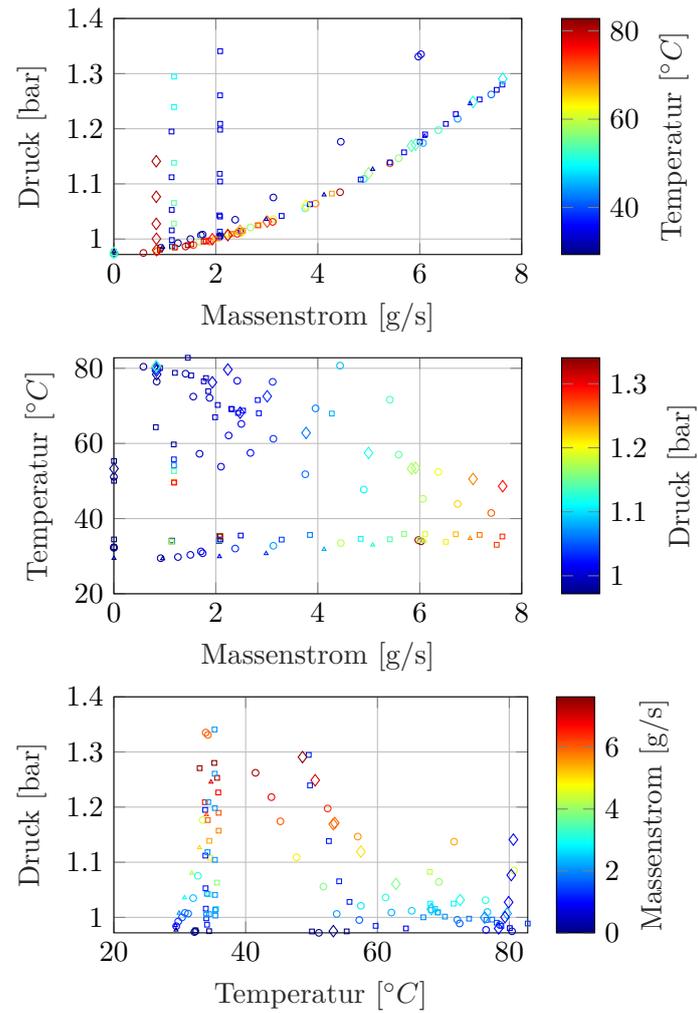


Abbildung 6.12: Bedingungen der Messungen (Messtag 3 bis 5.1)

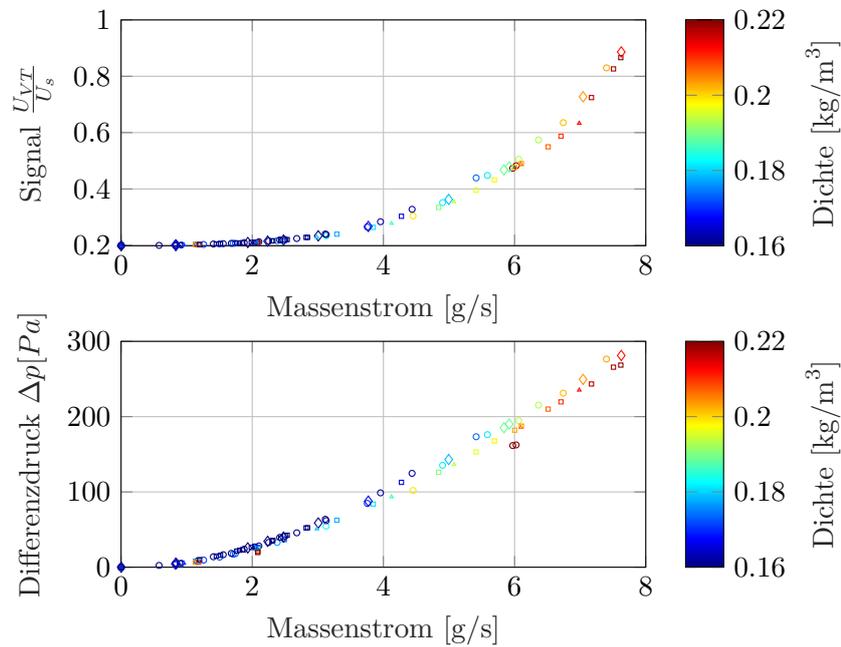


Abbildung 6.13: Vergleich des berechneten Differenzdruck und des Sensorsignals, farbcodiert gemäss der berechneten Dichte

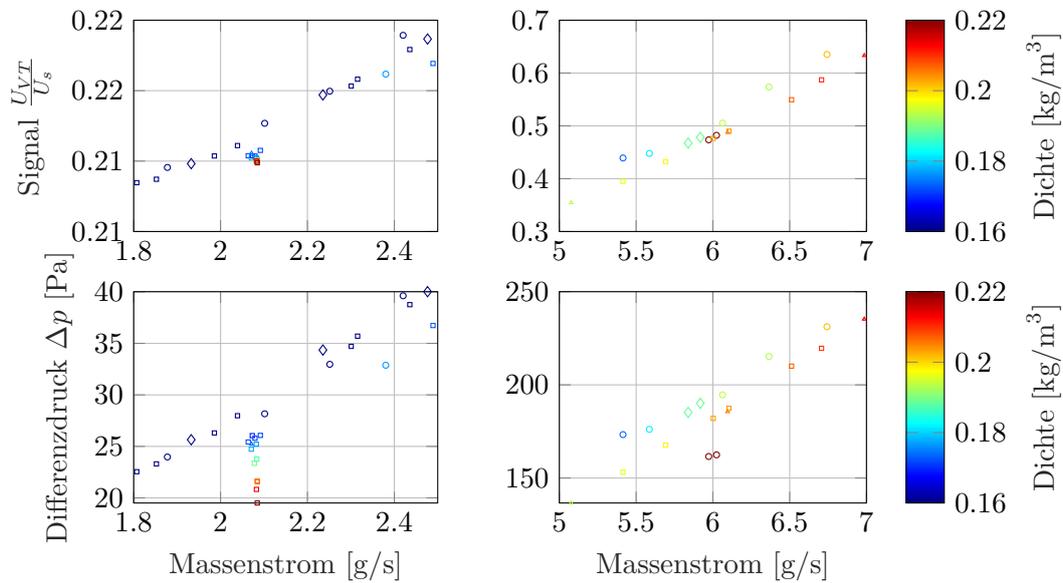


Abbildung 6.14: Sensorsignal und berechneter Differenzdruck, farbcodiert gemäss der berechneten Dichte

6.5.4 Variierender Fremdgasanteil

Die Messergebnisse mit Helium aus der Rückgewinnung und Helium 4.6 ergeben auf den ersten Blick sehr ähnliche Resultate in Abbildung 6.15. Der Sensor ist somit grundsätzlich für beide Medien einsetzbar. Der SDP wird für trockene Luft und Stickstoff kalibriert. Er liese sich jedoch für andere Gase kalibrieren und einsetzen.

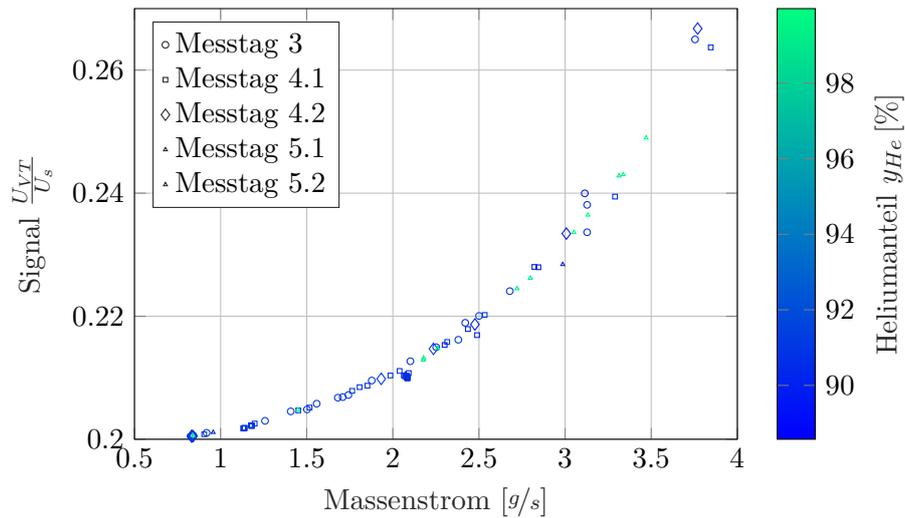


Abbildung 6.15: Sensorsignal und berechneter Differenzdruck, farbcodiert gemäss der berechneten Dichte

6.6 Unsicherheitsanalyse der Kalibrierstrecke

Die Messgeräte der Kalibrierstrecke und die Sensoren des Venturirohrs weisen unterschiedliche Unsicherheiten auf. Um die Qualität der Kalibrierung des Venturirohrs zu beurteilen, wird die Unsicherheit der Referenzmessung und die Unsicherheit des Signal des Differenzdrucksensors berechnet. Die Beiträge zur Unsicherheit in Tabelle 6.5 und 6.4 entstammen den Datenblätter der verwendeten Sensoren und Messgeräte, welche im digitalen Anhang G abgelegt sind, oder werden bei der Mittelung der Rohdaten aus der Streuung der Messungen berechnet. Einzelne Beiträge zur Unsicherheit, wie die Kabellänge, Kontaktwiderstände, variierende Umgebungstemperatur usw. sind nicht berücksichtigt, da diese sehr viel kleiner ausfallen als die berücksichtigten Beiträge. Die berechneten Standardunsicherheiten sind in Abbildung 6.16 für Messtag 3 absolut und relativ dargestellt. Abbildung 6.17 zeigt die erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) beider Grössen. Es ist erkennbar, dass die Messung des Referenzmessgeräts im Vergleich mit dem Signal sehr sicher ist. Dabei verschwinden die Fehlerbalken des Massenstroms bei kleinen Massenströmen im Marker.

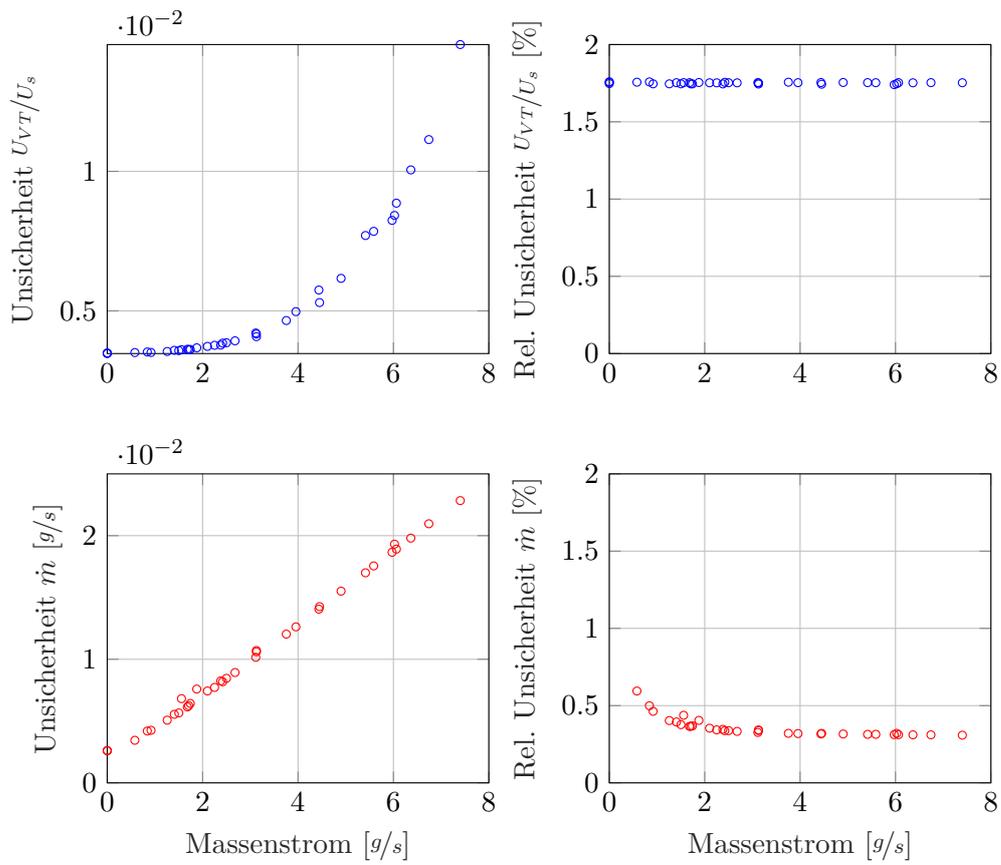


Abbildung 6.16: Standardunsicherheit der Referenz-Mengenmessung und des Signals des SDP

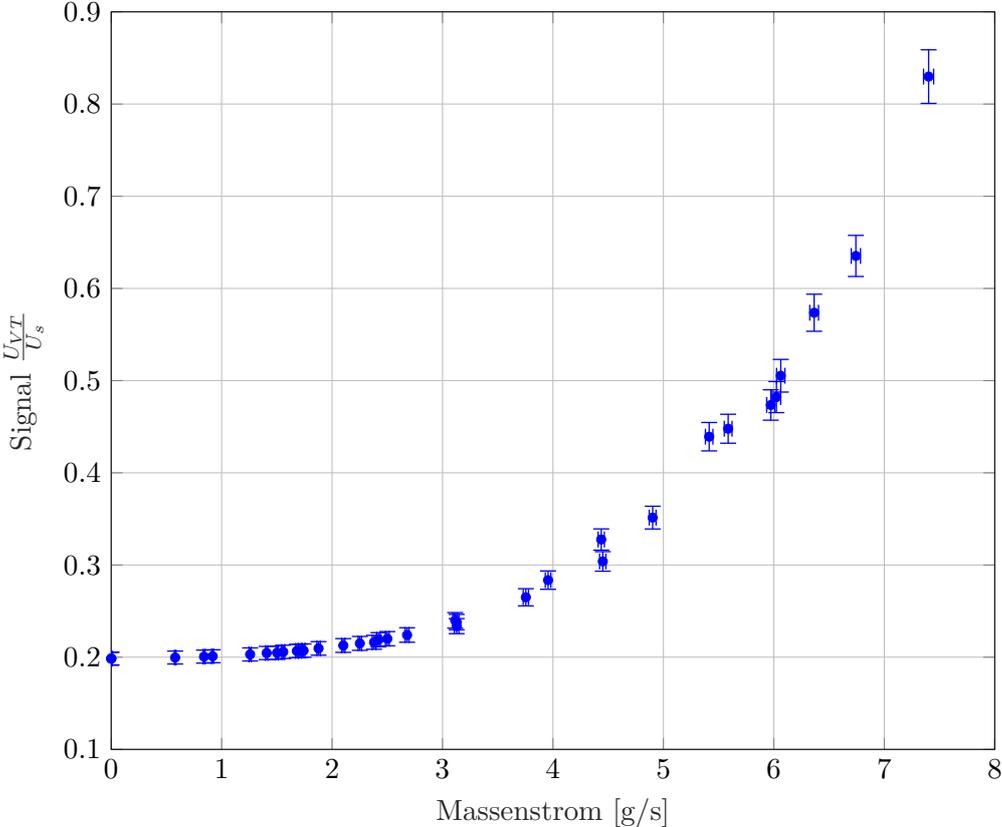


Abbildung 6.17: Erweiterte Unsicherheit der Messgrößen (k=2, Messtag 3)

6.6.1 Unsicherheit des Signal des Differenzdrucksensors

Die Unsicherheit des Signals setzt sich zusammen aus den Unsicherheiten der beiden gemessenen Spannungen U_{VT} und U_s und wird gemäss Fehlerfortpflanzung berechnet (Gleichung 6.5). Die Beiträge der Unsicherheiten werden quadratisch addiert (Gleichung 6.3 und 6.4). Aus

Grösse	Unsicherheitsquelle	Fehler ε	Einheit	Verteilung
u_{span}	Messunsicherheit SDP [7]	± 3	%	Rechteck
u_0	Nullpunkt SDP [7]	± 0.02	%	Rechteck
u_T	Temperaturdrift SDP [7]	$\pm 0.5 \cdot \left \frac{T-25^\circ C}{10} \right $	%	Rechteck
$s(U_{VT})$	Typ A	$\frac{\sigma(U_{VT})}{\sqrt{N}}$	$\frac{g}{s}$	normal
$s(U_s)$	Typ A	$\frac{\sigma(U_s)}{\sqrt{N}}$	$\frac{g}{s}$	normal
$u_{U_{VT}}$	Messkarte [31]	± 2690	μV	Rechteck
u_{U_s}	Messkarte [31]	± 2690	μV	Rechteck

Tabelle 6.4: Beiträge zur Messunsicherheit des Differenzdrucksignals

$$u_{U_{VT}}^2 = u_{span}^2 + u_0^2 + u_T^2 + u_{s(U_{VT})}^2 + u_{U_{NI}}^2 \quad (6.3)$$

$$u_{U_s}^2 = u_{s(U_s)}^2 + u_{U_{NI}}^2 \quad (6.4)$$

$$u_{Signal}^2 = \frac{u_{U_{VT}}^2}{U_s^2} + \frac{u_{U_s}^2 \cdot u_{U_s}^2}{(U_s^2)^2} \quad (6.5)$$

Aus Abbildung 6.18 geht hervor, dass die 3% Unsicherheit des SDP den grössten Beitrag zur Unsicherheit darstellt.

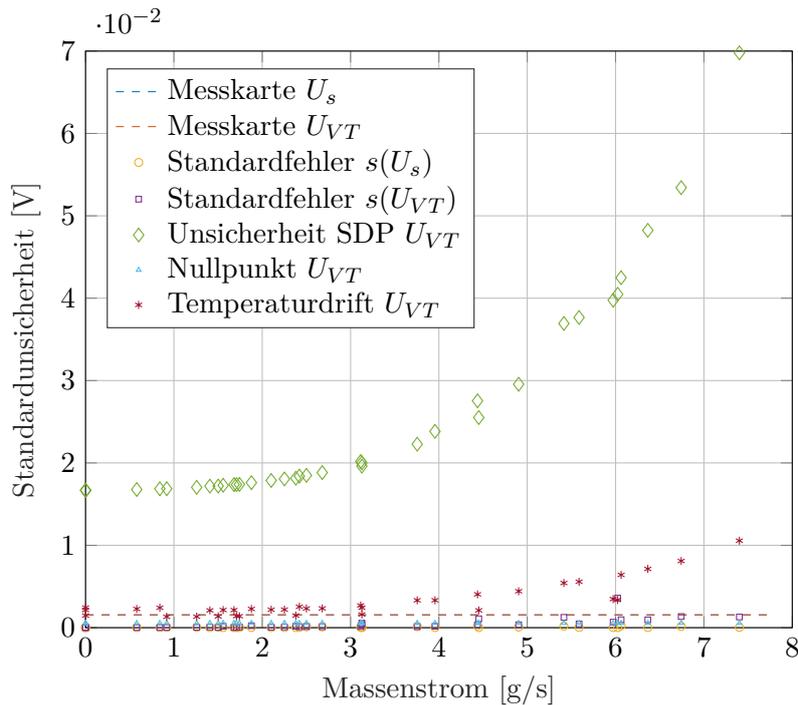


Abbildung 6.18: Beiträge zur Unsicherheit des Signals des Differenzdrucksensors

6.6.2 Unsicherheit der Referenz-Massenstrommessung

Die Unsicherheit des *Promass* gemäss Gleichung 6.8 setzt sich aus der Unsicherheit der Spannungsmessung u_U aus Gleichung 6.6, der Unsicherheit der Datenpunkte und der des Messgeräts zusammen. Die Unsicherheit gemäss Gleichung 6.6 kommt aufgrund der Spannungsmessung über den $500\ \Omega$ -Widerstand u_{U_R} der Messkarte u_{N_I} und des analogen Stromausgangs des *Promass* u_I zusammen. Da der Massenstrom durch lineare Interpolation zwischen 4 und $20\ mA$ zustande kommt, wird in Gleichung 6.7 die Unsicherheit der Spannung über den Massenstrom und den dabei erwarteten Strom berechnet.

Grösse	Unsicherheitsquelle	Fehler ε	Einheit	Verteilung
$u_{Coriolis}$	Messgerät [30]	± 0.5	%	Rechteck
u_I	analoger Ausgang [30]	± 0.05	%	Rechteck
$s(\dot{m})$	Typ A	$\frac{\sigma(\dot{m})}{\sqrt{N}}$	$\frac{g}{s}$	normal
u_{N_I}	Messkarte [31]	± 2690	μV	Rechteck
u_R	Widerstand	± 0.1	Ω	Rechteck

Tabelle 6.5: Beiträge zur Messunsicherheit der Referenz-Massenstrommessung

$$u_U^2 = u_{U_{N_I}}^2 + u_{U_R}^2 + u_{U_I}^2 \quad (6.6)$$

$$u_{U_R}^2 = u_R^2 \cdot \left(\dot{m} \cdot \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\dot{m}_{\max}} + I_{\min} \right)^2 \quad (6.7)$$

$$u_m^2 = u_U^2 \cdot \left(\frac{\dot{m}_{\max}}{U_{\max} - U_{\min}} \right) + u_{s(\dot{m})}^2 + u_{m_{\text{Coriolis}}}^2 \quad (6.8)$$

7 Kalibrierung der Mengenummessung

In diesem Kapitel werden die bereinigten Messdaten der Versuche der Kalibrierstrecke verwendet, um das Venturirohr als Durchflussmessgerät zu kalibrieren. Kalibrieren bedeutet in dem Kapitel, dass eine Modellgleichung gesucht wird, die die Messgrößen des Venturirohrs (Differenzdruck, Druck, Temperatur, usw.) als Beobachtungen nimmt und den Massenstrom zurückgibt. Dafür wird die Modellgleichung analytisch beschrieben, in einem zweiten Schritt durch Ausgleichen der Modellparameter an die Messdaten angepasst und im letzten Schritt die nichtlineare Gleichung aufgestellt, mit der die Messresultate berechnet werden können. Dieser Prozess wird beispielhaft mit einem Datensatz durchgeführt, sodass eine kalibrierte Modellgleichung mit einem weiteren Satz von Daten getestet werden kann.

7.1 Modellgleichung zur Mengenummessung mittels Venturirohr

Die Messdaten zeigen, dass die Temperatur im Bypass deutlich näher an der Umgebungstemperatur liegt als an der Temperatur des Gases im Venturirohr. Aus diesem wird die Gleichung 3.23 aus dem Theoriekapitel 3.4 herangezogen, welche mit zwei unterschiedlichen Temperaturen im Bypass und Venturirohr rechnet.

$$\dot{m} = C_D \cdot \varepsilon \cdot \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \cdot \sqrt{\dot{m}_{BP} \cdot \mu_{BP} \cdot \frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \quad (3.23)$$

Die konstanten Größen (A , β , ε) können in die Fitparameter integriert werden, da diese ebenfalls konstant sind. Die Viskosität μ_{BP} trägt, wie es sich in der späteren Regressionsanalyse herausgestellt hat, nicht zur Genauigkeit des Modells bei. Diese Viskosität μ_{BP} ist von der Temperatur T_{BP} im Bypass abhängig, jedoch ändert diese Temperatur in den Versuchen aufgrund der Länge der Silikonschläuche nur sehr gering. Die Viskosität ist somit annähernd konstant und wird ebenfalls in einen der Fitparameter integriert. Die Temperatur im Bypass wird im Term $\frac{T_{BP}}{T_{VT}}$ beibehalten, obwohl sie annähernd konstant ist, um einen dimensionslosen Faktor zu erhalten. Es wird folgende Modellgleichung verwendet.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot C_D \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (7.1)$$

Dabei ist die Durchflusszahl gemäss folgender Gleichung einzusetzen.

$$C_D = 1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{Re_{VT}}} \quad (4.1)$$

Die bei Beziehung 4.1 eingesetzten Größen entsprechen dem nichtlinear gefitteten Verlauf der Durchflusszahl aus der Simulation des Venturirohrs mit gerader Einlaufstrecke. Die drei Modellparameter übernehmen folgende Funktionen.

β_1 Skalierungsfaktor zum Strecken und Stauchen der Ausgleichsfunktion

β_2 Nullpunktverschiebung korrigieren

β_3 Exponent der Potenzfunktion

Die Modellgleichung 7.1 beschreibt eine Potenzfunktion mit drei unbekanntem Parametern. In allgemeiner Form:

$$y = a + b \cdot x^c$$

Der Grund, hier eine allgemeine Potenzfunktion anstelle einer Parabel mit Exponent $c = 2$ zu nehmen ist auf die Betrachtung der Messgrößen im doppelt logarithmischen Diagramm in Abbildung 7.1 zurückzuführen. Bei doppelt logarithmischer Betrachtung werden Potenzfunktionen zu Geraden.

$$\log(y) = \log(a) + c \cdot \log(x)$$

Die eingezeichnete Gerade in Abbildung 7.1 weist eine Steigung von $c \approx 3.3$ auf. Die Gerade bildet eine leichte Abweichung von den Messpunkten. Die Konsequenz ist, dass mit der Approximation als Potenzfunktion ein kleiner Linearitätsfehler entsteht. Gemäss Sensirion, dem Hersteller des

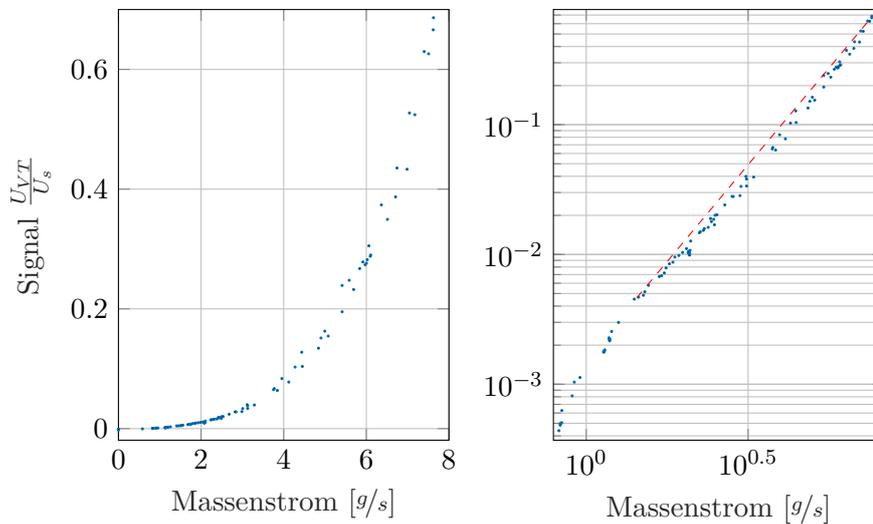


Abbildung 7.1: Linear und logarithmisch aufgetragene Übertragungsfunktion des Venturirohrs

SDP wird der Sensor für Stickstoff und trockene Luft kalibriert. Dabei wird das Ausgangssignal linearisiert, sodass ein linearer Zusammenhang zwischen Differenzdruck und Signal besteht. Das Rohsignal des Sensorchips ist jedoch nichtlinear und aufgrund der Eigenschaften von Helium ist eine entsprechende Abweichung zu erwarten [32].

7.2 Regressionsanalyse des Venturirohrs

Die Modellgleichung aus Kapitel 7.1 wird übernommen. Die Parameter sollen ausgeglichen werden, sodass die Modellgleichung die Messergebnisse möglichst gut beschreibt. Gemäss Kapitel 3.8 werden dem Solver folgende Eingangsgrößen für die nichtlineare Regression eingegeben.

- Die Modellgleichung symbolisch in der Form

$$y = f(X, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$$

Die x-Achse der Übertragungsfunktion in Abbildung 7.2 entspricht diesen Werten.

Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert
β_1	9.0891	0.0282	$3.46 \cdot 10^{-146}$
β_2	-0.2007	0.000089	$1.76 \cdot 10^{-226}$
β_3	0.2993	0.00167	$5.31 \cdot 10^{-122}$
Beobachtungen		98	
Freiheitsgrade		95	
Root Mean Squared Error		0.0671	
Bestimmtheitsmass R^2		0.999	
adjust. Bestimmtheitsmass R_{adj}^2		0.999	

Tabelle 7.1: Statistik der Regressionsanalyse für Messtag 3 bis 5.1 ohne Gewichtung

- Der Massenstrom als Resultat des *Promass* als Referenzmessgerät:

$$y = [\dot{m}]$$

- Die restlichen Messgrößen als Beobachtungen in der Matrix X :

$$X = \left[\begin{array}{cccc} T_{BP} & T_{VT} & \frac{U_{VT}}{U_s} & \text{Re}_{VT} \end{array} \right]$$

Dabei entspricht eine Zeile einem Datenpunkt in Abbildung 7.2.

- Es wird eine erste Approximation der Modellparameter als Vektor β_0 eingegeben:

$$\beta_0 = \left[\begin{array}{ccc} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \end{array} \right]$$

Die Parameter können ungefähr geschätzt werden. Die Nullpunktverschiebung des Signals ist ca. 0.2, also ist $\beta_1 \approx -0.2$. Der Exponent ist ungefähr $\beta_2 \approx 1/3.3$ und der Skalierungsfaktor β_3 wird anfänglich 1 gesetzt. An dieser Stelle könnte dem Solver eine Gewichtung w vorgegeben werden, wenn gewisse Messpunkte stärker gewichtet werden sollen. Bei der Optimierung der Residuen werden dann die gewichteten, quadratischen Fehler optimiert.

$$S(\beta_1, \beta_2, \dots) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot [\dot{m}_i - f(x_i)]^2$$

Diese Strategie der Optimierung wird im Kapitel 7.4 angewendet, sodass trotz gleichmässiger Verteilung der Messpunkte, die Messungen im Bereich von z.B. 5 g/s besser angenähert werden, sodass das kalibrierte Modell in diesem Bereich am genauesten misst. Die Datenpunkte mit $\dot{m} < 1 \text{ g/s}$ werden nicht berücksichtigt, da die Modellgleichung in diesem Bereich nicht genau sein muss für den geforderten Messbereich. Wie in Abbildung 7.1 bei kleinen Massenströmen erkennbar ist, folgt die Übertragungsfunktion dort keiner Potenzfunktion (rot gestrichelte Gerade rechts).

Gemäss Tabelle 7.1 sind die drei Parameter

$$\beta = \left[\begin{array}{ccc} 9.0891 & -0.2007 & 0.2993 \end{array} \right].$$

Diese Werte können für eine schnelle und erfolgreiche Konvergenz in weiteren Regressionsanalysen als Schätzung β_0 verwendet werden, um die Modellparameter für weitere Messgeräte zu bestimmen.

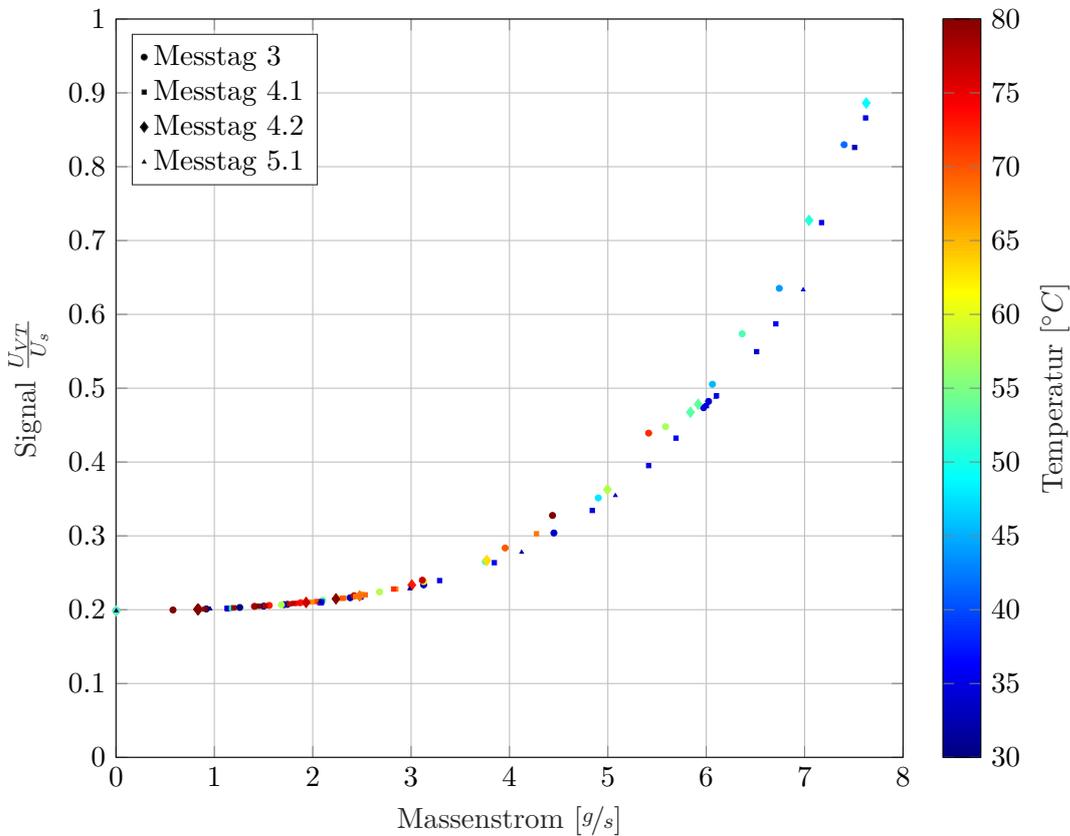


Abbildung 7.2: Beobachtungen der Messtage 3 bis 5.1 zur Kalibrierung

7.2.1 Beurteilung der Resultate der Regressionsanalyse

Zusätzlich zu den ausgeglichenen Parametern ergibt die Regressionsanalyse die folgenden Kennzahlen. Diese werden zur Beurteilung der Qualität des gewählten Modells und der einzelnen Parameter verwendet. Die Resultate der Regressionsanalyse sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

MSE und RMSE Der *MSE* ist der mittlere, quadratische Fehler des Modells, was als Varianz des Modells interpretiert werden kann. Dazu kann der *RMSE* (Root Mean Squared Error) als Wurzel des *MSE* als Standardabweichung des Fehlers des Modells betrachtet werden. Um diesen Term streuen die Messwerte um das Modell. Bei der gewichteten, nichtlinearen Regression die Fehler unterschiedlich gewichtet. Deshalb wird der RMS der Regression ebenfalls mit den gewichteten Abweichungen gebildet und kann somit kleiner sein als der herkömmlich berechnete RMS. Der RMS der Regression ist 0.0671 und damit viel kleiner als die Messwerte in g/s , was eine gute Beschreibung der Messpunkte bedeutet.

Bestimmtheitsmass Das Bestimmtheitsmass R^2 beschreibt, wie viel der Variation der Messgröße \dot{m} durch das Modell beschrieben wird. R_{adj}^2 hingegen ist das adjustierte

Bestimmtheitsmass, welches für gute Bestimmtheit hoch ist, aber mit der zunehmenden Anzahl von Parametern abnimmt. Damit kann man erkennen, ob ein Modell Gefahr läuft, durch eine übermässige Anzahl Parameter zu stark an den gegebenen Datensatz gefittet zu werden. Dieses sogenannte *Overfitting* führt zu schlechten Modellen, die keine zuverlässigen Voraussagen für weitere Messungen machen können. Beide Werte sind 0.999. Das Modell erklärt somit fast alle Variationen der Messungen.

Standardfehler Der Standardfehler s oder *Standard Error SE* ist der Standardfehler der einzelnen gefitteten Parameter (Kapitel 3.6, Gleichung 3.26). Die Standardfehler der Parameter sind allesamt klein im Vergleich mit dem Wert des Parameters (min. Faktor 180).

p-Wert Der sog. p – *Value* ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese nicht stimmt und sollte deutlich unterhalb 0.05 liegen. Die Nullhypothese besagt, dass der Parameter null ist und nicht relevant ist für das Modell. Alle p-Werte sind sehr klein, was unter anderem auf die grosse Anzahl Datenpunkte zurückzuführen ist. Es sind somit alle Parameter aussagekräftig und relevant für das Modell.

Zur Beurteilung des Erfolgs der Regression und der Richtigkeit des Modells werden zusätzlich die Residuen betrachtet. Die Residuen ε sind die Abweichungen der Modellgleichung von den realen Messdaten gemäss Gleichung 7.2. Diese sind die Differenzen, die quadratisch minimiert werden sollen.

$$\varepsilon_i = f(X, \beta) - \dot{m} \quad (7.2)$$

Es ist auffällig, dass die Residuen in Abbildung 7.3 für kleine Massenströme sehr gross und das Modell dadurch ungenau werden. Es ist über den Bereich $2 \dots 7 \text{ g/s}$ ein Trend in Form einer negativen Krümmung festzustellen. Dies ist auf den Linearisierungsfehler, der bei der Betrachtung von Abbildung 7.1 vermutet wird zurückzuführen. Für eine gute Beschreibung der Übertragungsfunktion durch das Modell muss dieser Trend ausgemerzt werden. Bei der idealen Beschreibung der Messdaten durch das Modell werden die Residuen klein und sind zufällig verteilt.

Die relativen Abweichungen $u_{rel} = \varepsilon_i / \dot{m}_i$ zeigen wie gross die Residuen relativ zum effektiven Massenstrom ist. Auch hier ist die Unsicherheit im Bereich $3 \dots 6 \text{ g/s}$ am besten, aber schlägt bei kleinen Massenströmen aufgrund der Definition des relativen Fehlers noch stärker aus. Es gibt zwei Strategien zur Optimierung bei der Kalibrierung. Die hier gezeigte Variante minimiert die absoluten Abweichungen des Modells von den Messdaten. Die Alternative optimiert die logarithmischen Abweichungen. Dafür werden die Modellgleichung und die Beobachtungen vor der Regressionsanalyse logarithmieren. Dies führt dazu, dass der relative Fehler über den Messbereich eher konstant gehalten wird als der absolute Fehler. Für einen grossen Messbereich ist es möglicherweise sinnvoll, den relativen Fehler über den ganzen Messbereich konstant zu halten. Für Messgeräte mit einem Soll-Betriebspunkt macht es mehr Sinn, den absoluten Fehler, um diesen Betriebspunkt zu minimieren. Diese Strategie ergibt effektiv andere Modellparameter als die durchgeführte Regressionsanalyse.

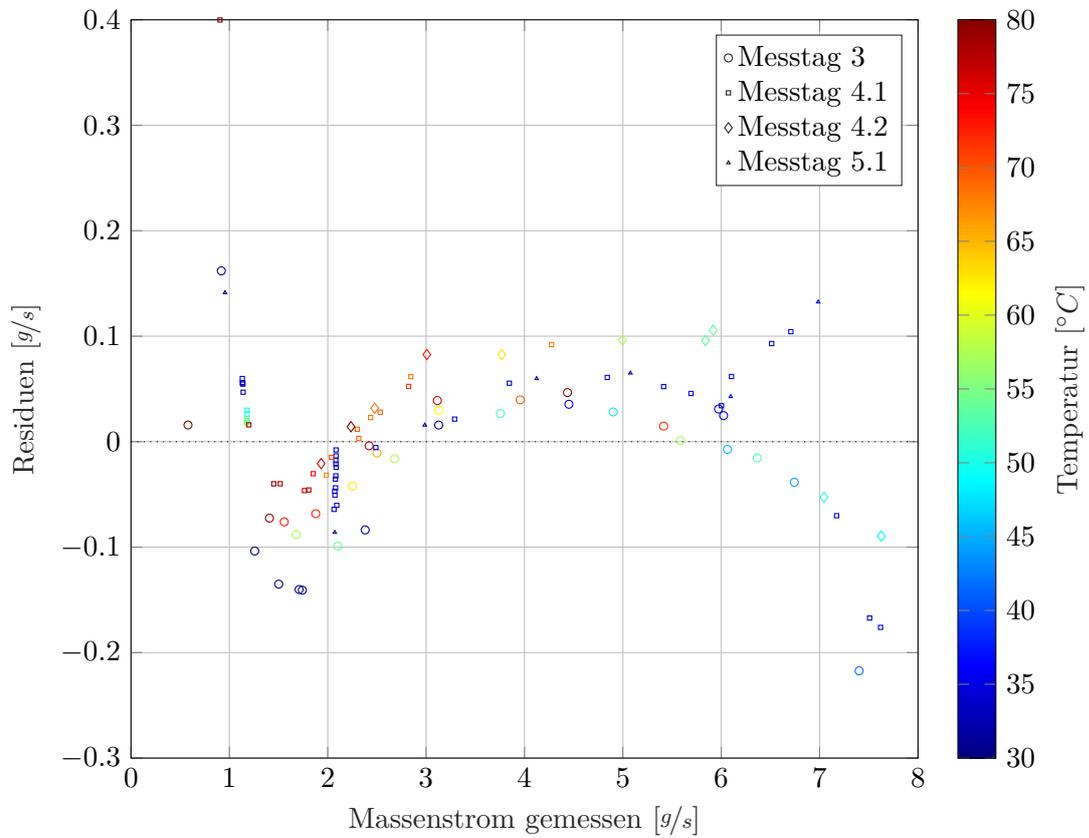


Abbildung 7.3: Residuen des Modells

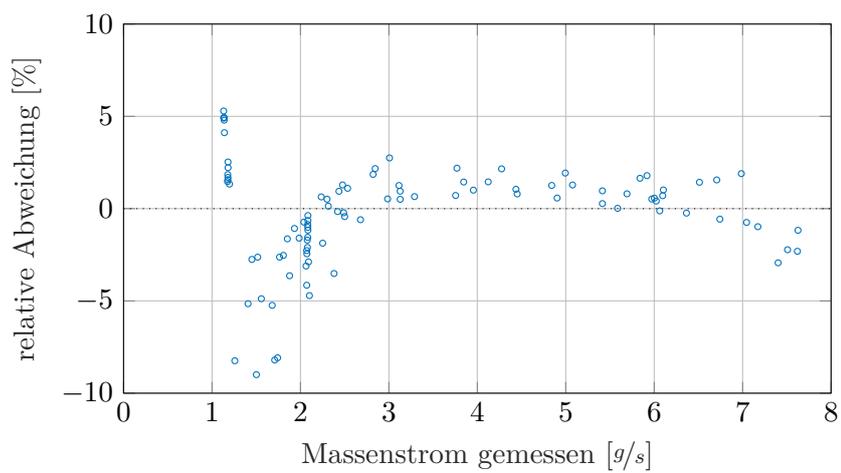


Abbildung 7.4: Relativer Fehler des Modells

7.3 Tangentenverfahren zur Bestimmung der Messresultate anwenden

Mit den bestimmten Parametern und den gemessenen Grössen (Signal des SDP, Temperaturen und Druck) lässt sich der Massenstrom über die Modellgleichung 7.1 gemäss dem Newtonschen Tangentenverfahren aus Kapitel 3.9 berechnen. Dazu wird die Gleichung nach Null umgestellt. Zur Bestimmung der Reynolds-Zahl wird noch die Zähigkeit des Heliums im Venturirohr benötigt. Dieser Wert ist in Abhängigkeit des Drucks und der Temperatur im Venturirohr aus Tabellen zu bestimmen und wird hier mithilfe von REFPROP bewerkstelligt und in die Gleichung 7.3 eingesetzt.

$$0 = \dot{m} - \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot \left(1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{\dot{m} \cdot 4 \cdot D}{\mu_{VT}}}} \right) \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (7.3)$$

Die einzige unbekannte Grösse ist nun der Massenstrom. Als erste Annäherung kann entweder ein fester Wert (z.B. 5 g/s) gewählt werden oder ein besserer Schätzwert, der das Resultat approximiert.

$$x_0 = \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (7.4)$$

Dieser Wert ähnelt der Modellgleichung, benötigt jedoch nur das Signal des SDP und verringert die benötigten Iterationsschritte des Tangentenverfahrens. Mithilfe der Iterationsvorschrift 3.37 wird der Massenstrom als x-Achsenabschnitt gemäss Abbildung 7.5 bestimmt.

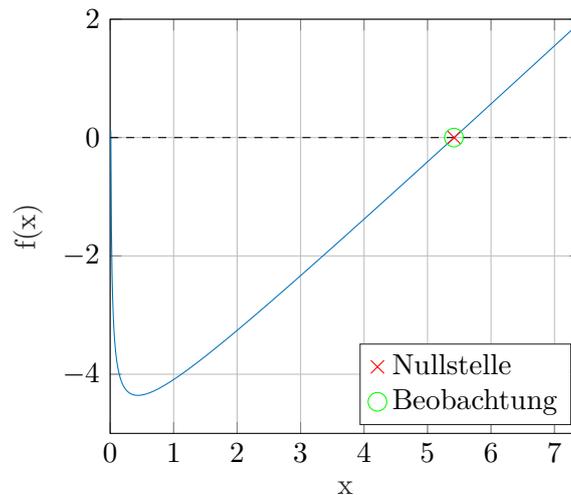


Abbildung 7.5: Anwendung des Tangentenverfahrens

Die Abweichung der Beobachtung (Messwert des Referenzmessgeräts) und der Nullstelle entspricht dem Fehler der Modellgleichung, der den Residuen in Abbildung 7.3 entspricht. Die Iterationsvorschrift soll solange wiederholt werden, bis der durchschnittliche Fehler des Modells deutlich grösser ist als der Unterschied zwischen den Iterationen.

7.4 Anwendung der Kalibrierung des Venturirohrs

In diesem Kapitel werden die Parameter des Modells aus Kapitel 7.2 mithilfe nichtlinearer Regression bestimmt, wobei nur die Messdaten von Messtag 5.1 zur Kalibrierung verwendet werden.

Anschliessend werden die Messdaten der restlichen Messtage verwendet, um die Zuverlässigkeit des kalibrierten Modells zu testen. Dieser Test wird zweimal durchgeführt, einmal mit Soll-Massenstrom 3 g/s und einmal mit 5 g/s .

7.4.1 Regressionsanalyse für 5 g/s

Im Folgenden wird beispielhaft mit sechs Messpunkten ein Venturirohr für einen Soll-Massenstrom von 5 g/s kalibriert und getestet. Die Messdaten sind gleichmässig verteilt über den Bereich $2 \dots 7\text{ g/s}$. Es wird eine Gewichtung vorgenommen, sodass die Messpunkte um 5 g/s am stärksten gewichtet werden (siehe Abbildung 7.6). Die hier gewählte Gewichtung entspricht einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichte $\mathcal{N}(5, 2)$. Wenn die Messpunkte gezielt auf den Soll-Massenstrom konzentriert aufgenommen werden, muss keine Gewichtung vorgenommen werden. Die nachträgliche Gewichtung simuliert, dass mehr Punkte im Soll-Bereich aufgenommen wurden.

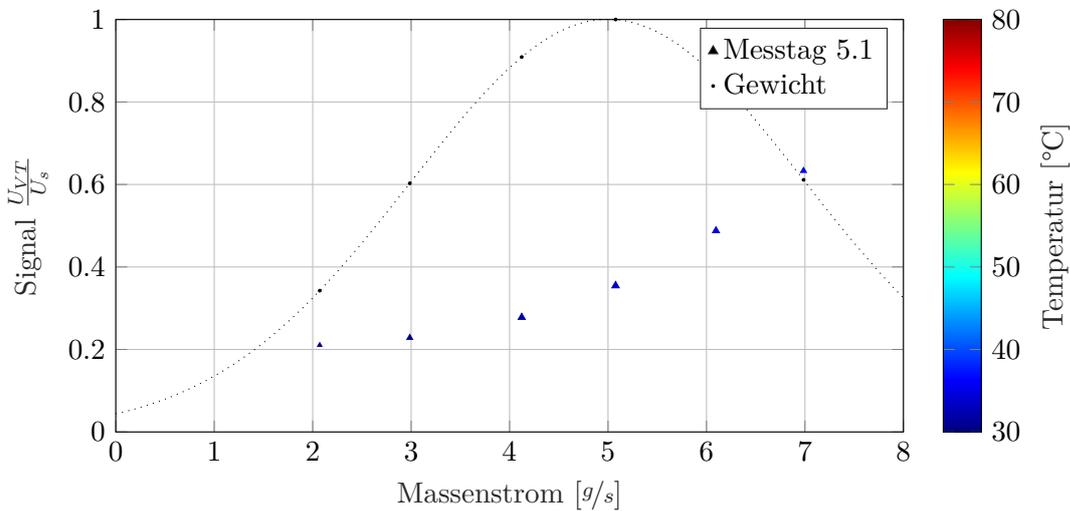


Abbildung 7.6: Gewichtung der Beobachtungen von Messtag 5.1 mit Soll-Massenstrom 5 g/s

Die Resultate der Regressionsanalyse ähneln den Resultaten der Statistik gemäss Tabelle 7.1. Die p-Werte sind kleiner aufgrund der geringeren Anzahl Datenpunkte.

Die Regressionsanalyse ergibt die Residuen gemäss Abbildung 7.7. Diese sind klein, scheinen aber auch eine Krümmung aufzuweisen, wie in Abbildung 7.3.

7.4.2 Anwenden des für 5 g/s kalibrierten Modells

Mit dem Tangentenverfahren und der Modellgleichung mit den ausgeglichenen Modellparametern werden die Massenströme berechnet. Dazu werden die Messungen (Temperaturen, Signal) und die berechnete Viskosität in die Funktion 7.3 mit den Parametern gemäss den Resultaten der Regression aus Tabelle 7.2 eingesetzt.

$$0 = \dot{m} - \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot \left(1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{\dot{m} \cdot 4 \cdot D}{\mu_{VT}}}} \right) \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (7.3)$$

Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert
β_1	9.203	0.0732	$1.108 \cdot 10^{-6}$
β_2	-0.2025	0.00101	$2.74 \cdot 10^{-7}$
β_3	0.2968	0.00566	$1.53 \cdot 10^{-5}$
Beobachtungen		6	
Freiheitsgrade		3	
Root Mean Squared Error		0.0134	
Bestimmtheitsmass R^2		1	
adjust. Bestimmtheitsmass R_{adj}^2		1	

Tabelle 7.2: Statistik der Regressionsanalyse für 5 g/s

Die Messung mittels Venturirohr wird mit den Messwerten des Referenzmessgeräts verglichen, indem die Fehler ε_i berechnet werden.

$$\varepsilon_i = \dot{m}_{VT} - \dot{m}_m$$

Hierbei handelt es sich nun effektiv um Messfehler, nicht mehr um Residuen. Der RMS der Messfehler der einzelnen Messtage wird gebildet, um die Streuung der berechneten Massenströme des Venturirohrs um den effektiven Massenstrom zu beschreiben.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}$$

Unterhalb von ca. 1.2 g/s kann kein Massenstrom berechnet werden (NaN). Wenn die dort gemessenen Signale in die Modellgleichung eingesetzt werden, kann es sein, dass der Term in der Klammer

$$\left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3}$$

negativ wird, weil $\beta_2 \approx -0.2$ ist. Weil der Exponent β_3 kleiner als 1 ist, wird der ganze Ausdruck komplex und kann nicht mehr mit dem Tangentenverfahren gelöst werden. Die Messfehler werden für kleine und grosse Massenströme grösser. Das Modell ist nicht gut geeignet für kleine Massenströme unter 2 g/s und wird wieder ungenau bei grossen Massenströmen über 7 g/s. Die Messfehler des Modells für 5 g/s sind in Abbildung 7.8 bei 3 g/s am kleinsten, wie beabsichtigt. Die wichtigste Erkenntnis aus Abbildung 7.8 ist, dass der Messfehler für die Daten der Messtage mit derselben Heliumqualität im Bereich 2...7 g/s unter ± 1.2 g/s bleibt.

7.4.3 Regressionsanalyse für 3 g/s

Die Regressionsanalyse für den Soll-Massenstrom von 3 g/s wird analog zum Kapitel 7.4.1 durchgeführt, wobei die Gewichtung einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichte $\mathcal{N}(3, 2)$ entspricht.

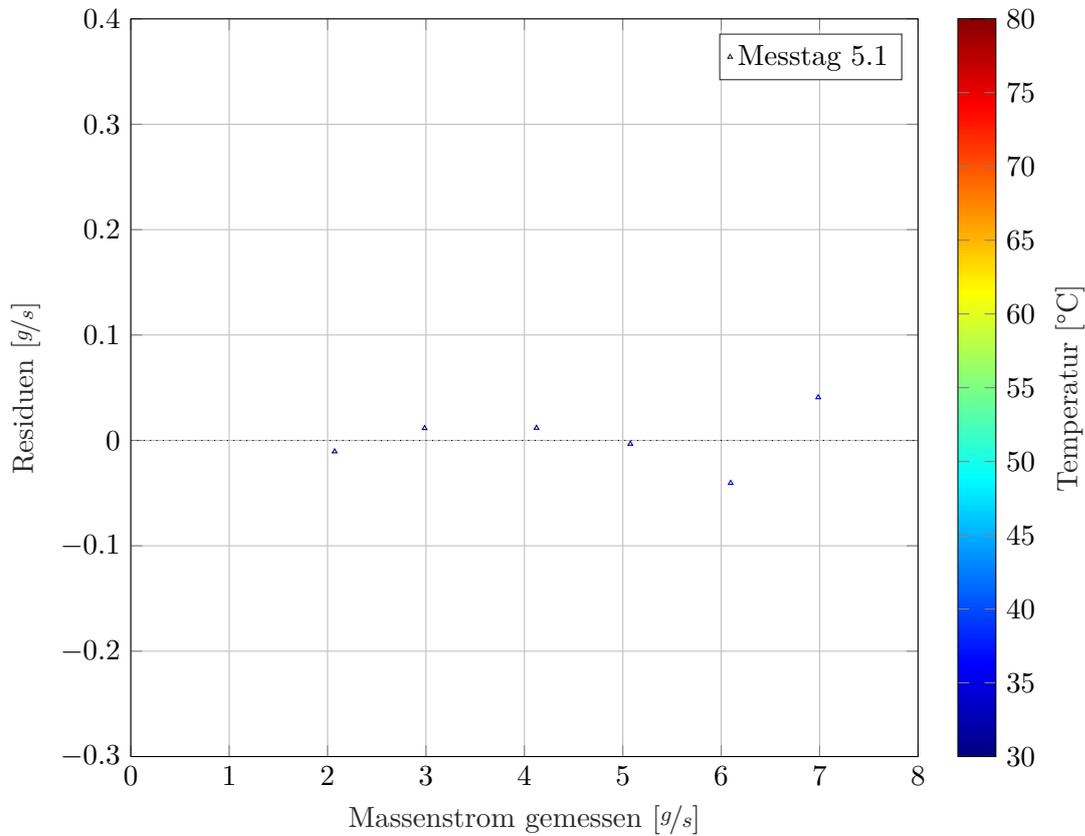


Abbildung 7.7: Residuen des für 5 g/s kalibrierten Modells

Die Parameter gemäss Tabelle 7.3 unterscheiden sich leicht, aber nur gering, von den Resultaten der Regression für 5 g/s in Tabelle 7.2. Die Gewichtung hat dementsprechend einen Einfluss auf die Bestimmung der Parameter. Die Messfehler des Modells für 3 g/s sind in Abbildung 7.10 bei 3 g/s am kleinsten. Der leicht abfallende Trend der Messfehler ist gleich, wie bei der Kalibrierung für 5 g/s. Die Messungen von Messtag 5.2, welche mit Helium 4.6 durchgeführt wurden, zeigen einen klaren Offset von bis -5% im Bereich 2...4 g/s. Die Konsequenz der Kalibrierung mit verunreinigtem Helium ist, dass so ein systematischer Fehler beim Soll-Massenstrom auftritt.

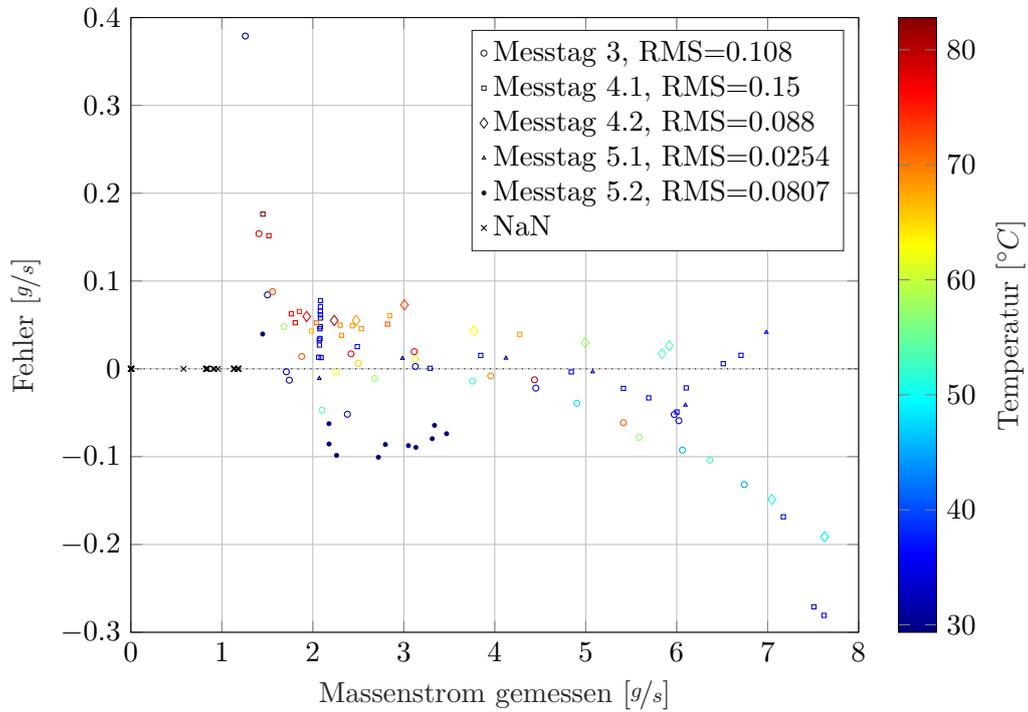


Abbildung 7.8: Test-Residuen des für 5 g/s kalibrierten Modells

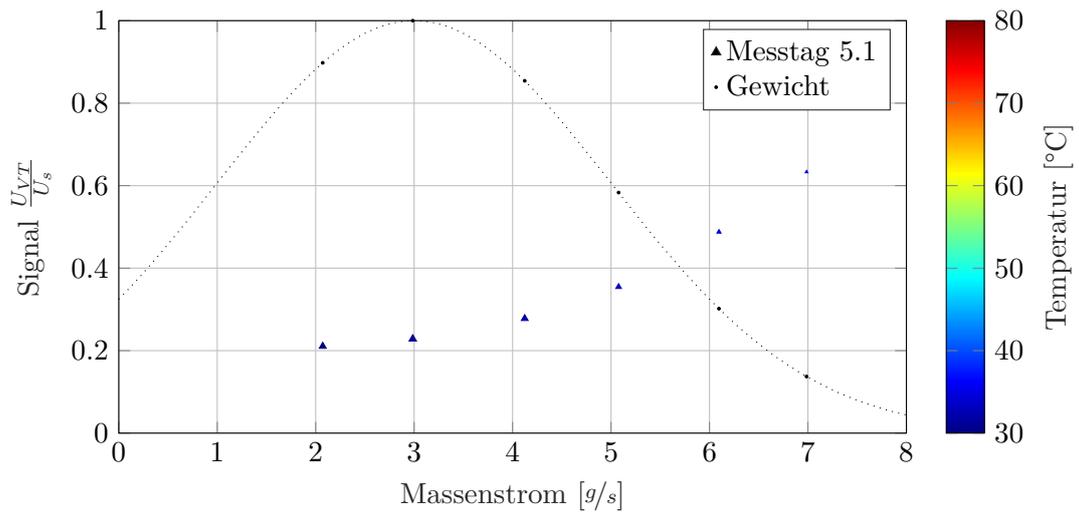
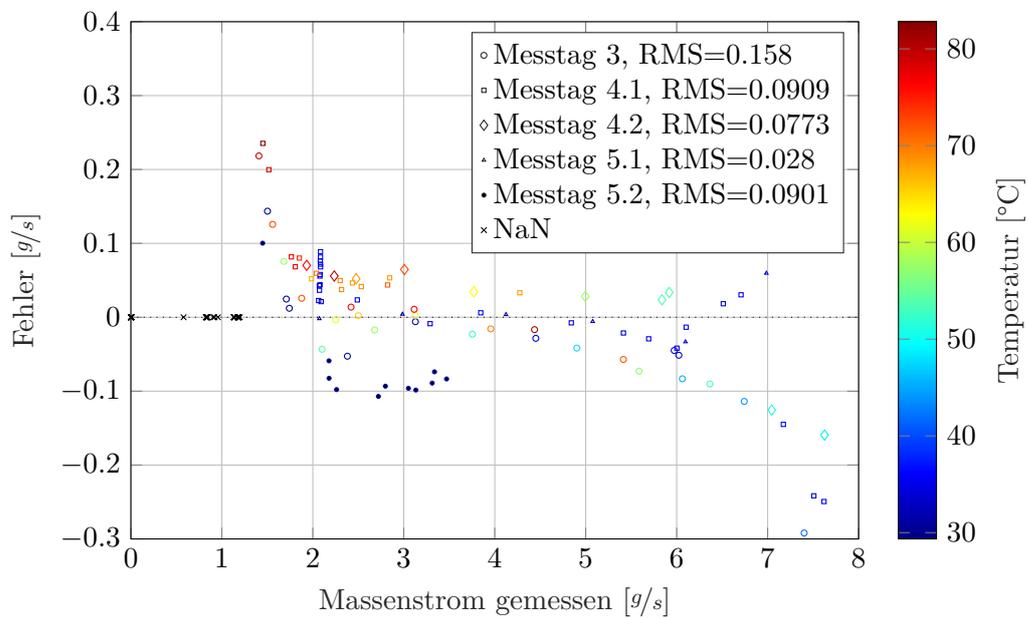


Abbildung 7.9: Gewichtung der Beobachtungen von Messtag 5.1 mit Soll-Massenstrom 5 g/s

Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert
β_1	9.1565	0.0618	$6.79 \cdot 10^{-7}$
β_2	-0.20289	0.00044	$2.30 \cdot 10^{-8}$
β_3	0.29346	0.00371	$4.45 \cdot 10^{-6}$
Beobachtungen		6	
Freiheitsgrade		3	
Root Mean Squared Error		0.00746	
Bestimmtheitsmass R^2		1	
adjust. Bestimmtheitsmass R_{adj}^2		1	

Tabelle 7.3: Statistik der Regressionsanalyse für 3 g/s Abbildung 7.10: Test-Residuen des für 3 g/s kalibrierten Modells

7.5 Messunsicherheit des kalibrierten Modells

Mit den nun berechneten Parametern lässt sich die Messunsicherheit des Venturirohrs berechnen. Es wird das Modell, das für 5 g/s kalibriert wurde, verwendet und die Messdaten von Messtag 3. Gemäss Fehlerfortpflanzung (Gleichung 3.28) wird die Standardunsicherheit der Massenstrommessung berechnet. Vereinfachend wird die Unsicherheit mithilfe der Modellgleichung 7.1 berechnet. Der Fehler, der durch das Tangentenverfahren entsteht wird dabei nicht berücksichtigt.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot C_D \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (7.1)$$

Zur Vereinfachung wird die Durchflusszahl C_D als 1 angenommen.

$$u_{\dot{m}_{VT}}^2 = \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial Signal} \cdot u_{Signal} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial T_{VT}} \cdot u_{T_{VT}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial T_{BP}} \cdot u_{T_{BP}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \beta_1} \cdot s_{\beta_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \beta_2} \cdot s_{\beta_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \beta_3} \cdot s_{\beta_3} \right)^2 \quad (7.5)$$

Die Unsicherheit in g/s entspricht der Wurzel des Resultats der Fehlerfortpflanzung nach Gleichung 7.5.

$$u_{\dot{m}_{VT}} = \sqrt{u_{\dot{m}_{VT}}^2}$$

Die Unsicherheit wird als Standardunsicherheit berechnet ($k=1$) und deckt damit ca. 65% der Resultate ab. Diese Unsicherheit ist eine Kombination aus den Unsicherheiten gemäss den Datenblättern der Komponenten (*Typ B*) und den Standardunsicherheiten s_i der gemittelten Betriebspunkte und Modellparameter (*Typ A*). Die Beiträge der Temperaturen sind in Anhang B.1 aufgeführt. Die Temperaturen wurden über eine Thermoelementkarte von NI erfasst [33]. Die Beiträge der Unsicherheiten des Signals $\frac{U_{VT}}{U_s}$ wird der Unsicherheitsanalyse der Kalibrierstrecke entnommen 6.16 und die Unsicherheiten der Modellparameter der Statistik der Regressionsanalyse 7.2.

In Abbildung 6.17 ist die Übertragungsfunktion mit der erweiterten Messunsicherheit des gemessenen Massenstroms dargestellt. Die Unsicherheit ist bei kleinen Massenströmen sehr gross. Unterhalb von 2 g/s werden die Unsicherheiten nicht mehr betrachtet, da sie so gross sind, dass Messungen in diesem Bereich nicht mehr interessant sind. Die absolute Standardunsicherheit in Abbildung 7.12 nähert sich einem Wert von $u_{\dot{m}_{VT}} \approx 0.9 \text{ g/s}$. Die relative Standardunsicherheit nimmt dementsprechend mit zunehmendem Massenstrom ab bis ca. $u_{rel} \approx 1.2\%$ bei 7 g/s. Die Beiträge zur Unsicherheit der Massenstrommessung mittels Venturirohr sind in Abbildung 7.13 ersichtlich. Die Unsicherheit des Signals des Differenzdrucksensors ist bei kleinen Massenströmen der grösste Unsicherheitsfaktor. Die Modellparameter tragen je nach Massenstrom unterschiedlich stark zur Unsicherheit bei. Der Skalierungsfaktor β_1 wird bei grossen Massenströmen wichtiger. Bei kleinen Massenströmen ist der Offset β_2 ein grösserer Unsicherheitsfaktor.

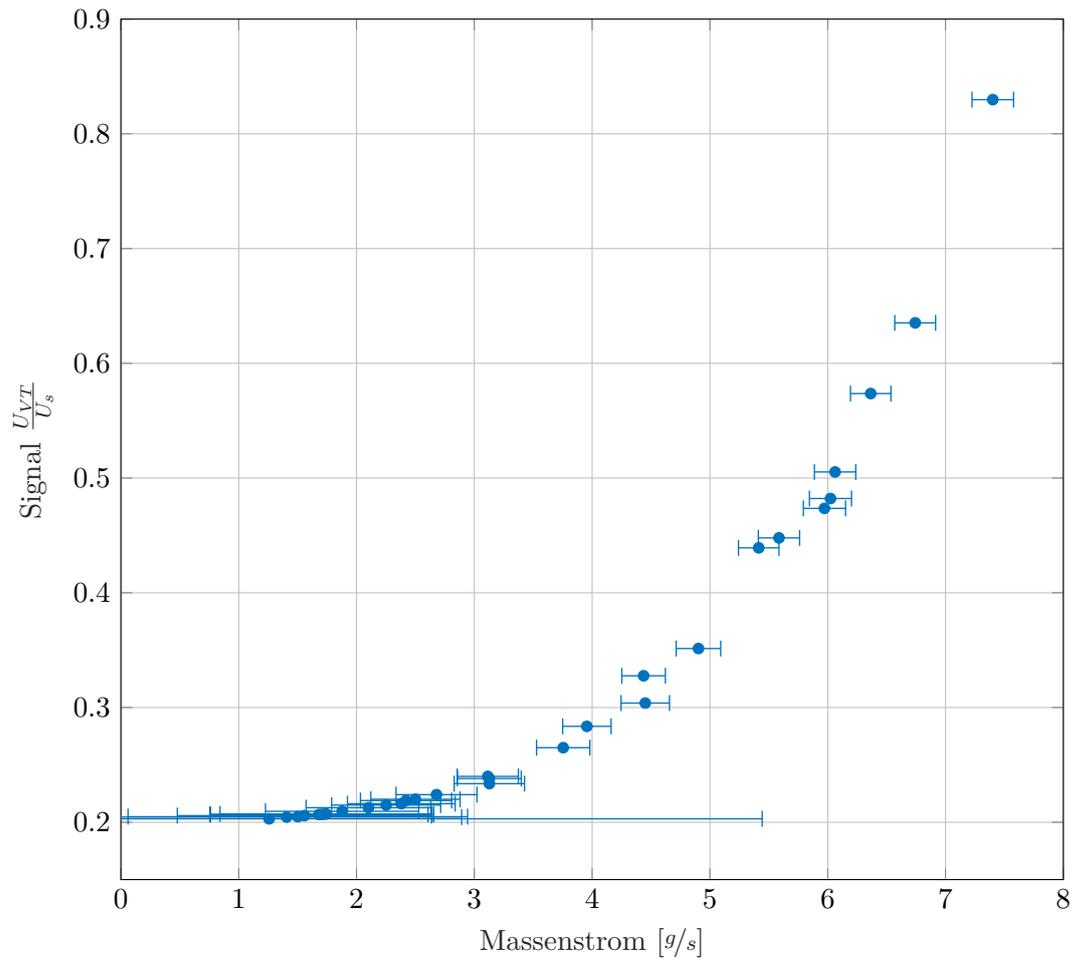


Abbildung 7.11: Übertragungsfunktion und erweiterte Unsicherheit der Massenstrommessung mittels Venturirohr ($k=2$, Messtag 3)

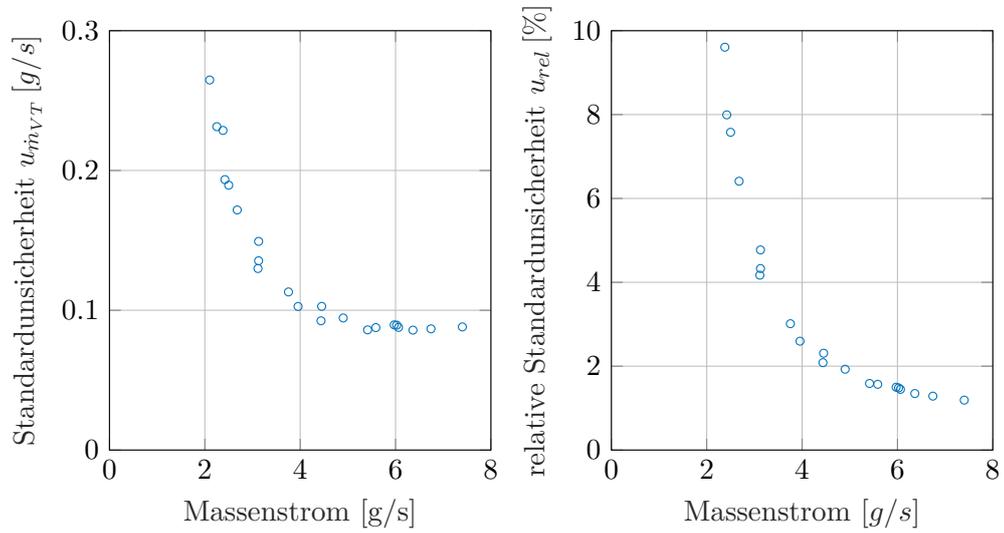


Abbildung 7.12: Absolute und relative Standardunsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1

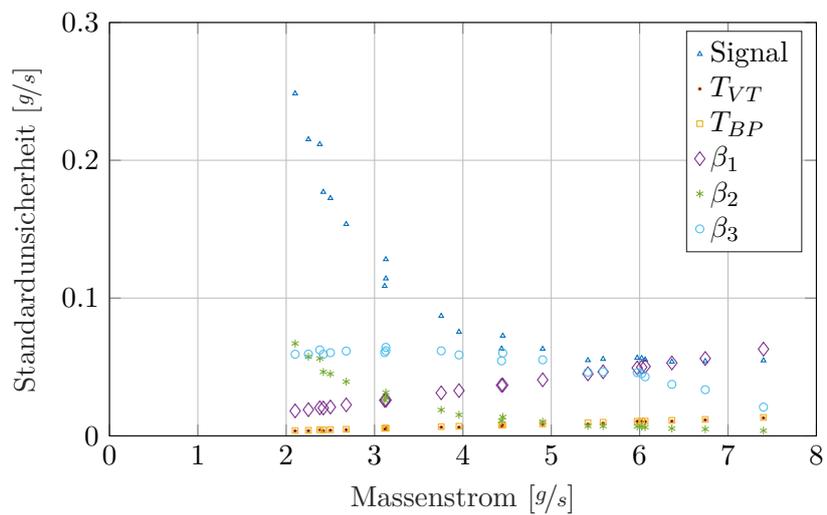


Abbildung 7.13: Beiträge zur Unsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1

7.5.1 Erweiterte Messunsicherheit des kalibrierten Modells

Zusammenfassend ist die Messunsicherheit bei grossen Massenströmen besser aufgrund des steileren Verlaufs der Übertragungsfunktion. Aus diesem Grund wurde das Venturirohr für *kleinere* Durchmesser mit höheren Geschwindigkeiten ausgelegt. Die Werte der Tabelle 7.4 entsprechen den erweiterten Unsicherheiten nach GUM mit $k = 2$ und decken somit 95% der Messungen ab.

Massenstrom \dot{m}	erweiterte Unsicherheit $U (k = 2)$	relative, erweiterte Unsicherheit U/\dot{m}
2	$\pm 0.65 \text{ g/s}$	34 %
3	$\pm 0.34 \text{ g/s}$	12 %
4	$\pm 0.21 \text{ g/s}$	5.2 %
5	$\pm 0.19 \text{ g/s}$	3.9 %
6	$\pm 0.18 \text{ g/s}$	3.0 %
7	$\pm 0.18 \text{ g/s}$	2.6 %

Tabelle 7.4: Unsicherheiten der Mengenummessung mittels Venturirohr für 5 g/s kalibriert

Die Unsicherheitsanalyse des Venturirohrs für die Messdaten von Messtag 5.1 sind im Anhang B.2 aufgeführt. Dabei wird die Unsicherheit der zur Kalibrierung verwendeten Messdaten berechnet.

8 Diskussion der Resultate

8.1 Resultate der analytischen und numerischen Untersuchung

Folgende Resultate gehen aus der Untersuchung des Venturirohrs und des Heissfilmsensors hervor.

- Der Heissfilmsensor weist in der konzipierten Form mit $D = 100\text{ mm}$ eine grosse Unsicherheit im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Rohrströmung aufweisen, wenn keine sehr lange Beruhigungsstrecke verbaut werden kann.
- Das Venturirohr weist eine zusätzliche Unsicherheit von ca. 2% auf, wenn die Einlaufstrecke verwinkelt ist, aber in einer Beruhigungsstrecke von $20D$ vor dem Venturirohr endet.
- Das Venturirohr mit $20D$ Einlauf- und $5D$ Auslaufstrecke weist bei einem Durchmesser $D = 31.3\text{ mm}$ und Massenstrom von $\dot{m} = 5\text{ g/s}$ einen Druckverlust von ca. 150 Pa auf. Der Druckverlust steigt mit \dot{m}^2 .
- Das Venturirohr ist aufgrund der Untersuchungen für den Einsatz im Mu3e-Experiment geeignet.
- Der Massenstrom durch das Venturirohr kann gemäss Gleichung 3.23 für ein bekanntes Fluid in Abhängigkeit des Bypass-Massenstroms \dot{m}_{BP} der Temperaturen T_{VT} und T_{BP} berechnet werden.

$$\dot{m} = C_D \cdot \varepsilon \cdot \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \cdot \sqrt{\dot{m}_{BP} \cdot \mu_{BP} \cdot \frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \quad (3.23)$$

Folgende Resultate gehen aus den Versuchen mit dem Venturirohr als Prototyp hervor.

- Das Venturirohr kann in den gegebenen Dimensionen des Prototyps ($D = 31.3\text{ mm}$, $\beta = 0.82$) unter der Verwendung des *SDP816-500Pa* als Differenzdrucksensor für einen Massenstrom bis ca. 7 g/s eingesetzt werden.
- Die Verunreinigung des Heliums mit Fremdgasen mit einem Anteil von $y_L \approx 10\%$ verursacht eine systematische Messunsicherheit von ca. 5%.
- Auch baugleiche Differenzdrucksensoren müssen individuell kalibriert werden, da die Übertragungsfunktion nicht identisch ist.
- Die Übertragungsfunktion des *SDP816-500Pa* als Differenzdrucksensor im Venturirohr ist annähernd eine Potenzfunktion.
- Als Modellgleichung für das Venturirohr mit mikrothermischer Durchflussmessung im Bypass eignet sich die Gleichung 7.1 mit den drei Modellparametern β_1 , β_2 und β_3 . Die Bestimmung der Parameter erfolgt durch nichtlineare Regression.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot C_D \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (7.1)$$

- Die Durchflusszahl C_D kann in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl gemäss Gleichung 4.1 berechnet werden. Dabei wird die Reynolds-Zahl für Rohrströmungen in Abhängigkeit des gemessenen Massenstroms eingesetzt.

$$C_D = 1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{Re_{VT}}} \quad (4.1)$$

- Die Modellgleichung ist aufgrund der Durchflusszahl, die vom Massenstrom abhängt, nichtlinear und kann im Messbetrieb mit dem Tangentenverfahren und der Gleichung 7.3 numerisch gelöst werden.

$$0 = \dot{m} - \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot \left(1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{\dot{m} \cdot 4 \cdot D}{\mu_{VT}}}} \right) \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (7.3)$$

- Die *Master-Meter-Methode* kann als Kalibriermethode angewendet werden, wenn das Referenzmessgerät eine deutlich bessere Messgenauigkeit aufweist. Ein *Promass* von Endress + Hauser, welches nach dem Coriolisprinzip funktioniert, hat sich als gut geeignet herausgestellt.
- Die Kalibrierung der Mengemessung ist am erfolgreichsten, wenn die Beobachtungen für die Regressionsanalyse zur Bestimmung der Modellparameter gleichmässig um den Soll-Massenstrom verteilt sind. Ansonsten kann die Kalibrierung durch eine gezielt höhere Gewichtung der Messpunkte im Sollbereich.
- Die Modellgleichung und das Messgerät wird durch die Kalibrierung für einen Soll-Massenstrom von 5 g/s bei Messungen ausserhalb des Messbereichs von $2 \dots 7 \text{ g/s}$ unsicher. Für Massenströme unter 1 g/s ist das Messgerät mit der gewählten Modellgleichung nicht einsetzbar. Für Massenströme ausserhalb dieses Bereichs müssen angepasste Durchmesser für das Venturirohr eingesetzt werden.
- Mit dem Prototypen des Venturirohrs und Kalibrierung mit 6 Messpunkten konnte eine Unsicherheit von $\leq 0.12 \text{ g/s}$ im Bereich $2 \dots 7 \text{ g/s}$ erreicht werden.
- Die erweiterte Unsicherheit des kalibrierten Modells für 5 g/s und den verwendeten Komponenten der Kalibrierstrecke beträgt $U = \pm 0.21 \text{ g/s}$ im Bereich $4 \dots 7 \text{ g/s}$.
- Die Messunsicherheit ist für grosse Massenströme aufgrund der steilen Übertragungsfunktion kleiner.

8.2 Aussagekraft und Vollständigkeit der Resultate

8.2.1 Erfasste Messdaten

- Die Messdaten wurden nicht über den ganzen Messbereich gleichmässig aufgenommen. Die Residuen bei der Regressionsanalyse und die Fehler beim Testen der Kalibrierung sind deshalb nicht gleichmässig verteilt. Es wurden insgesamt nur wenige Messdaten aufgenommen, um die Messunsicherheit über den Messbereich $2 \dots 7 \text{ g/s}$ ausreichend zu beschreiben. Um die Messunsicherheit genau beschreiben zu können, müssen Wiederholungsmessungen bei gleichem Massenstrom unter leicht variierenden Bedingungen vorgenommen werden, sodass erkennbar wird, ob die Fehler gleichverteilt sind.

- Die Variation der Bedingungen Druck und Temperatur konnte nicht bei allen Massenströmen gleich gut umgesetzt werden. Der Druck konnte bei grösseren Massenströmen nicht auf 1 *bara* gesenkt werden aufgrund des Druckverlustes der Leitung zur Rückgewinnung am PSI. Hohe Temperaturen konnten bei grossen und mittleren Massenströmen nur kurzzeitig erreicht werden, sodass keine stationäre Messung vorgenommen werden konnte.
- Die Messungen bei grossen Massenströmen oder hohen Temperaturen wurden nur kurze Zeit durchgeführt. Stationäre Temperaturen wurde dadurch nicht erreicht.
- Die Messunsicherheit des Referenzmessgeräts (*Promass*) ist im Vergleich mit dem Venturirohr sehr klein und trägt somit kaum zur Unsicherheit der Kalibrierung bei.

8.2.2 Kalibrierung und Resultatbildung

- Die Regression zur Bestimmung der Modellparameter bei den Tests der Kalibrierung wurde mit einem Satz von Messpunkten durchgeführt, die gleichmässig über den Messbereich verteilt waren. Dadurch konnte die Verzerrung durch eine Anhäufung von Messpunkten bei tiefen Massenströmen vermieden werden.
- Die Residuen der Regressionsanalyse zeigt einen leichten Trend in Form einer negativen Krümmung. Die Übertragungsfunktion wurde somit nicht ideal beschrieben. Es gibt daher noch Verbesserungspotential bei der Formulierung der Modellgleichung.
- Es wurde keine Druckabhängigkeit in der Modellgleichung berücksichtigt. In den Fehlern beim Testen der Kalibrierung ist eine leichte Druckabhängigkeit erkennbar, welche nicht durch anpassen der Modellgleichung korrigiert werden konnte. Dieselbe Druckvariation muss auch bei grossen Massenströmen gemessen werden, um die Druckabhängigkeit der Mengemessung zu quantifizieren oder ausschliessen zu können.
- Die Temperaturabhängigkeit von der Temperatur im Bypass ist möglicherweise nicht korrekt für ein Venturirohr mit gleicher Temperatur im Bypass wie im Venturirohr selbst. Da die Temperatur im Bypass während den Messungen kaum variierte, kann dies nicht ausgeschlossen werden.
- Die Berücksichtigung der Durchflusszahl hat nur einen geringen Einfluss. Dieser ist bei kleinen Massenströmen am grössten. Wenn die Durchflusszahl ungefähr konstant ist, dann wird sie durch den Modellparameter β_1 kompensiert. Durch die Berücksichtigung der Durchflusszahl wird die Qualität des Ausgleichsfunktion vermutlich nur geringfügig verbessert.
- Die Resultatbildung mittels Tangentenverfahren bringt zusätzlichen Programmieraufwand mit sich. Da die Durchflusszahl von der Reynoldszahl, und daher vom Massenstrom und der Zähigkeit abhängt, ist die Modellgleichung in der Theorie tatsächlich nichtlinear. Um einen linearen Zusammenhang zu erhalten, kann die Durchflusszahl auch in Abhängigkeit von x_0 gemäss Gleichung 7.4 geschätzt werden. Dabei wird der Massenstrom nur als Funktion des Signals des Differenzdrucksensors grob bestimmt. Somit kann auf das iterative Bestimmen des Messresultats verzichtet werden.
- Die Messunsicherheit in Kapitel 7.5 wird ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit des Referenz-Messgeräts gebildet.

- Die Berechnung der Messunsicherheiten geht davon aus, dass alle Messungen und deren Unsicherheiten unabhängig sind, sodass diese gemäss Fehlerfortpflanzung berechnet werden können. Diese Annahme trifft nicht zwingend immer zu.

Dasselbe Vorgehen der Kalibrierung und Resultatbildung wird für den weiteren Einsatz des Venturirohrs empfohlen. Die Zusammenfassung der Empfehlungen ist im Anhang D aufgeführt.

8.3 Wahl des SDP816-500Pa als Differenzdrucksensor

Die vorgängige Kalibrierung des Sensors für trockene Luft und Stickstoff und zusätzliche Kalibrierung des Venturirohrs führt möglicherweise zu einem verzerrten Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Massenstrom. Für eine *sauberere* Kalibrierung könnte in Zusammenarbeit mit dem Lieferanten das rohe Signal des Differenzdrucksensors zur Kalibrierung des Venturirohrs verwendet werden. Es gibt alternative Lieferanten von Differenzdrucksensoren mit unterschiedlichen Funktionsweisen. Die Wahl des Differenzdrucksensors von *Sensirion* ist nicht zwingend für die Implementierung des Messgeräts, da es andere Hersteller, z.B. First Sensor gibt, die Differenzdrucksensoren herstellen, die ebenfalls nach dem Prinzip des *mikrothermischen Durchflusssensors* funktionieren. Da die Durchflussmessung mittels Durchflussmessung im Bypass grosses Potential aufweist, wurden zudem bereits Durchflussmessgeräte für andere Gase entwickelt, die nach demselben Prinzip funktionieren [16] [34]. Der Vorteil des Venturirohrs gemäss eigenen Bedürfnissen erlaubt es jedoch, dass der Durchmesser und der Platzbedarf dem Mu3e-Experiment angepasst werden kann.

8.4 CFD-Simulationen des Venturirohrs und des Heissfilmsensors

Die Simulationen zeigten Phänomene, die in Versuchen nicht direkt erkennbar gewesen wären. Die Simulationen sind nicht vollständig validiert und verifiziert. Die Simulationen des Heissfilmsensors sind spärlich dokumentiert als die des Venturirohrs, da dieser nicht weiterverfolgt wurde. Basierend auf den Erfolgen des Venturirohrs ist es jedoch nicht zielführend, den Heissfilmsensor weiterhin in Betrachtung zu ziehen. Die Simulationen dienen primär der Wahl des Messgeräts und erfüllen dieses Ziel, auch wenn die Simulation die effektiv eingesetzten Messgeräte nicht exakt abbilden. Die quantitative Schätzung des Fehlers des Venturirohrs basiert auf der Simulation mit einem verwinkelten Einlauf. Andere Rohreinbauten wurden nicht untersucht. Daher ist es möglich, dass andere Einlaufgeometrien bei anderen Massenströmen einen grösseren Messfehler verursachen.

8.4.1 Qualität der Simulationen

Es wurden keine Netzstudien durchgeführt, um sicherzugehen, dass die Auflösung der Netze den Anforderungen der Resultate entspricht. Die Vernetzung des Heissfilmsensors wurde verfeinert, um festzustellen, ob sich das Resultat der Kühlleistung mit der Netzfeinheit verändert. Dies war der Fall, weitere Verfeinerung wäre nötig, um sicherzugehen, dass das Resultat gegen einen bestimmten Wert konvergiert. Die Vernetzung der Einlaufstrecken, des Venturirohrs und des Heissfilmsensors im freien Strömungsfeld wurde der Limite von 512k Zellen für Ausbildungslizenzen von Ansys CFX angepasst. Für die Strömung im Venturirohr wird angenommen, dass die Auflösung ausreichend war. Die Auflösung des Heissfilmsensors ist jedoch kritischer aufgrund der geringen Grösse des Heissfilms.

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Eine kostengünstige, kompakte Alternative zu kommerziell erhältlichen Durchflussmessgeräten wird für die Massenstrommessung von gasförmigem Helium in den Kühlkreisläufen des Mu3e-Experiments gesucht. Die dabei herrschenden Umstände sind atmosphärischer Druck ($0.9 \dots 1.1 \text{ bara}$), variierende Temperatur ($0 \dots 80^\circ\text{C}$) und Massenströme von $2 \dots 10 \text{ g/s}$. Das konzipierte Messgerät soll einen geringen Druckverlust verursachen und bei geringen Platzverhältnissen eingebaut werden können. Diese Arbeit zeigt, dass ein Venturirohr mit mikrothermischer Durchflussmessung im Bypass diese Anforderungen erfüllen kann.

9.1 Wahl des Venturirohrs

Für verwinkelte Einlaufgeometrien weist die Massenstrommessung mit Heissfilmsensor eine grosse Unsicherheit auf, da die lokale Geschwindigkeit beim Heissfilm im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung nicht berechenbar ist. Der Entwicklungsaufwand ist verglichen mit dem Venturirohr viel grösser und eine im Rahmen dieser Thesis erarbeitete, brauchbare Lösung weniger wahrscheinlich.

9.2 Vorgehensweise

- Das Venturirohr und der Heissfilmsensor wurden analytisch und mittels numerischer Strömungssimulationen untersucht. Dabei wurde die Durchflusszahl des Venturirohrs berechnet und der Fehler, der bei verwinkelten Einlaufgeometrien auftritt ermittelt. Aufgrund dieser Resultate wurde das Venturirohr weiterverfolgt.
- Das Venturirohr mit Bypass wurde als Leitungssystem mit zwei möglichen Pfaden analytisch beschrieben, um einen theoretischen Zusammenhang zwischen den Sensorsignalen und dem Massenstrom herzuleiten.
- Das Venturirohr mit einem mikrothermischen Durchflusssensor, Druckmessgerät und einem Thermoelement wurde als Prototyp gefertigt. Eine dafür ausgelegte Kalibrierstrecke mit einem Referenzmessgerät zur Massenstrommessung wurde eingesetzt, um die Übertragungsfunktion des Venturirohrs zu bestimmen.
- Die Übertragungsfunktion gemäss Messdaten und der theoretischen Zusammenhang wurden verglichen und eine Modellgleichung formuliert, die die reale Übertragungsfunktion besser beschreibt. Die Parameter der Übertragungsfunktion wurden mittels nichtlinearer Regressionsanalyse ausgeglichen, um den Prototyp des Venturirohrs zu kalibrieren. Da die gewählte Modellgleichung nichtlinear ist, wird das Messresultat mittels Tangentenverfahren bestimmt.
- Der auftretende Messfehler des Prototyps für ein kalibriertes Modell wurde mit den aufgenommenen Messdaten ermittelt.
- Die erweiterte Messunsicherheit gemäss GUM wurde für den kalibrierten Prototyp berechnet.

9.3 Erkenntnisse zum Einsatz und zur Kalibrierung

Im Einlauf des Messgeräts sind aufeinanderfolgende Winkelstücke zu vermeiden. Eine gerade Beruhigungsstrecke kann den durch diese Rohreinbauten verursachten Messfehler auf 2% reduzieren.

Der Druckverlust des Venturirohrs mit den Dimensionen $D = 31.3\text{ mm}$ und $\beta = 0.82$ erzeugt mit einer idealen Ein- und Auslaufstrecke von $20D + 5D$ ca. 150 Pa bei einem Massenstrom von 5 g/s und 260 Pa bei 7 g/s . Die Messsicherheit des Venturirohrs verbessert sich mit zunehmendem Massenstrom.

Der gefertigte Prototyp ist für einen Messbereich von $2 \dots 7\text{ g/s}$ einsetzbar. Für grössere und kleinere Massenströme ist ein anderer Durchmesser D vorzusehen. Der Durchmesser des Prototyps wird für 5 g/s empfohlen. Die erweiterte Messunsicherheit der Kalibrierstrecke und des kalibrierten Venturirohrs beträgt $U = \pm 0.21\text{ g/s}$ im Bereich $4 \dots 7\text{ g/s}$.

9.4 Korrektheit der Vorgehensweise und Aussagekraft der Resultate

Folgende Schritte und Vereinfachungen im Vorgehen stellen Unsicherheiten dar, sodass weitere Untersuchungen nötig sind, um diese Unsicherheiten zu reduzieren oder die Annahmen zu widerlegen.

- Die Druckabhängigkeit der Mengemessung zeigte sich als vernachlässigbar und wurde nicht weiter berücksichtigt. Weitere Versuche und eine Variation des Drucks können zeigen, ob diese Vereinfachung zulässig ist.
- Die erfassten Messdaten, die zum Prüfen des kalibrierten Messgeräts verwendet wurden, sind nicht gleichmässig über den Messbereich verteilt, sodass sich die Messpunkte bei gewissen Massenströmen und gewissen Bedingungen häufen. Um die Messunsicherheit des kalibrierten Messgeräts zu bestimmen, müssen gezielt mehrere Wiederholungsmessungen bei gezielter Variation der Bedingungen durchgeführt werden. Mit den aufgenommenen Messdaten kann nur eine ungefähre Angabe über den Messfehler und die Messunsicherheit gemacht werden.
- Die erweiterte Unsicherheit des kalibrierten Venturirohrs wurde unter der Annahme berechnet, dass alle Grössen unabhängig sind. Für eine sichere Aussage zur Unsicherheit des Messgeräts machen zu können sind weitere Messungen notwendig. Dadurch könnte überprüft werden, ob die Fehler normalverteilt sind und, wie gross deren Standardabweichung (Standardfehler) ist. Die Kalibrierung des Modells unter der Verwendung eines kalibrierten Differenzdrucksensors führt vermutlich nicht auf eine Unsicherheit, wie sie gemäss Fehlerfortpflanzung berechnet wurde. Um die Messunsicherheit zuverlässiger bestimmen zu können müsste die Kalibrierung direkt mit dem Rohsignal des Differenzdrucksensors durchgeführt werden.
- Die Unsicherheit des Referenzmessgeräts und der Durchflusszahl wurden bei der Bestimmung der erweiterten Unsicherheit weggelassen. Diese würden die ermittelte Unsicherheit erhöhen.

9.5 Empfehlung für den Einsatz im Mu3e

Basierend auf den Erkenntnissen zum Einsatz und der Kalibrierung wird eine Sammlung von Empfehlungen zuhanden des Auftraggebers erstellt. Das vollständige Dokument ist im Anhang D einsehbar. Darin wird die generelle Vorgehensweise zur Kalibrierung und zum Einsatz des Venturirohrs aufgezeigt.

1. Aufbau des Venturirohrs, benötigte Messgeräte
 - Differenzdrucksensor mit Temperaturmessung im Bypass
 - Temperaturmessung im Venturirohr
2. Die Kalibriermethode der *Master-Meter-Methode*

- Verwendung eines genauen, kalibrierten Referenzmessgeräts
 - Verwendete Kalibrierstrecke
3. Die Modellgleichung und die Bestimmung der Modellparameter
- Ausgleichsparameter
 - Regressionsanalyse und Beurteilung der Resultate
 - Strategie zur Kalibrierung für einen Sollmassenstrom
4. Die Resultatbildung mithilfe der nichtlinearen Modellgleichung
- Empfehlung des Tangentenverfahrens
 - Zu erwartende Messfehler
 - Grenzen des Modells

9.6 Erreichung der Ziele des Projekts

Ziel	Es soll festgestellt werden, ob das konzipierte Venturirohr die gewünschten Effekte zeigt und ob der mikrothermische Differenzdrucksensor im Bypass ohne Temperatur- und Druckkompensation als Durchflussmessung ausreicht.
Erfüllung	erfüllt
Begründung	Das Venturirohr als Durchflussmessgerät ist einsatzfähig. Keine Druckkompensation wurde vorgenommen. Die Berücksichtigung des Temperaturverhältnisses zwischen Bypass und Venturirohr führte zu einer Reduktion der Residuen und wurde entsprechend in die Modellgleichung implementiert.
Ziel	Es soll geprüft werden, ob der Heissfilmsensor gemäss Konzept in der Strömung platziert werden kann und die erwarteten Strömungsbedingungen erfährt.
Erfüllung	erfüllt
Begründung	Es wurde festgestellt, dass der Heissfilmsensor im Übergangsbereich sehr unsicher ist, wenn keine sehr lange Beruhigungsstrecke vorliegt.
Ziel	Für beide Messmethoden soll die theoretisch erreichbare Messgenauigkeit ermittelt werden.
Erfüllung	erfüllt
Begründung	Der Heissfilmsensor weist eine theoretische Standardunsicherheit von 3.6... 5.9% auf. Das Venturirohr 2.8... 3.7%.
Ziel	Das Messsystem, welches besser für den Einsatz im Mu3e-Experiment geeignet ist, soll ausführlich simuliert werden, um Erkenntnisse zur Empfindlichkeit auf Störgrößen und Einlaufbedingungen zu sammeln.
Erfüllung	nicht erfüllt, ersetzt
Begründung	Die Simulation des gewählten Messprinzips wurde durch die praktischen Versuche mit dem Prototypen ersetzt (siehe folgendes Ziel).

Ziel	Das Messsystem, welches besser für den Einsatz im Mu3e-Experiment geeignet ist, soll justiert und kalibriert werden.
Erfüllung	erfüllt
Begründung	Die Modellgleichung wurde aufgestellt. Mittels nichtlinearer Regression wurden die drei vorkommenden Ausgleichsparameter bestimmt. Mittels Tangentenverfahren kann das Messresultat bestimmt werden. Ein Messfehler $< \pm 0.12 g/s$ wurde im Bereich $2 \dots 7 g/s$ erreicht. Die erweiterte Unsicherheit der Prototyps mit kalibriertem Modell wurde in diesem Bereich berechnet.

Ziel	Es soll eine Empfehlung zur Justierung und Kalibrierung des gewählten Messsystems gegeben werden. Zuhanden des Auftraggebers soll eine Empfehlung zum Einsatz des Messsystems angegeben werden.
Erfüllung	erfüllt
Begründung	Zuhanden des Auftraggebers wurden die Beschreibung des verwendeten Messsystems, das Vorgehen zur Bestimmung der Modellparameter und Lösungsbildung, Empfehlungen zum Einsatz und Empfehlungen zur Kalibrierung der Messgeräte für den jeweiligen Soll-Massenstrom zusammengestellt.

9.7 Ausblick

Diese Arbeit belegt, dass das Konzept des Venturirohrs zur Massenstrommessung von gasförmigem Helium geeignet ist und wie gross dessen erreichbare Messunsicherheit ist. Die Entscheidung, ob diese Lösung im Mu3e-Experiment zum Einsatz kommt, obliegt dem Auftraggeber. Um die Zuverlässigkeit des Venturirohrs sicherzustellen und ein serientaugliches Messgerät für die Massenstromüberwachung im Mu3e-Experiment sicherzustellen, sind folgende Arbeitsschritte noch ausstehend.

- Untersuchung der verwendeten Sensoren unter den speziellen Bedingungen des Mu3e-Experiments: Magnetfeld und Strahlung.
- Konstruktion eines Venturirohrs mit Bypass, welches in Serie gefertigt werden kann und von der Grösse her im Mu3e-Experiment verbaut werden kann. Die Grösse wird dem verfügbaren Platz und der zu führenden Gasmenge angepasst.
- Prüfen der Modellgleichung für das angepasste Venturirohr und die eingesetzten Differenzdrucksensoren unter Variation des Drucks und der Temperatur im zu erwartenden Bereich. Dabei sollen stationäre Bedingungen erreicht werden und Helium derselben Reinheit wie im Mu3e-Experiment verwendet werden.
- Individuelle Kalibrierung der Messgeräte für den vorgesehenen Soll-Massenstrom.

Es sind weitere Verwendungen des Venturirohrs mit mikrothermischer Durchflussmessung im Bypass möglich. Das Messprinzip ist generell für Gase einsetzbar, sofern die Messgeräte für das entsprechende Gas kalibriert werden.

10 Ehrlichkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Ort und Datum: _____

Studierender: _____

Niculin Flucher

Abbildungsverzeichnis

1.1	Detektor-Design des Mu3e-Experiments im Querschnitt, mögliche Pfade von zwei Positronen und einem Elektron eingezeichnet [4]	2
1.2	Projektstruktur des P6 gemäss dem effektiven Ablauf	4
2.1	Temperatur- und Druckabhängigkeit der Viskosität von Helium	7
2.2	Differenzdrucksensor SDP810 von Sensirion [7]	8
2.3	Heissfilmsensor von Innovative Sensor Technology [10]	9
3.1	Geschwindigkeitsverteilung bei ausgebildeter, laminarer Rohrströmung [12]	13
3.2	Geschwindigkeitsverteilung bei ausgebildeter, turbulenter Rohrströmung [12]	13
3.3	Geschwindigkeitsverteilung gemäss Beziehung 3.10 und 3.11	14
3.4	Parallel angeströmte ebene Platte mit Umschlag zu turbulenter Strömung[14]	16
3.5	Vereinfachte Geometrie des Heissfilmsensors	17
3.6	Parallel angeströmte ebene Platte ab Vorderkante beheizt[14]	18
3.7	Theoretische Heizleistung des Heissfilms	18
3.8	Schema der Kapillare der Differenzdrucksensoren von Sensirion [15]	19
3.9	Schematische Darstellung des Temperaturprofils in der Kapillare [16]	20
3.10	Differenzdruck über dem Venturirohr gemäss Formel 3.19	21
3.11	Parallelschaltung zweier Rohre	23
3.12	Bypass-Massenstrom gemäss Formel 3.22	24
3.13	Übertragungsfunktion des Venturirohrs mit Unsicherheit	28
3.14	Beiträge zur Unsicherheit des Venturirohrs	28
3.15	Relative Unsicherheit des Venturirohrs	29
3.16	Beiträge zur Unsicherheit des Heissfilmsensors	31
3.17	Fit der Heizleistung aus der Simulation im freien Strömungsfeld	31
3.18	Übertragungsfunktion des Heissfilmsensors mit Unsicherheit	32
3.19	Relative Unsicherheit des Heissfilmsensors	32
3.20	Exemplarische Abweichungen des Modells von den Messpunkten [20]	34
3.21	Exemplarischer Verlauf des Newtonschen Tangentenverfahrens [20]	35
4.1	Geometrien des Venturirohrs zur Simulation	38
4.2	Benötigte Geometrien des Einlaufs	39
4.3	Benötigte Geometrien des Heissfilmsensors	40
4.4	Geometrie und Vernetzung des Venturirohrs	41
4.5	Druckverlauf im Venturirohr bei $\dot{m} = 2 \text{ g/s}$	42
4.6	Wanddruck im Venturirohr mit geradem Einlauf	43
4.7	Wanddruck im Venturirohr mit geradem Einlauf	43
4.8	Vergleich des Resultate der Simulation und der Handrechnung	44
4.9	Berechnete Durchflusszahl in Abhängigkeit des Massenstroms	45
4.10	Verlauf der Durchflusszahl für ein Venturirohr in Abhängigkeit der Reynoldszahl [24]	45
4.11	Vergleich der Differenzdrücke aus Versuchen und der Handrechnung mit der ermittelten Durchflusszahl	46
4.12	Abweichung der Handrechnung mit der ermittelten Durchflusszahl von den Messungen	47
4.13	Differenzdruck in Abhängigkeit der Temperatur	48
4.14	Differenzdruck in Abhängigkeit des Drucks	48
4.15	Geometrie und Vernetzung der verwinkelten Einlaufstrecke	49

4.16	Druckverteilung in den zwei Ebenen des Venturirohrs bei verwinkeltem Einlauf und $5 g/s$ und $L_E = 10D$	49
4.17	Wanddruck im Venturirohr bei $\dot{m} = 2 g/s$, verwinkelter Einlaufstrecke und $L_E = 10D$	50
4.18	Wanddruck im Venturirohr mit verwinkelter Einlaufstrecke und $L_E = 10D$	51
4.19	Abweichung der Differenzdrücke bei zwei windschiefen Winkeln im Einlauf	51
4.20	Yplus des Heissfilms	52
4.21	Wärmeleistung des Heissfilms gemäss Handrechnung und Simulation	54
4.22	Heizleistung in Abhängigkeit der Temperatur und Druck	54
4.23	Wärmeflussdichte auf dem Heissfilm bei $\Delta T = 15 K$ und $\dot{m} = 5 g/s$	56
4.24	Temperatur in der Umgebung des Heissfilms, $\Delta T = 15 K$, $\dot{m} = 5 g/s$	56
4.25	Geschwindigkeitsprofile für $5 g/s$ nach verwinkeltem Einlauf und unterschiedlichen Einlaufängen	57
4.26	Geschwindigkeitsprofile für $2 g/s$ mit und ohne Turbulenzmodell nach $L_E = 20D$	58
4.27	Möglicher Verlauf der Wärmeleistung im Übergangsbereich	59
4.28	Lokale Geschwindigkeiten nach verwinkeltem Einlauf und variierender Einlaufstrecke, (Der schwarze Ring entspricht der Einstecktiefe des Heissfilmsensors)	60
4.29	Geschwindigkeitsverteilung in einer Studie zur Messunsicherheit bei Strömungen nach einem Winkelstück mit Radius $1.5D$ [27]	61
6.1	Schema des Verdichterkreislaufs mit Messstellen der Mengemessung	64
6.2	Verdichterkreislauf komplett	65
6.3	Verdichterkreislauf: Venturirohr	66
6.4	Schema der Kalibrierstrecke	68
6.5	Kalibrierstrecke komplett	69
6.6	Kalibrierstrecke: Düsenblock	70
6.7	Kalibrierstrecke: BGA und Heizband	71
6.8	Kalibrierstrecke: Venturirohr mit parallel angeschlossenen Differenzdrucksensoren	72
6.9	Vergleich des Sensorsignals des SDP des Verdichterkreislaufs und der Kalibrierstrecke	74
6.10	Vergleich der digitalen Sensorsignale des Verdichterkreislaufs und der Kalibrierstrecke	75
6.11	Vergleich von drei baugleichen Sensoren	76
6.12	Bedingungen der Messungen (Messtag 3 bis 5.1)	77
6.13	Vergleich des berechneten Differenzdruck und des Sensorsignals, farbcodiert gemäss der berechneten Dichte	78
6.14	Sensorsignal und berechneter Differenzdruck, farbcodiert gemäss der berechneten Dichte	78
6.15	Sensorsignal und berechneter Differenzdruck, farbcodiert gemäss der berechneten Dichte	79
6.16	Standardunsicherheit der Referenz-Mengemessung und des Signals des SDP	80
6.17	Erweiterte Unsicherheit der Messgrößen (k=2, Messtag 3)	81
6.18	Beiträge zur Unsicherheit des Signals des Differenzdrucksensors	83
7.1	Linear und logarithmisch aufgetragene Übertragungsfunktion des Venturirohrs	86
7.2	Beobachtungen der Messtage 3 bis 5.1 zur Kalibrierung	88
7.3	Residuen des Modells	90
7.4	Relativer Fehler des Modells	90
7.5	Anwendung des Tangentenverfahrens	91
7.6	Gewichtung der Beobachtungen von Messtag 5.1 mit Soll-Massenstrom $5 g/s$	92
7.7	Residuen des für $5 g/s$ kalibrierten Modells	94

7.8	Test-Residuen des für 5 g/s kalibrierten Modells	95
7.9	Gewichtung der Beobachtungen von Messtag 5.1 mit Soll-Massenstrom 5 g/s	95
7.10	Test-Residuen des für 3 g/s kalibrierten Modells	96
7.11	Übertragungsfunktion und erweiterte Unsicherheit der Massenstrommessung mittels Venturirohr ($k=2$, Messtag 3)	98
7.12	Absolute und relative Standardunsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1	99
7.13	Beiträge zur Unsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1	99
A.1	Geschwindigkeitsverteilung im Venturirohr bei $\dot{m} = 2\text{ g/s}$	118
A.2	Geschwindigkeitsverteilung im Venturirohr bei $\dot{m} = 5\text{ g/s}$, verwinkelter Einlaufstrecke und $L_E = 10D$	118
A.3	Geschwindigkeitsverteilung im ersten Winkel des Einlaufs $D = 31.3\text{ mm}$	119
A.4	Geschwindigkeitsverteilung im zweiten Winkel des Einlaufs $D = 31.3\text{ mm}$	119
A.5	Geschwindigkeitsverteilung nach dem zweiten Winkel des Einlaufs $D = 31.3\text{ mm}$, $L_E = 5D$	120
A.6	Temperaturverteilung in der Nähe des Heissfilms (Ansicht von oben)	121
A.7	Geschwindigkeitsverteilung in der Nähe des Heissfilms (Ansicht von oben)	122
A.8	Geschwindigkeitsverteilung in der Nähe des Heissfilms (Ansicht von der Seite)	122
B.1	Messunsicherheit der Temperaturmessung der Kalibrierstrecke, Messtag 5.1	124
B.2	Übertragungsfunktion mit erweiterter Unsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1	125
B.3	Absolute und relative Standardunsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1	126
B.4	Beiträge zur Unsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1	126

Tabellenverzeichnis

2.1	Stoffgrößen von Helium am Ein- und Austritt	6
3.1	Randbedingungen und Strömungsparameter für Rohrströmungen beider Messgeräte	11
3.2	Größen und Stoffparameter zur Dimensionsanalyse des HF7	19
3.3	Beiträge zur Unsicherheit des Venturirohrs	27
3.4	Beiträge zur Unsicherheit des Heissfilmsensors	30
5.1	Vorteil-Nachteil-Analyse	62
6.1	Messstellenliste Verdichterkreislauf gemäss Schema in Abbildung 6.1	63
6.2	Messstellenliste Kalibrierstrecke gemäss Schema in Abbildung 6.4	67
6.3	Messtage des Verdichterkreislaufs und der Kalibrierstrecke	74
6.4	Beiträge zur Messunsicherheit des Differenzdrucksignals	82
6.5	Beiträge zur Messunsicherheit der Referenz-Massenstrommessung	83
7.1	Statistik der Regressionsanalyse für Messtag 3 bis 5.1 ohne Gewichtung	87
7.2	Statistik der Regressionsanalyse für 5 g/s	93
7.3	Statistik der Regressionsanalyse für 3 g/s	96
7.4	Unsicherheiten der Mengenmessung mittels Venturirohr für 5 g/s kalibriert	100

Literatur

- [1] BLONDEL, A ; BRAVAR, A ; POHL, M ; BACHMANN, S ; BERGER, N ; KIEHN, M ; SCHÖNING, A ; WIEDNER, D ; WINDELBAND, B ; ECKERT, P ; FISCHER, P ; PERIĆ, I ; HILDEBRANDT, M ; DISSERTORI, G ; GRAB, C ; WALLNY, R ; GREDIG, R ; ROBMANN, P ; STRAUMANN, U: *Research Proposal for an Experiment to Search for the Decay $\mu \rightarrow eee$* . Dezember 2012
- [2] AESCHBACHER, Frank M. ; DEFLOREN, Marin ; NOEHTE, Lars Olivier S.: *Mechanics, readout and cooling systems of the Mu3e experiment*. 2020
- [3] DEFLOREN, Marin: *Helium cooling of Silicon Pixel Detector for Mu3e Experiment*, FHNW, Diplomarbeit, März 2019. <https://www.psi.ch/sites/default/files/import/mu3e/ThesesEN/MasterDeflorin.pdf>
- [4] BERGER, Niklaus: The Mu3e Experiment. In: *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 248-250 (2014), März, S. 35–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2014.02.007>. – DOI 10.1016/j.nuclphysbps.2014.02.007
- [5] PETERSEN, H.: *The properties of helium: Density, specific heats, viscosity, and thermal conductivity at pressures from 1 to 100 bar and from room temperature to about 1800 K*. Risø National Laboratory, 1970 (Denmark. Forskningscenter Risøe. Risoe-R 224). https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/52768509/ris_224.pdf. – ISBN 87–550–0055–5
- [6] *Digi-Key Electronics*. : *Digi-Key Electronics*. Thief River Falls, Minnesota, United States, 2020 (accessed August 9, 2020). <https://www.digikey.com/>
- [7] SENSIRION AG (Hrsg.): *Datasheet SDP8xx-Analog*. Version 1. Laubisruetistr. 50, CH-8712 Staefa ZH, Switzerland: Sensirion AG, März 2018. https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/8_Differential_Pressure/Datasheets/Sensirion_Differential_Pressure_Sensors_SDP8xx_Analog_Datasheet.pdf
- [8] FLUCHER, Niculin: *Sitzungsprotokoll Mengenummessung Nr. 9*. April 2020
- [9] *Innovative Sensor Technology IST AG*. : *Innovative Sensor Technology IST AG*. Stegrütistrasse 14, 9642 Ebnat-Kappel, 2020 (accessed August 9, 2020). <https://www.ist-ag.com/>
- [10] INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY IST AG (Hrsg.): *Application Note - FS7*. Stegrütistrasse 14, 9642 Ebnat-Kappel: Innovative Sensor Technology IST AG, https://www.ist-ag.com/sites/default/files/AFFS7_E.pdf. – AFFS7 E2.2.0
- [11] MISHRA, Manish K. ; DUBEY, Vikas ; MISHRA, P. M. ; KHAN, Isharat: *MEMS Technology: A Review*. Journal of Engineering Research and Reports, 2019. – 1–24 S. <http://dx.doi.org/10.9734/jerr/2019/v4i116891>. <http://dx.doi.org/10.9734/jerr/2019/v4i116891>. – ISBN 1–84402–020–7
- [12] SIGLOCH, Herbert: *Technische Fluidmechanik*. Version: 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54467-9>. – DOI 10.1007/978-3-662-54467-9
- [13] SPURK, Joseph ; AKSEL, Nuri: *Strömungslehre*. Version: 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-13143-1>. – DOI 10.1007/978-3-642-13143-1

- [14] BAEHR, Hans D. ; STEPHAN, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung*. Version: 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49677-0>. – DOI 10.1007/978-3-662-49677-0
- [15] BOSMA, Andries: *Whitepaper Efficient Gas Flow Measurements in Bypass*. Version 1. Laubisruetistr. 50, CH-8712 Staefa ZH, Switzerland: Sensirion AG, https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Corporate/Specialist_Articles/Sensirion_Specialist_Article_Gas_Flow_Bypass_DE.pdf
- [16] CASCETTA, F. ; ROTONDO, G. ; PICCATO, A. ; SPAZZINI, P.G.: Calibration procedures and uncertainty analysis for a thermal mass gas flowmeter of a new generation. In: *Measurement* 89 (2016), 280 - 287. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.073>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.073>. – ISSN 0263-2241
- [17] FLUCHER, Niculin: *Projektbericht P5 Mengenmessung*. Januar 2020. – unveröffentlicht
- [18] MENON, E.S.: *Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual*. Elsevier Science, 2014 <https://books.google.ch/books?id=1PtDBAAQBAJ>. – ISBN 9781856178310
- [19] ISO, IEC ; OIML, BIPM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. In: *Geneva, Switzerland* 122 (1995)
- [20] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Version: 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8133-5>. – DOI 10.1007/978-3-8348-8133-5
- [21] THE MATHWORKS, INC. (Hrsg.): *Statistics and Machine Learning Toolbox User's Guide*. Version 11.7. 1 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098: The MathWorks, Inc., März 2020
- [22] LAURIEN, Eckart ; OERTEL, Herbert: *Numerische Strömungsmechanik*. Version: 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03145-9>. – DOI 10.1007/978-3-658-03145-9
- [23] ALLANSWERS.CO.UK: *CFD Modelling of Venturi Meters At Low Reynolds Numbers*. Nottingham, UK. <https://ukdiss.com/examples/cfd-modelling-venturi-meters.php?vref=1>. Version: November 2018
- [24] HOLLINGSHEAD, Colter L.: *Discharge Coefficient Performance of Venturi, Standard Concentric Orifice Plate, V-Cone, and Wedge Flow Meters at Small Reynolds Numbers*. All Graduate Theses and Dissertations. 869, Utah State University, Diplomarbeit, Mai 2011
- [25] KELLER AG FÜR DRUCKMESSTECHNIK (Hrsg.): *Datenblatt Differenzdrucktransmitter PD-39X*. CH-8404 Winterthur: KELLER AG für Druckmesstechnik, Dezember 2019
- [26] MATTHIAS ALTENDORF, Henge B. Dr. Peter Berrie B. Dr. Peter Berrie: *Durchfluss-Handbuch*. CH-4153 Reinach/BL : Endress+Hauser Flowtec AG, 2003. – ISBN 3-9520220-3-9
- [27] ZHANG, Songsong ; SU, Baohuan ; LIU, Jianmin ; LIU, Xuemin ; QI, Guoli ; GE, Yajun: Analysis of flow characteristics and flow measurement accuracy of elbow under different conditions. In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 128 (2018), 012070. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012070>. – DOI 10.1088/1755-1315/128/1/012070. – ISSN 1755-1307
- [28] FLUCHER, Niculin: *Sitzungsprotokoll Mengenmessung Nr. 12*. Mai 2020

-
- [29] ENDRESS+HAUSER (Hrsg.): *Technical Information Proline t-mass 65F, 65I*. Christoph Merian-Ring 4, 4153 Reinach Basel-Landschaft: Endress+Hauser, https://portal.endress.com/wa001/dla/5000009/2467/000/03/TI00069DEN_1314.pdf. – TI00069D/06/EN/13.14
- [30] ENDRESS+HAUSER (Hrsg.): *Technical Information Proline Promass 80A, 83A*. Christoph Merian-Ring 4, 4153 Reinach Basel-Landschaft: Endress+Hauser, https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/0158/000/08/TI00054DEN_1415.pdf. – TI00054D/06/EN/14.15
- [31] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION (Hrsg.): *Specifications USB-6211*. 11500 North Mopac Expwy, Austin, TX 78759: National Instruments Corporation, September 2017. <https://www.ni.com/pdf/manuals/375195d.pdf>
- [32] SENSIRION AG, Reto K.: *Kontakt via www.sensirion.com (FHNW Brugg, Differenzdrucksensoren)*. Aug 2020
- [33] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION (Hrsg.): *Datasheet NI 9213*. 11500 North Mopac Expwy, Austin, TX 78759: National Instruments Corporation, Januar 2016. http://www.ni.com/pdf/manuals/374916a_02.pdf
- [34] PARVIZI, S. ; ARABKOOHSAR, A. ; FARZANEH-GORD, M.: Natural gas compositions variation effect on capillary tube thermal mass flow meter performance. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 50 (2016), S. 229–236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.07.007>. – DOI 10.1016/j.flowmeasinst.2016.07.007. – ISSN 0955–5986

Anhang

A Simulationen

A.1 Simulation Venturirohr

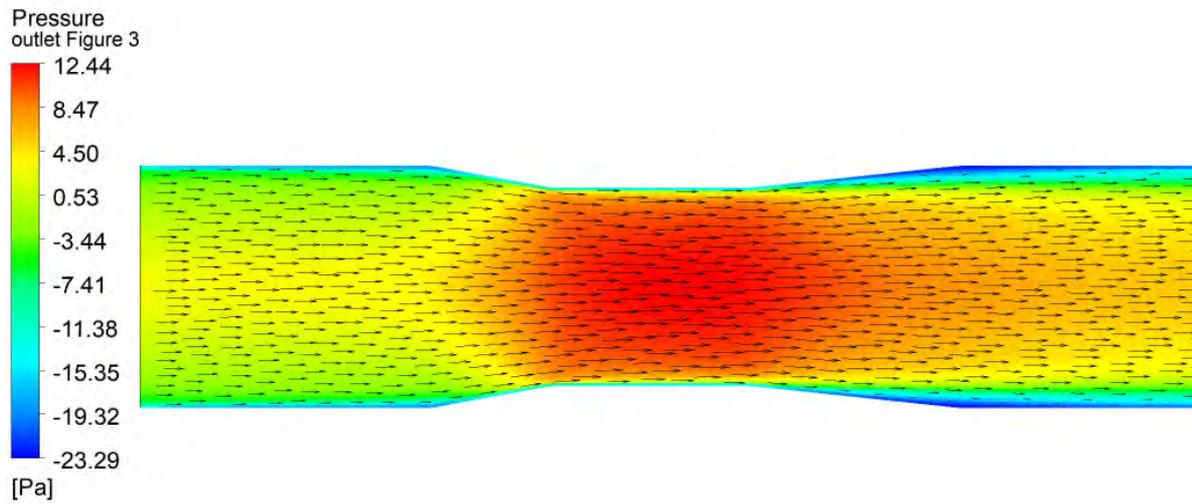


Abbildung A.1: Geschwindigkeitsverteilung im Venturirohr bei $\dot{m} = 2 \text{ g/s}$

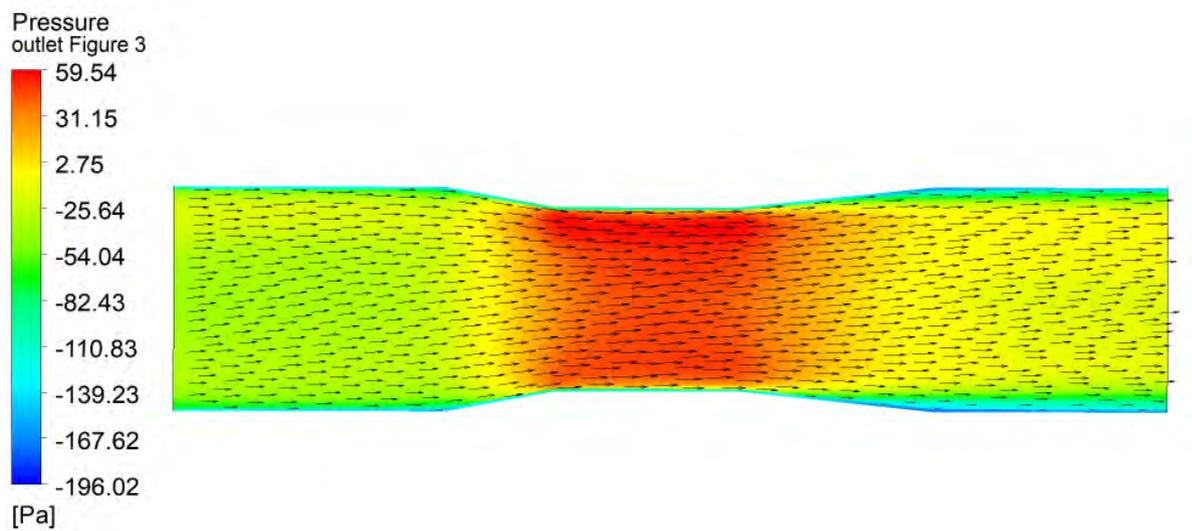


Abbildung A.2: Geschwindigkeitsverteilung im Venturirohr bei $\dot{m} = 5 \text{ g/s}$, verwinkelter Einlaufstrecke und $L_E = 10D$

A.2 Simulation verwinkelte Einlaufstrecke

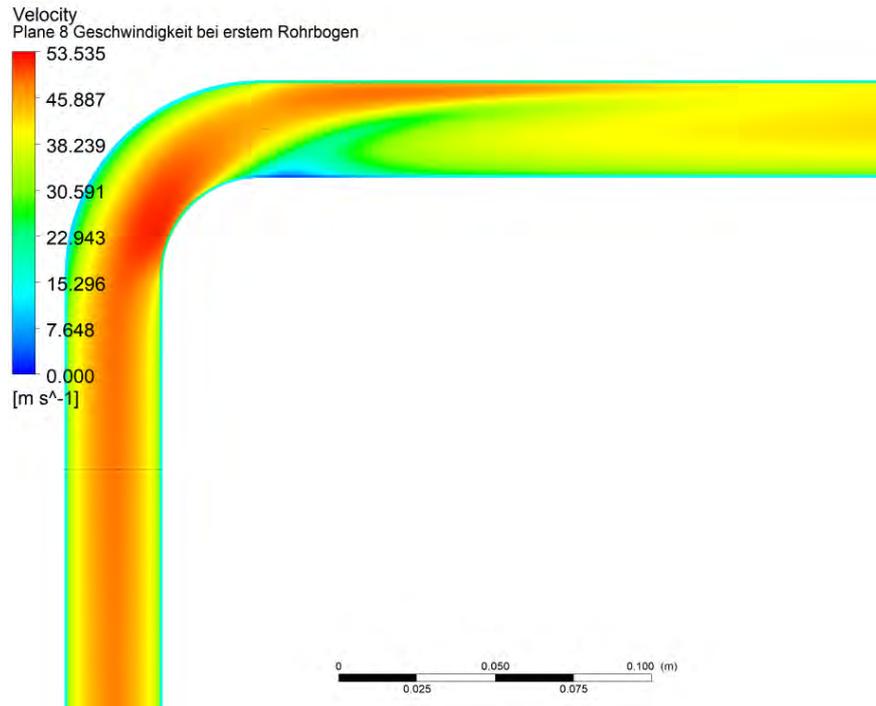


Abbildung A.3: Geschwindigkeitsverteilung im ersten Winkel des Einlaufs $D = 31.3\text{ mm}$

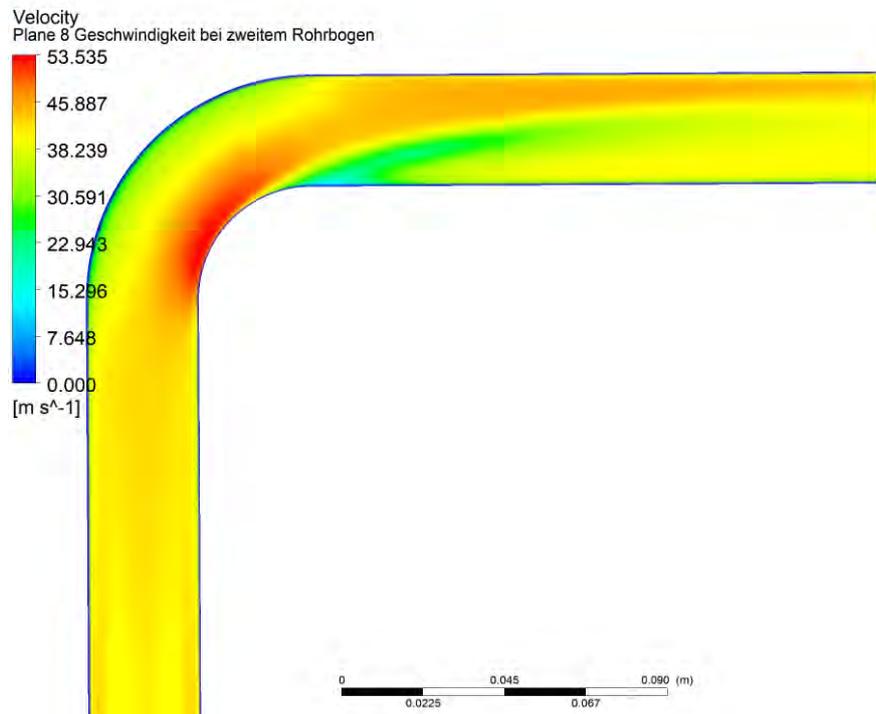


Abbildung A.4: Geschwindigkeitsverteilung im zweiten Winkel des Einlaufs $D = 31.3\text{ mm}$

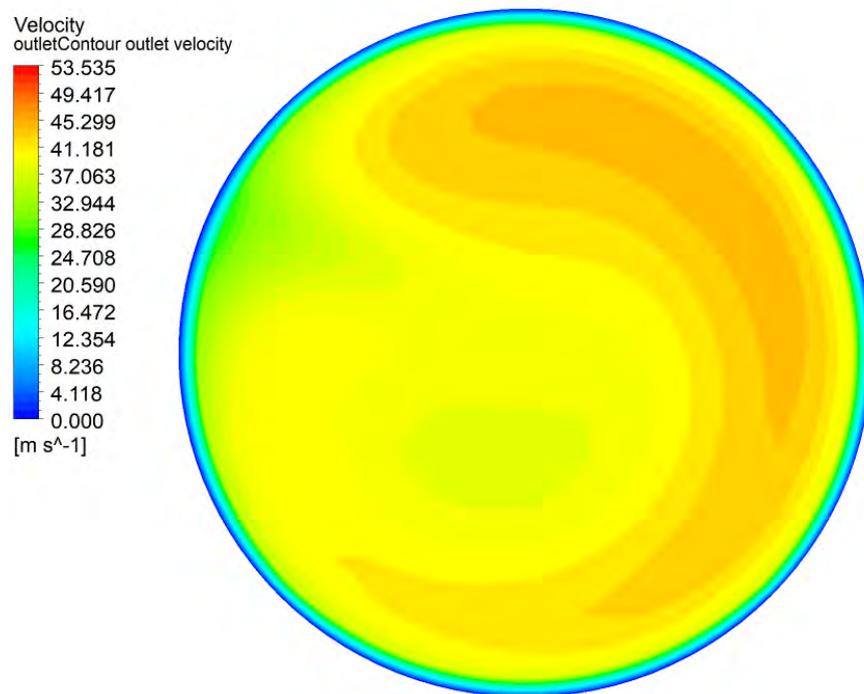


Abbildung A.5: Geschwindigkeitsverteilung nach dem zweiten Winkel des Einlaufs $D = 31.3 \text{ mm}$, $L_E = 5D$

A.3 Simulation Heissfilm

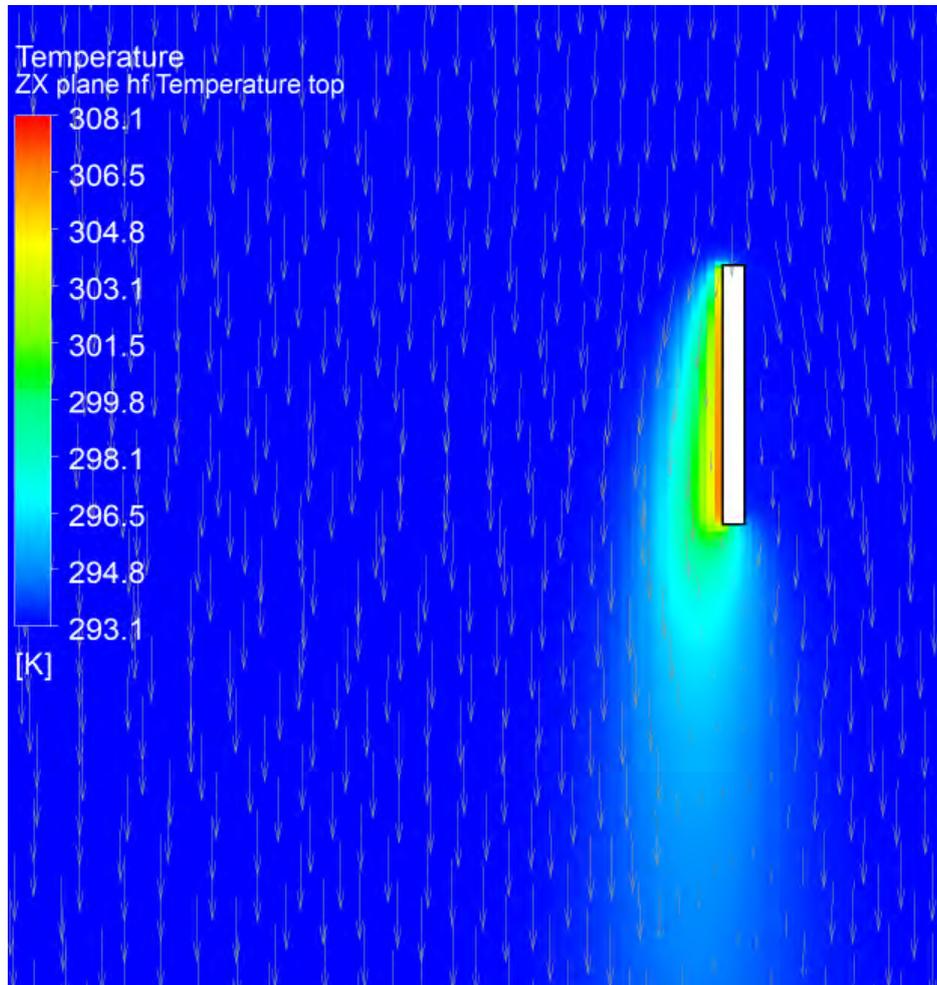


Abbildung A.6: Temperaturverteilung in der Nähe des Heissfilms (Ansicht von oben)

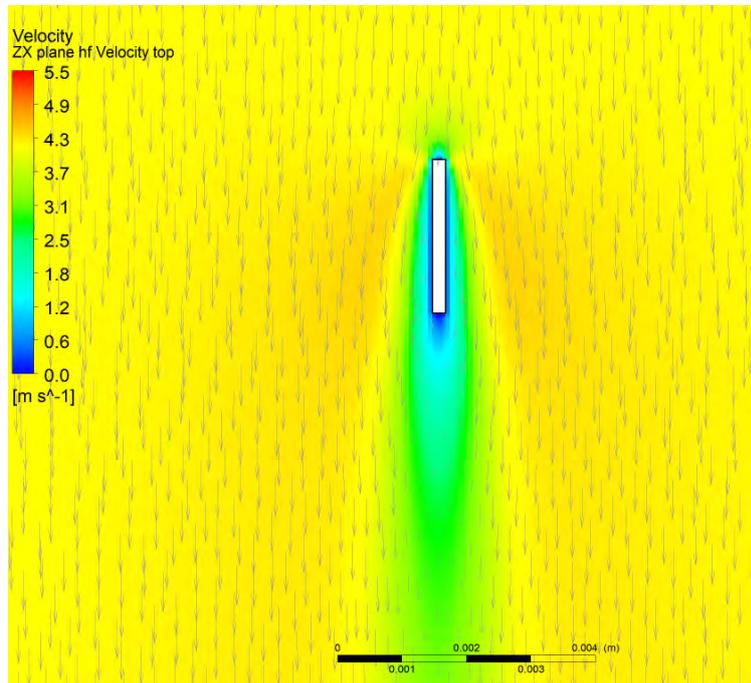


Abbildung A.7: Geschwindigkeitsverteilung in der Nähe des Heissfilms (Ansicht von oben)

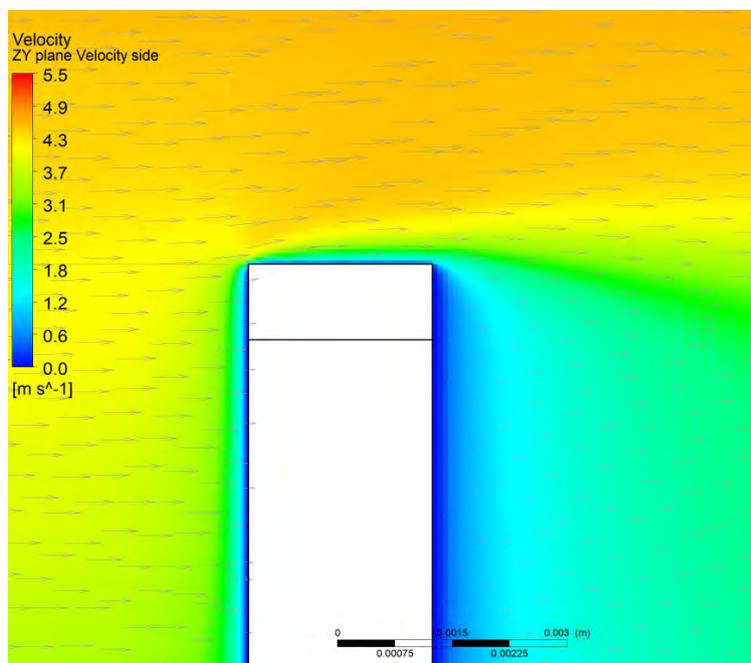


Abbildung A.8: Geschwindigkeitsverteilung in der Nähe des Heissfilms (Ansicht von der Seite)

B Unsicherheitsanalysen

B.1 Unsicherheitsanalysen Kalibrierstrecke

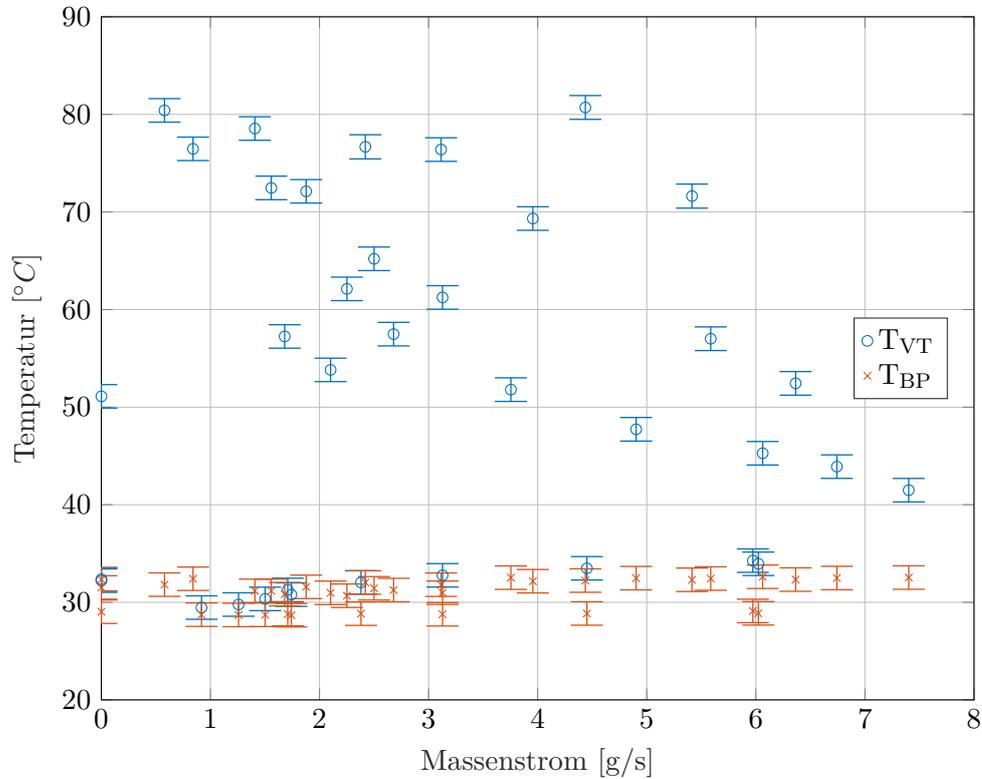


Abbildung B.1: Messunsicherheit der Temperaturmessung der Kalibrierstrecke, Messtag 5.1

Es wird angenommen, dass die Unsicherheit der Temperaturmessung im Bypass dieselbe ist der Messung im Venturirohr.

B.2 Unsicherheitsanalyse Venturirohr gemäss Messtag 5.1

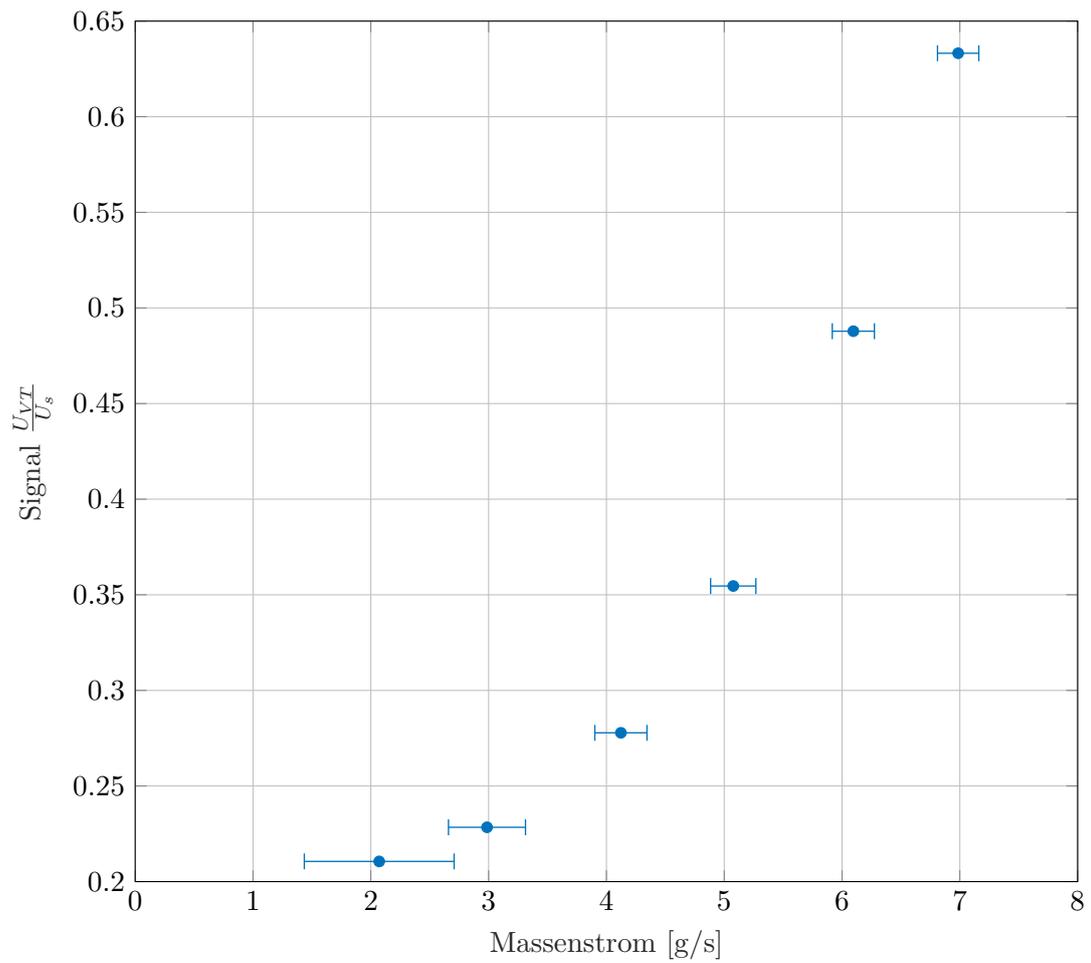


Abbildung B.2: Übertragungsfunktion mit erweiterter Unsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1

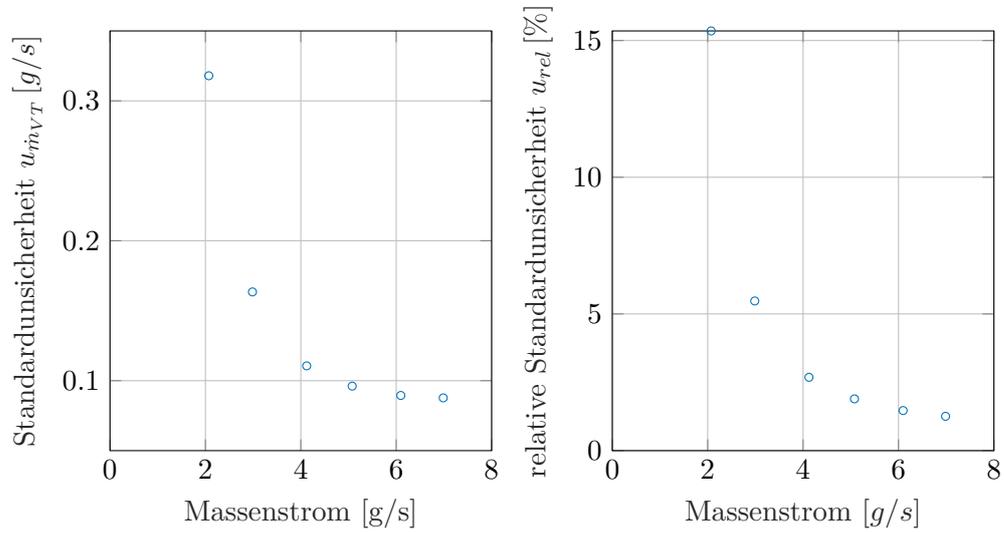


Abbildung B.3: Absolute und relative Standardunsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1

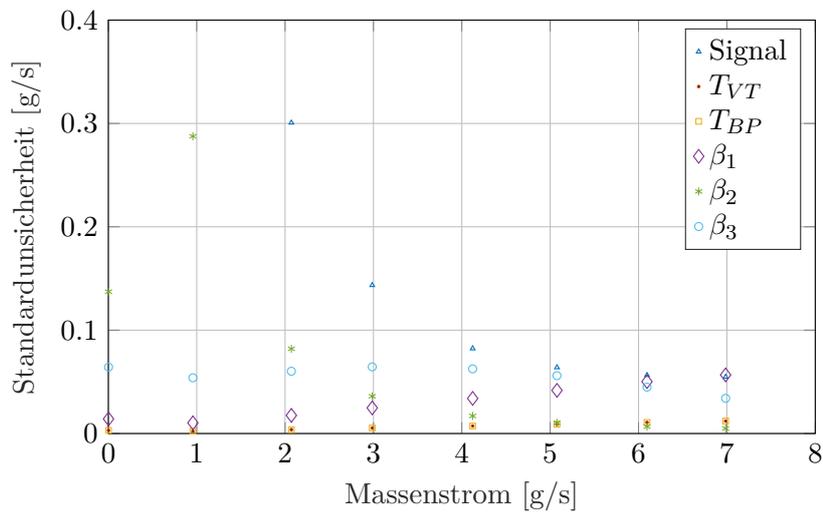
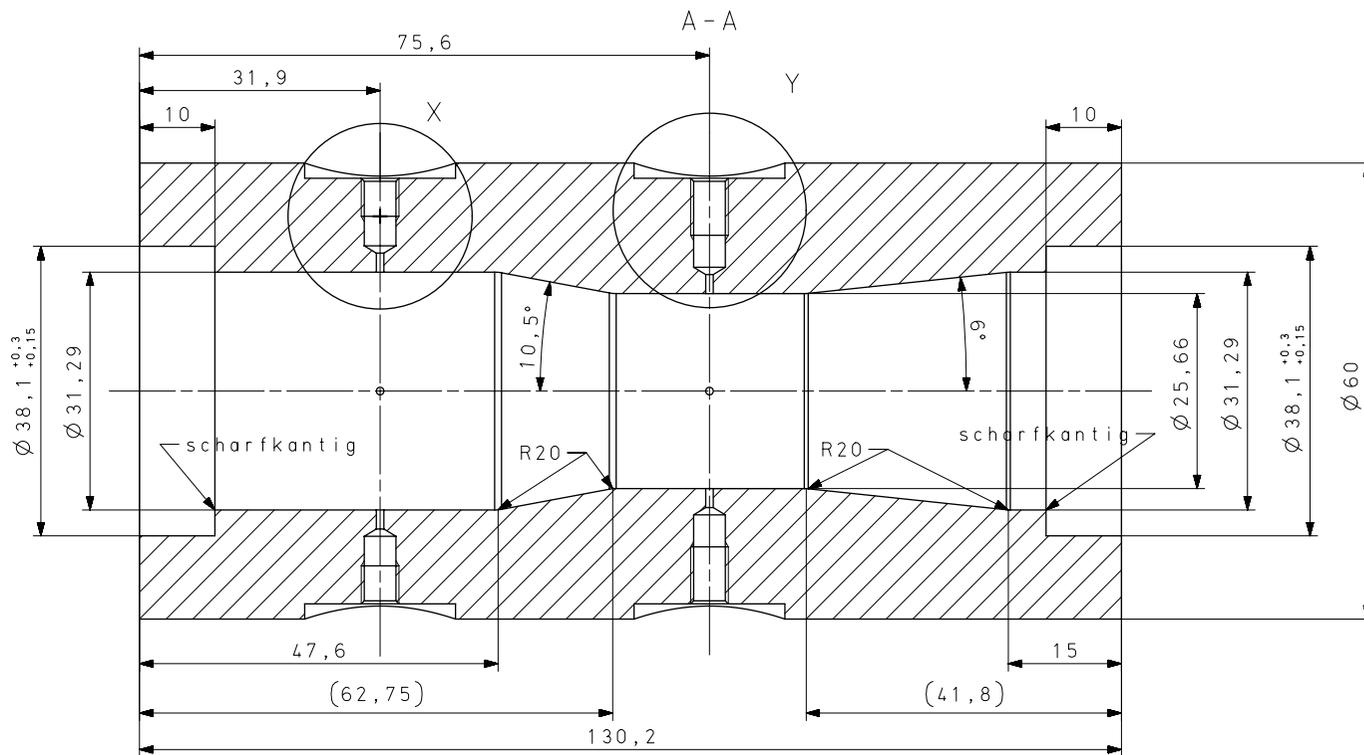
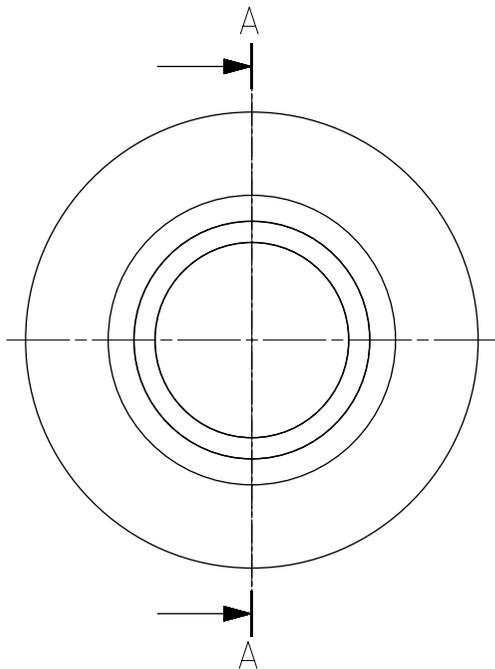
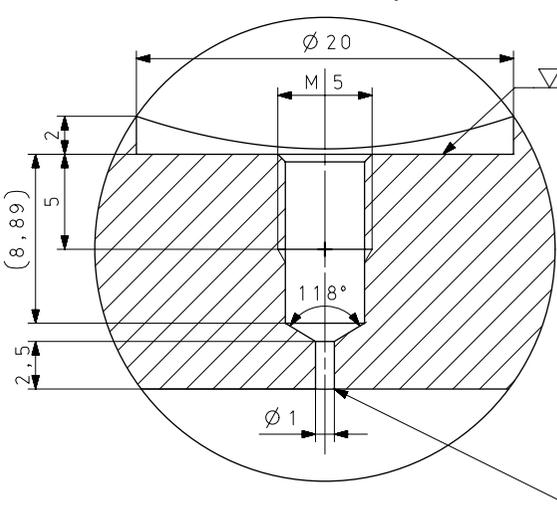


Abbildung B.4: Beiträge zur Unsicherheit, Modell für 5 g/s kalibriert, Messtag 5.1

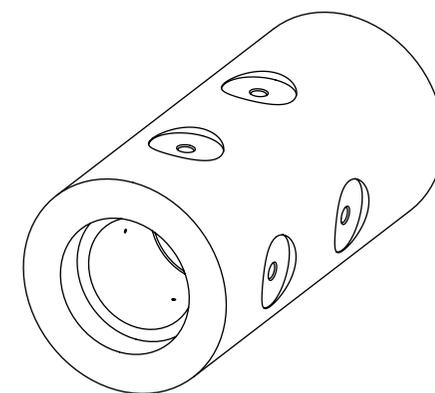
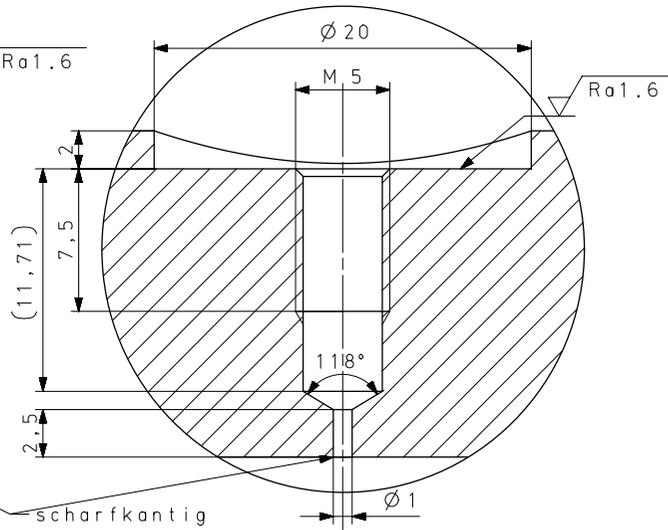
C Fertigungszeichnungen



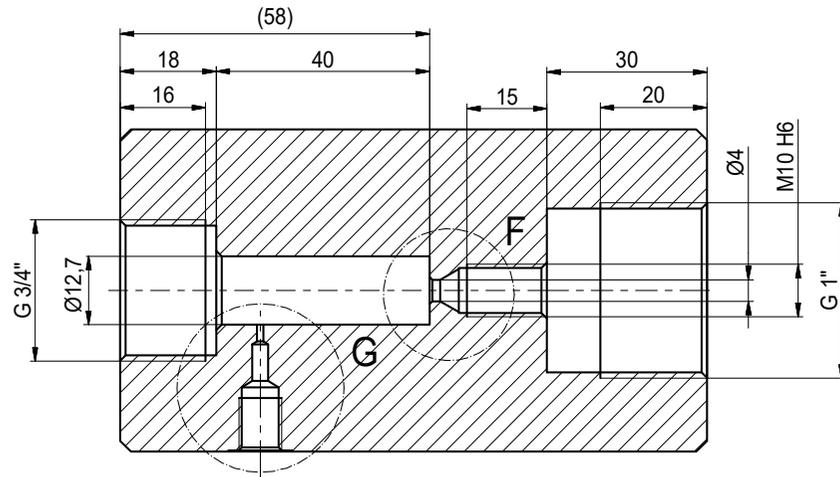
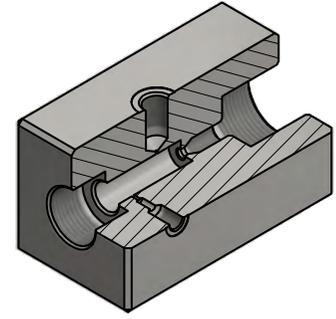
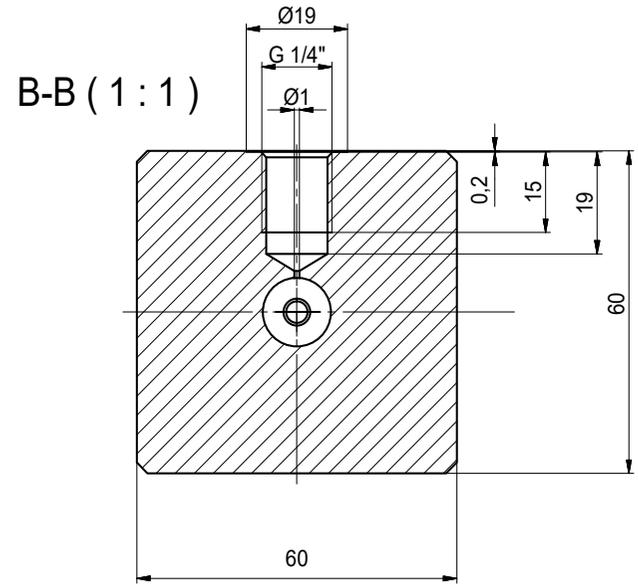
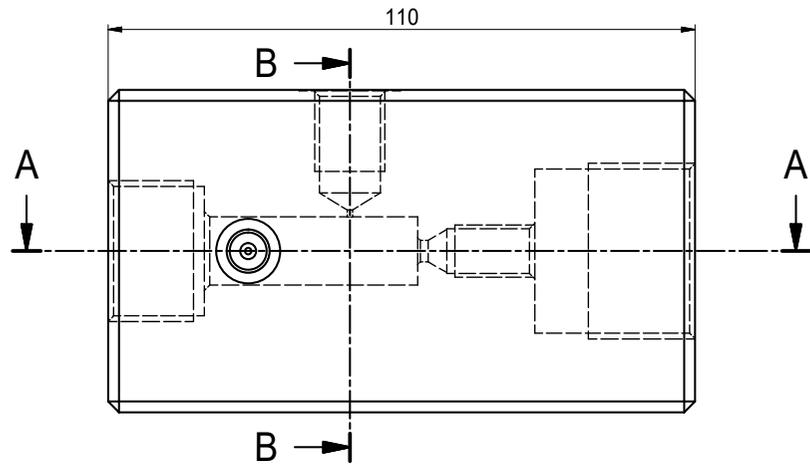
X (5:1)
(4x am Umfang)



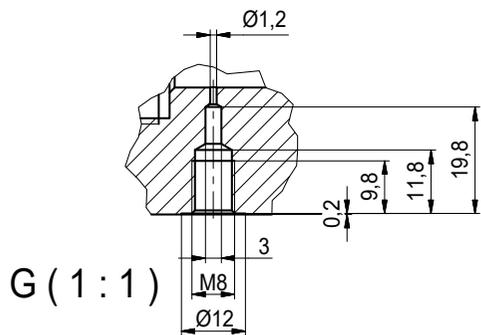
Y (5:1)
(4x am Umfang)



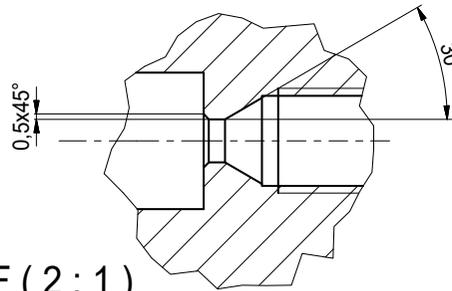
Maßstab	2:1	Werkstoff	
Ausgabedatum	2019-12-13	1.4301	
Gezeichnet			
Geprüft		Bezeichnung	Venturirohr, 1.5 Zoll, 0.82
Allgemeintoleranz nach ISO 2768-mK		Projekt	P5 Mengenummessung
Tolerierungsgrundsatz ISO 8015		Zeichnung	P5_Mengenummessung_Venturirohr_1.5Zoll_0.82.dwg
alle Masse in mm		Änd. / Blatt	b
Refer to ISO 16016 / SR 231.1		NX-Version	11,0
Fachhochschule Nordwestschweiz Klosterzelgstrasse 2 5210 Windisch ++41 56 202 77 00 www.fhnw.ch/technik			1/1



A-A (1:1)



G (1:1)



F (2:1)

1	1	Duesenblock_V2	110 x 60 x 60	Edelstahl	2841,063 g
POS.	STÜCK	BEZEICHNUNG	Dimension	MATERIAL	MASSE
Allgemeintoleranz nach ISO 2768-1 m K				Status: InBearbeitung	Projekt:
				Massstab: 1:1	
			Datum: 19.06.2020	Name: C. Hersberger	
			Duesenblock_V2		
			Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Technik Klosterzelgstrasse 2 5210 Windisch Tel.: 056 202 77 00		
			S:\HTWA1838_ITFEIA1838_Mu3eI04_Kalibrierstrecke_PSI\CAD\Drawings\Duesenblock_V2.idw		
			Duesenblock_V2.idw		
Status	Änderungen	Datum	Name	Blattnummer: 1	
					A3

D Empfehlungen

Zusammenfassung der Empfehlungen zur Massenstrommessung von Helium mittels Venturirohr in Kühlkreisläufen des Mu3e

Niculin Flucher

12. August 2020

Diese Zusammenfassung basiert auf der Bachelor-Thesis *Massenstrommessung von Helium in Kühlkreisläufen des Mu3e Experiments mit MEMS-Sensoren*. Weitere Informationen zum Entwicklungsprozess, den Simulationen, Abbildungen des Prototypen, Abbildungen der Kalibrierstrecke, Messresultate und Stücklisten können dem technischen Bericht zur Thesis entnommen werden.

1 Systembeschreibung

Mittels Venturirohr wird eine Druckdifferenz zwischen einer Ebene mit grossem und einer Ebene mit kleinem Durchmesser erzeugt. Dieser kann mithilfe von Bernoullis Gleichung abgeschätzt werden.

$$\frac{p_i}{\rho} + \frac{w_i^2}{2} + g \cdot z_i = \text{const.} \quad (1.1)$$

Am Umfang werden in diesen Ebenen vier Druckentnahmebohrungen angebracht, welche über T-Stücke verbunden werden. Zwischen den beiden Druckniveaus wird der Differenzdrucksensor eingesetzt. Zur Untersuchung wurde der *SDP816-500Pa* der Firma *Sensirion* verwendet. Derselbe Sensor kann auch mit digitalem Ausgangssignal verwendet werden. Der Sensor ist ein mikrothermischer Durchflusssensor mit zwei Anschlüssen. Das Gas durchströmt eine Kapillare im Sensor, wenn ein Differenzdruck anliegt. Dadurch wird eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Temperatursensoren erzeugt, welche ein Mass für den Massenstrom durch die Kapillare ist.

Zusätzlich wird die Gastemperatur nahe des Venturirohrs gemessen und der statische Druck unmittelbar vor dem Venturirohr. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Druck- oder Temperatursensoren vor dem Venturirohr in die Strömung ragen und Wirbel erzeugen können.

Für die Untersuchung wurde ein Venturirohr mit den Dimensionen gemäss Abbildung 1.1 Simuliert, gefertigt und getestet. Die Fertigungszeichnung des Prototypen ist im Anhang.

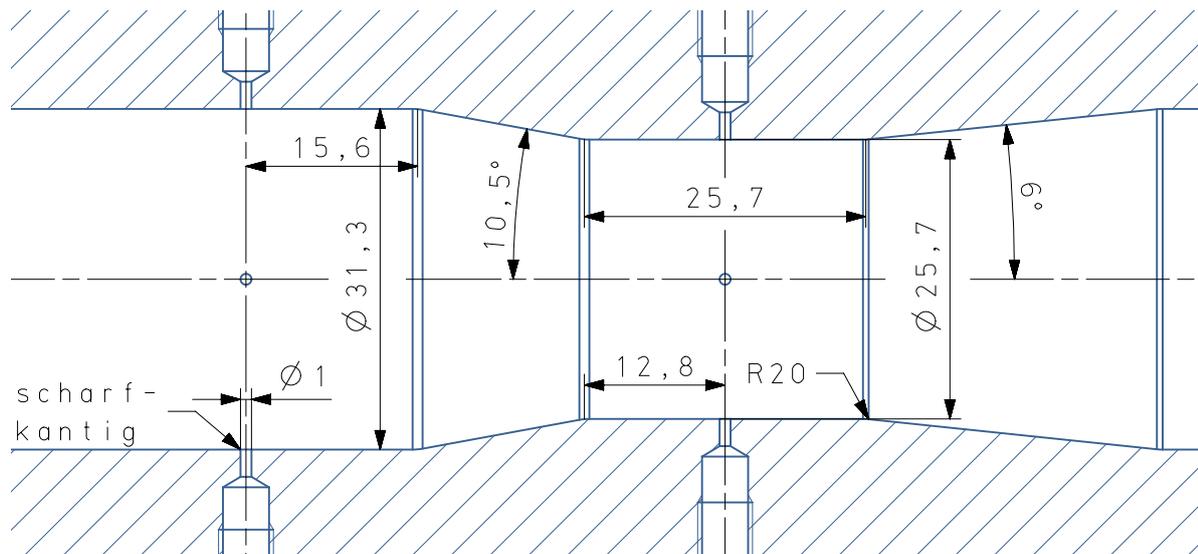


Abbildung 1.1: Querschnitt Venturirohr

2 Kalibrierung

Bei der Kalibrierung wird die *Master-Meter*-Methode verwendet. Dabei wird ein oder mehrere zu kalibrierende Messgeräte (*Meter*) mit einem kalibrierten Messgerät (*Master*) in Serie geschaltet. Die Messunsicherheit des *Masters* sollte deutlich besser sein als die zu erreichende Messunsicherheit der *Meter*-Geräte. Es werden über den ganzen Messbereich 5...10 Messpunkte angefahren und mindestens einmal wiederholt. Wenn ein Soll-Messbereich gegeben ist, dann sollen mindestens drei Messpunkte in diesem Bereich gewählt werden. Wenn ein Soll-Betriebspunkt gegeben ist, dann soll dieser ebenfalls angefahren werden. Dabei wird Stationarität abgewartet, da eine Änderung des Massenstroms nicht bei allen Messgeräten sofort bemerkbar ist und eine Zeitliche Verzögerung aufgrund der Reihenfolge der Messgeräte auftreten kann. Die einzelnen Messpunkte werden während 30...60 Sekunden stationär gehalten. Die Messungen über diesen Zeitraum werden gemittelt.

Die Messgeräte *Master* und *Meter* müssen nicht gleichartig sein, so wurde das Venturirohr mit einem Coriolis-Durchflussmessgerät in Serie geschaltet. Die Strömungsbedingungen (Druck und Temperatur) unterschieden sich dabei wesentlich, nur der Massenstrom war gleich. Dazu ist es essentiell, dass die Kalibrierstrecke dicht ist und kein Massenstrom zwischen den Messgeräten verloren geht. Die Übertragungsfunktion des Venturirohrs sollte der Abbildung 2.1 ähneln und eine Potenzfunktion beschreiben.

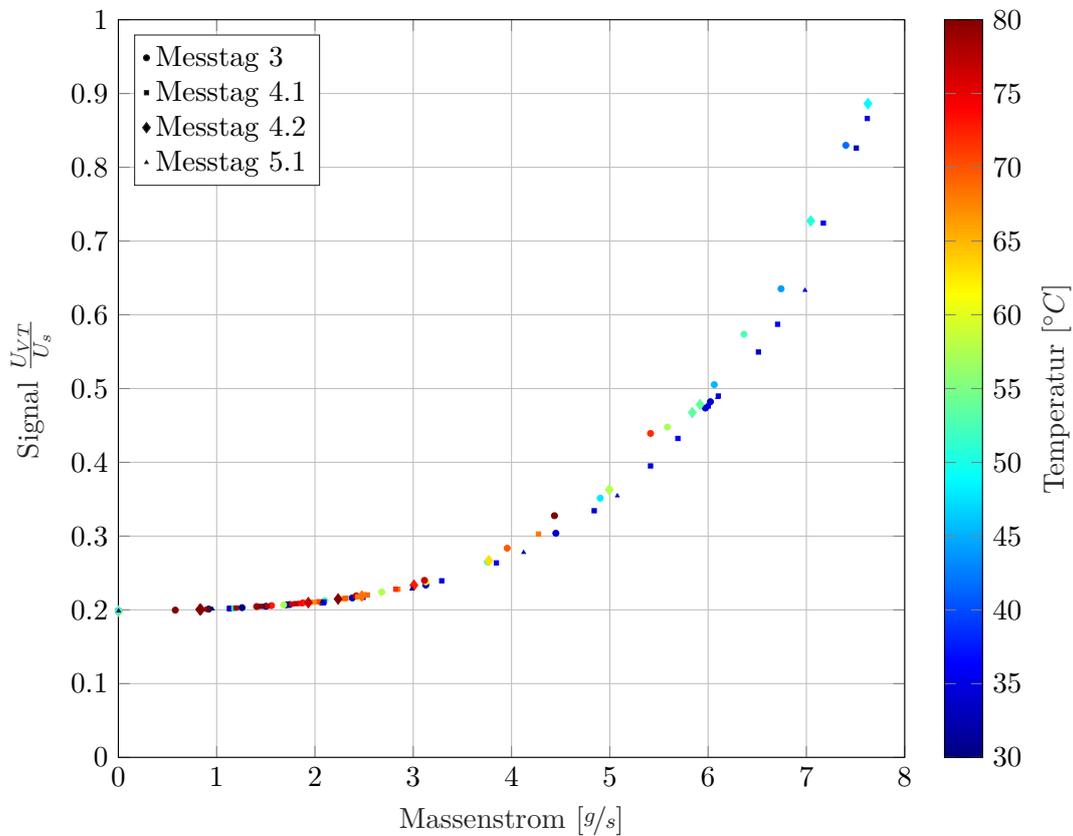


Abbildung 2.1: Messpunkte mit Venturirohr und Kalibrierstrecke

2.1 Regressionsanalyse

Die Modellgleichung 2.1 verwendet die Messgrößen T_{BP} , T_{VT} , μ_{BP} und das Differenzdrucksignal $\frac{U_{VT}}{U_s}$.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot C_D \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (2.1)$$

Die Parameter β_1 , β_2 und β_3 werden beim Kalibrieren mittels nichtlinearer Regression ausgeglichen. Für die Durchflusszahl des beschriebenen Venturirohrs C_D kann die Beziehung 2.2 eingesetzt werden.

$$C_D = 1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{Re_{VT}}} \quad (2.2)$$

Die Parameter der Modellgleichung müssen für jedes Messgerät (Kombination von Differenzdrucksensor und Venturirohr) bestimmt werden.

Beispielhafte Kalibrierung für Soll 5 g/s

Im Folgenden wird beispielhaft mit sechs Messpunkten ein Venturirohr für einen Soll-Massenstrom von 5 g/s kalibriert und getestet. Die Messdaten sind gleichmässig verteilt über den Bereich $2 \dots 7 \text{ g/s}$.

Es wird eine Gewichtung vorgenommen, sodass die Messpunkte um 5 g/s am stärksten gewichtet werden (siehe Abbildung 2.2). Die hier gewählte Gewichtung entspricht einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichte $\mathcal{N}(5, 2)$. Wenn die Messpunkte gezielt auf den Soll-Massenstrom konzentriert aufgenommen werden, muss keine Gewichtung vorgenommen werden. Die nachträgliche Gewichtung simuliert, dass mehr Punkte im Soll-Bereich aufgenommen wurden.

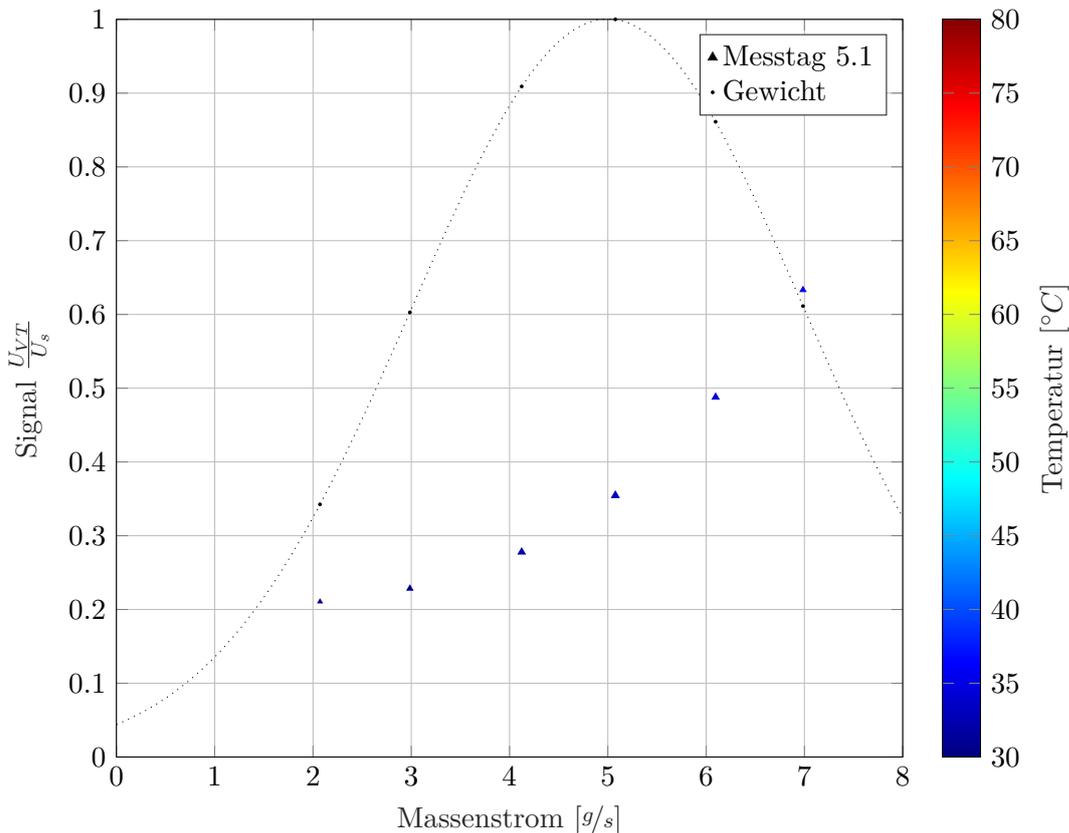


Abbildung 2.2: Gewichtung der Beobachtungen von Messtag 5.1 mit Soll-Massenstrom 5 g/s

Dem nichtlinearen Solver (hier MATLAB) werden die Beobachtungen (Messungen und Referenz-Massenstrom) und die Gewichtung übergeben. Der Solver gibt die Resultate gemäss Tabelle 2.1 aus. Die Modellparameter können der Tabelle entnommen werden.

Die Regressionsanalyse ergibt die Residuen gemäss Abbildung 2.3. Residuen sind die Abweichung der verwendeten Datenpunkte vom Modell mit den ausgeglichenen Parametern. Diese sollen möglichst klein und gleichmässig um null verteilt sein. Eine kleine Streuung der Residuen besagt, dass das Modell gut zu dem Messdaten passt.

Parameter	Wert	Standardfehler	p-Wert
β_1	9.203	0.0732	$1.108 \cdot 10^{-6}$
β_2	-0.2025	0.00101	$2.74 \cdot 10^{-7}$
β_3	0.2968	0.00566	$1.53 \cdot 10^{-5}$
Beobachtungen		6	
Freiheitsgrade		3	
Root Mean Squared Error		0.0134	
Bestimmtheitsmass R^2		1	
adjust. Bestimmtheitsmass R_{adj}^2		1	

Tabelle 2.1: Statistik der Regressionsanalyse für 5 g/s

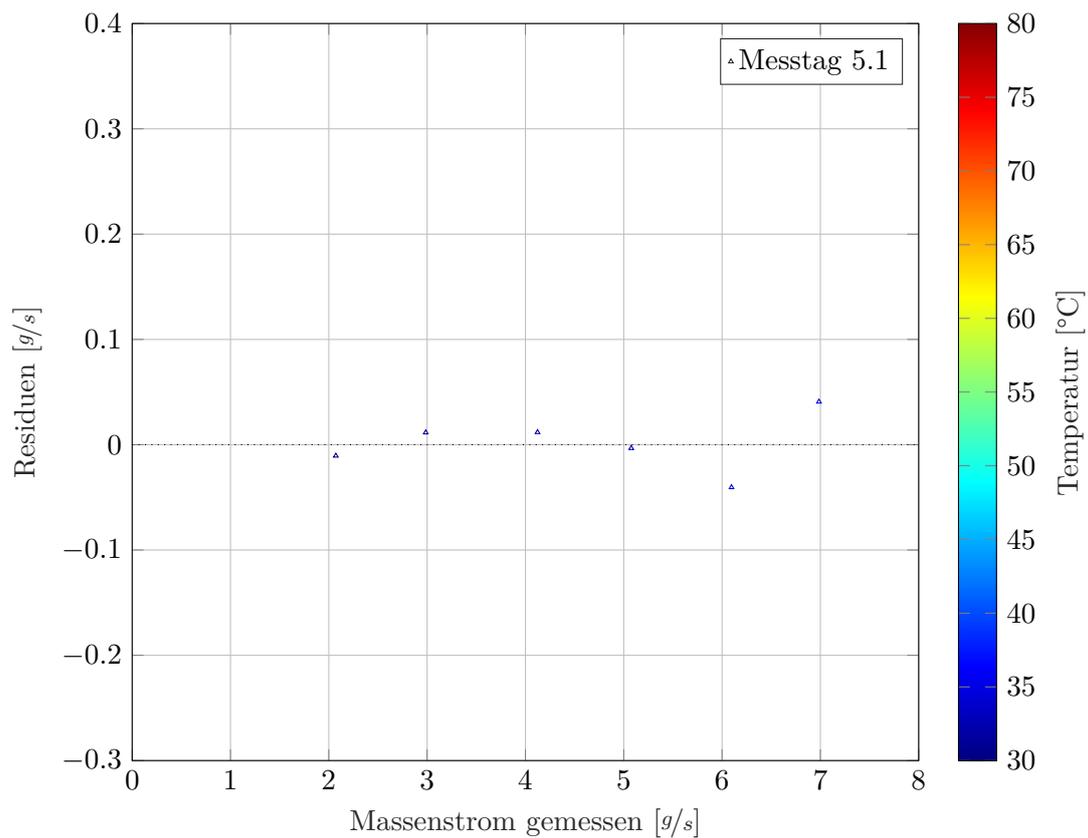


Abbildung 2.3: Residuen des für 5 g/s kalibrierten Modells

2.2 Resultatbildung mit Tangentenverfahren

Für die Messung muss nun die Funktion 2.3 mit einem numerischen Lösungsverfahren (z.B. Newtonsches Tangentenverfahren) für nichtlineare Gleichungen iterativ nach \dot{m} aufgelöst werden. Dabei werden die Messgrößen für Temperatur, Spannung, Viskosität, sowie die bestimmten Modellparameter eingesetzt und die Nullstelle der Funktion 2.3 bestimmt.

$$0 = \dot{m} - \sqrt{\frac{T_{BP}}{T_{VT}}} \cdot \left(1.0111 - 4.3925 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{\dot{m} \cdot 4 \cdot D}{\mu_{VT}}}} \right) \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} + \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (2.3)$$

Als erste Annäherung kann entweder ein fester Wert (z.B. 5 g/s) gewählt werden oder ein besserer Schätzwert, der das Resultat besser approximiert.

$$x_0 = \beta_1 \cdot \left(\frac{U_{VT}}{U_s} - \beta_2 \right)^{\beta_3} \quad (2.4)$$

Dieser Wert ähnelt der Modellgleichung, benötigt jedoch nur das Signal des SDP (Sensirion Differential Pressure Sensor) und verringert die benötigten Iterationsschritte.

Das Testen der Modellgleichung mit Parametern gemäss dem Beispiel für 5 g/s mit Messdaten anderer Messtage ergibt die Messfehler gemäss Abbildung 2.4.

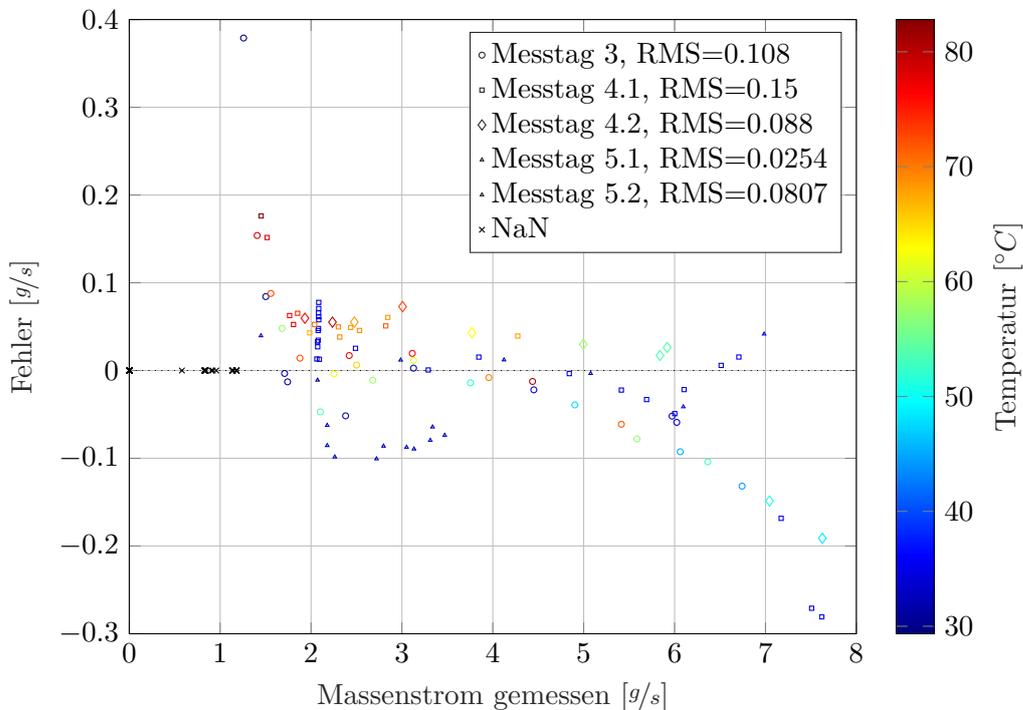


Abbildung 2.4: Messfehler des für 5 g/s kalibrierten Modells

3 Empfehlungen

Die im Folgenden aufgeführten Empfehlungen zum Einsatz (Tabelle 3.1) und zu den Einbaubedingungen (Tabelle 3.2) wurden für die Methode der Mengenummessung von gasförmigem Helium mittels Venturirohr und einem analogen mikrothermischen Durchflusssensor im Bypass formuliert.

3.1 Einsatzbereich

Der folgende Einsatzbereich wurde mit Ausnahme der Temperaturen unter 25°C geprüft.

Eigenschaft	Grösse/Bereich	Kommentar
Medium	Helium	Verunreinigungen mit Fremdgasen, welche von den Bedingungen der Kalibrierung abweichen, sollen vermieden werden. Verunreinigungen mit $< 1.5\%$ Stoffmengenanteil ergeben einen systematischen Fehler von ca. 5% absolut (siehe Abbildung 2.4, Messtag 5.2).
Massenstrom	$2 \dots 7 \text{ g/s}$	Der maximal messbare Wert kann bei kleiner Dichte abnehmen. Die Mengenummessung ist bei kleinen Massenströmen ($0 \dots 1 \text{ g/s}$) sehr unsicher. Zudem kann die Messgrösse nicht mehr mit dem Tangentenverfahren bestimmt werden (NaN).
Temperatur	$0 \dots 80^{\circ}\text{C}$	Temperatur des Gases im Venturirohr
Druck	$1 \dots 1.3 \text{ bara}$	Der Berstdruck des Differenzdrucksensors beträgt 1 bar .

Tabelle 3.1: Einsatzbereich des Venturirohrs

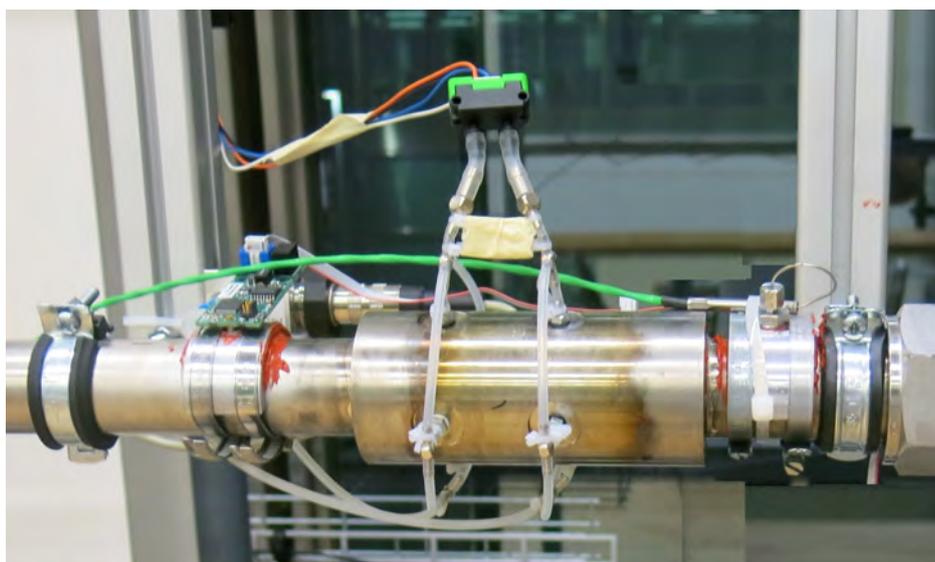


Abbildung 3.1: Prototyp des Venturirohrs

3.2 Einbaubedingungen

Die folgenden Bedingungen sollten beim Venturirohr beachtet werden.

Bedingung	Grösse/Bereich	Kommentar
Einlaufstrecke	$20D$, ($10D$)	In der Einlaufstrecke dürfen keine Winkel, Rohrbögen oder andere Rohreinbauten sein. Als ungünstigste Situation werden zwei aufeinanderfolgende versetzte 90° -Winkel angenommen. Die dadurch entstehenden Wirbel verursachen einen Fehler bis zu 2%. Bei der halben Einlaufstrecke wird ein Fehler von bis zu 3% erwartet.
Auslaufstrecke	$5D$	Rohreinbauten in der Auslaufstrecke sind weniger heikel. Ein Thermoelement kann ohne Problem verbaut werden. Auf Winkelstücke sollte aber wenn möglich in den ersten $5D$ verzichtet werden.
Neigung	beliebig	Die Einbaurichtung ist nicht relevant für die Funktionalität des Venturirohrs. Der Fehler der begangen wird, wenn das Rohr senkrecht eingebaut wird, anstatt horizontal ist theoretisch vernachlässigbar, da der hydrostatische Druckunterschied zwischen den Druckentnahmeebenen keine Strömung im Bypass erzeugt, da der Bypass mit demselben Gas derselben Dichte gefüllt ist.
Erschütterungen	-	Nicht untersucht
Strahlung	-	Nicht untersucht
Magnetfeldstärke	-	Nicht untersucht

Tabelle 3.2: Empfohlene Einbaubedingungen des Venturirohrs

3.3 Wahl des Durchmessers

Für die Anpassung des Durchmessers des Venturirohrs für grössere und kleinere Massenströme im Mu3e-Experiment kann gemäss Gleichung 3.1 ein geeigneter Durchmesser bestimmt werden. Die gemessenen Grössen stammen aus den Versuchen mit dem Prototypen. Die gemessenen Grössen aus dem Versuch (Index m) gemäss Tabelle 3.3 werden dabei eingesetzt.

Grösse	Wert
D_m	31.3 mm
\dot{m}_m	5 g/s
ρ_m	0.21 kg/m^3

Tabelle 3.3: Messgrössen gemäss Versuchen

$$D = D_m \cdot \sqrt{\frac{\dot{m} \cdot \rho_m}{\dot{m}_m \cdot \rho}} \quad (3.1)$$

Es ist darauf zu achten, dass der Durchmesser nicht kleiner ist als D_{min} gemäss Gleichung 3.2 wird.

$$D_{min} = D_m \cdot \sqrt{\frac{\dot{m} \cdot \rho_{max}}{\dot{m}_{max} \cdot \rho}} \quad (3.2)$$

3.4 Empfehlungen zur Kalibrierung

Für eine erfolgreiche Kalibrierung sollte folgendes beachtet werden:

- Die Kalibrierung soll mit demselben Medium erfolgen. Verunreinigungen mit Luft bis $m_L/m \leq 10\%$ verursachen gemäss ersten Versuchen einen systematischen Fehler von ca. 5%.
- Die Kalibrierung soll bei ähnlichen Temperaturen und Drücken erfolgen, wie im Betrieb zu erwarten sind. Dies ist besonders bei hohen Massenströmen zu beachten, da die der Druckabfall der Leitungen zur Rückgewinnungsanlage quadratisch mit dem Massenstrom zunehmen.
- Die Durchflussmessung ist von der Temperatur im Venturirohr und im Bypass abhängig. Daher müssen beide Temperaturen überwacht werden. Eine leichte Druckabhängigkeit konnte ebenfalls beobachtet werden, wurde aber nicht in der Modellgleichung berücksichtigt.
- Für die Kalibrierung soll die optimale Einlaufstrecke von $20D$ ohne Winkel oder Rohreinbauten eingehalten werden. Für spezielle Einbausituationen im Experiment muss das Venturirohr unter denselben Bedingungen kalibriert werden, um die allfälligen Fehler aufgrund der kurzen Beruhigungsstrecke zu reduzieren.
- Die Kennlinie des Messgeräts verläuft nicht linear. Daher werden 6...10 Messpunkte zur Kalibrierung empfohlen. Die Messpunkte sollen im Soll-Messbereich des Messgerätes angeordnet werden, um eine hohe Messgenauigkeit in diesem Bereich zu erreichen. Bei gleichmässig verteilten Messungen können die Beobachtungen im Soll-Messbereich bei der Regressionsanalyse höher gewichtet werden. Zur Erhöhung der Messsicherheit können die Messpunkte mehrfach angefahren werden. Um die Messunsicherheit beim Soll-Massenstrom quantifizieren zu können, können Wiederholungsmessungen bei diesem Massenstrom gemacht werden und aus den Messfehlern die Messunsicherheit abgeleitet werden.
- Die Messpunkte müssen möglichst stationär sein. Das Sensorsignal und der Massenstrom dürfen sich während der Messung nicht stetig ändern. Eine Mittelung der Messdaten über 30...60 s wird empfohlen, um Rauschen zu dämpfen und das Konfidenzintervall des Messpunktes zu verbessern.
- Die Kalibrierung ist idealerweise in derselben Lage durchzuführen, wie das Venturirohr im Experiment eingebaut wird. Dadurch begangene Fehler werden aber als klein bis vernachlässigbar eingeschätzt.

Anhang

A Abbildungen des verwendeten Prüfstands

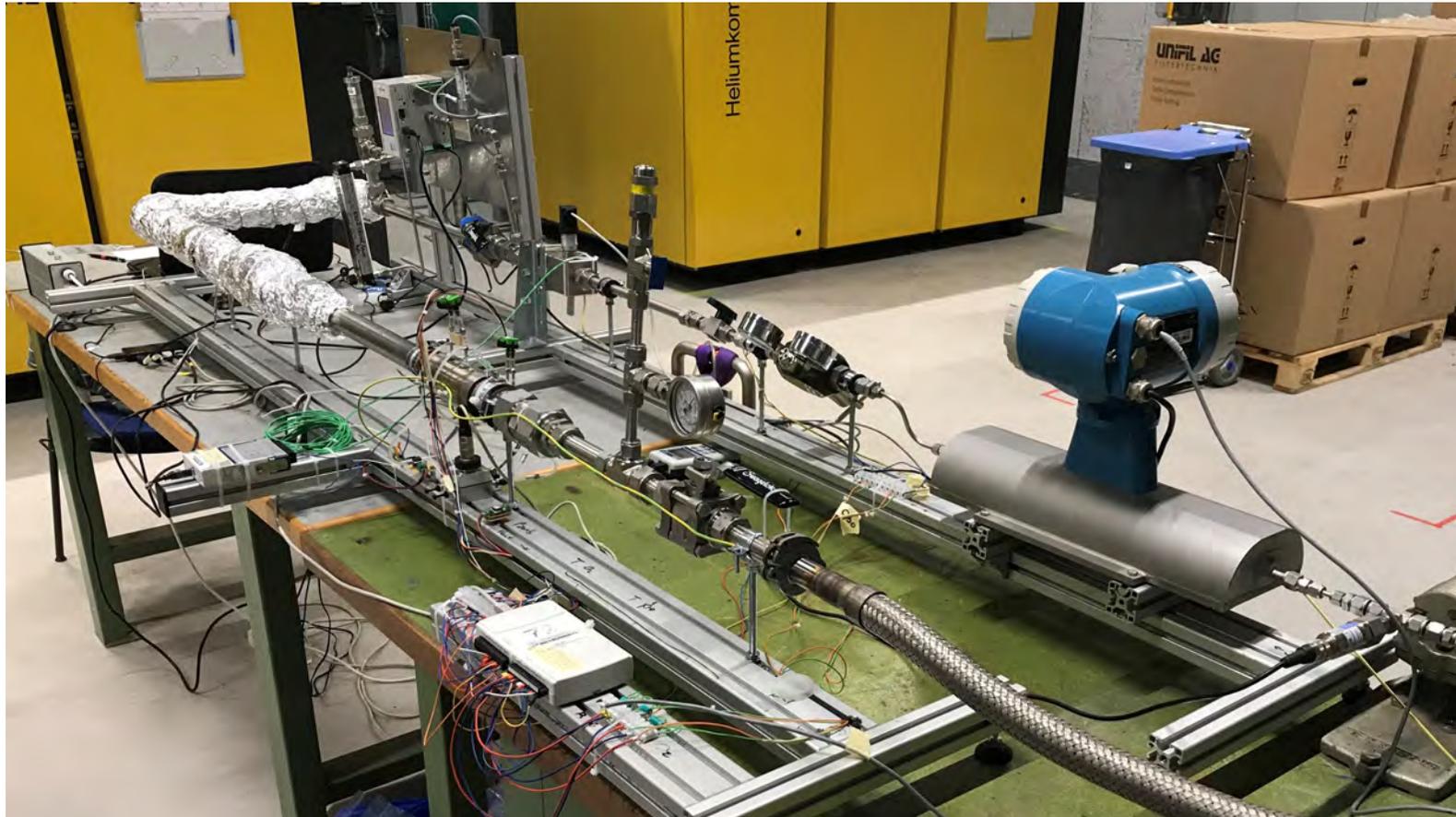


Abbildung A.1: Verwendete Kalibrierstrecke komplett

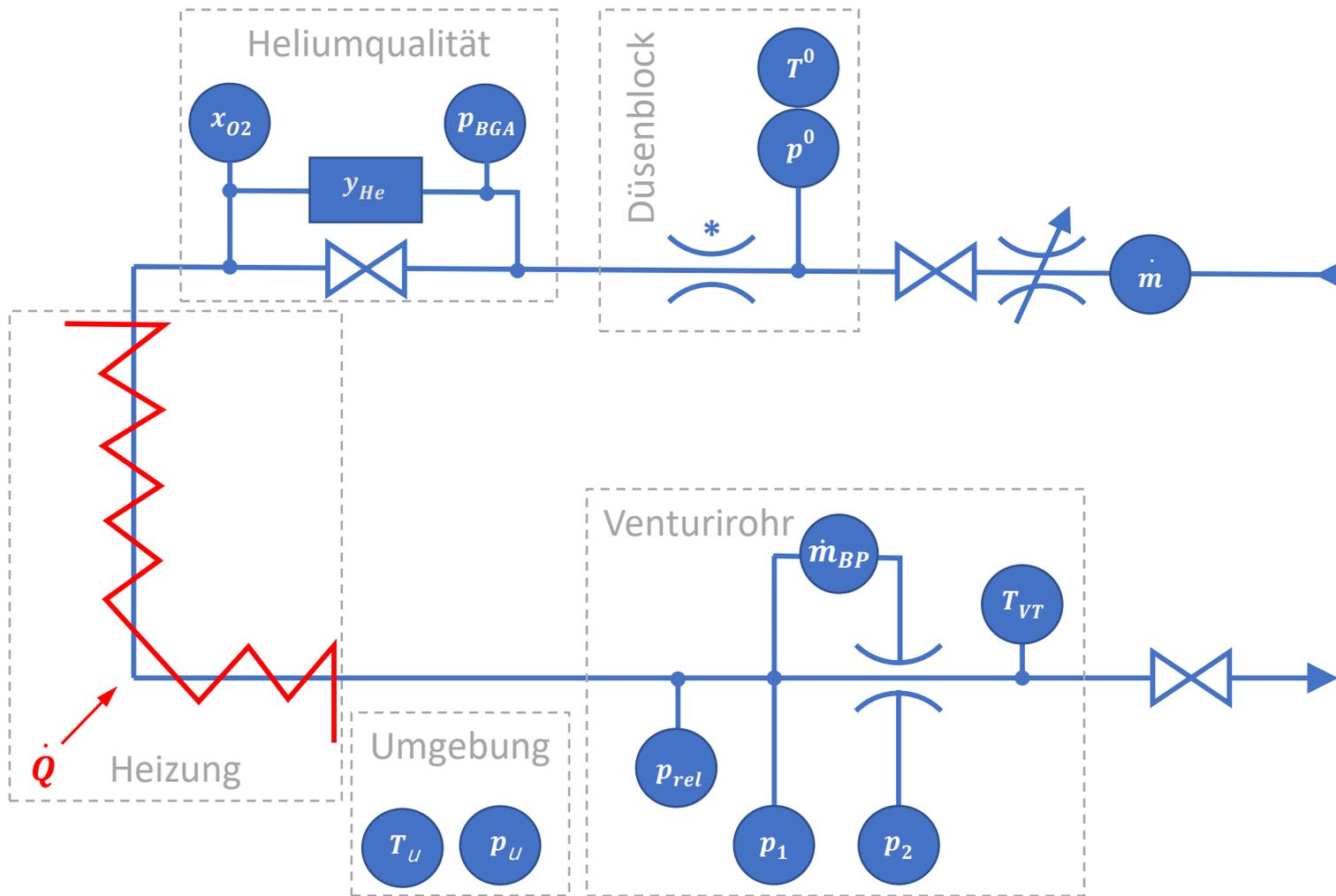
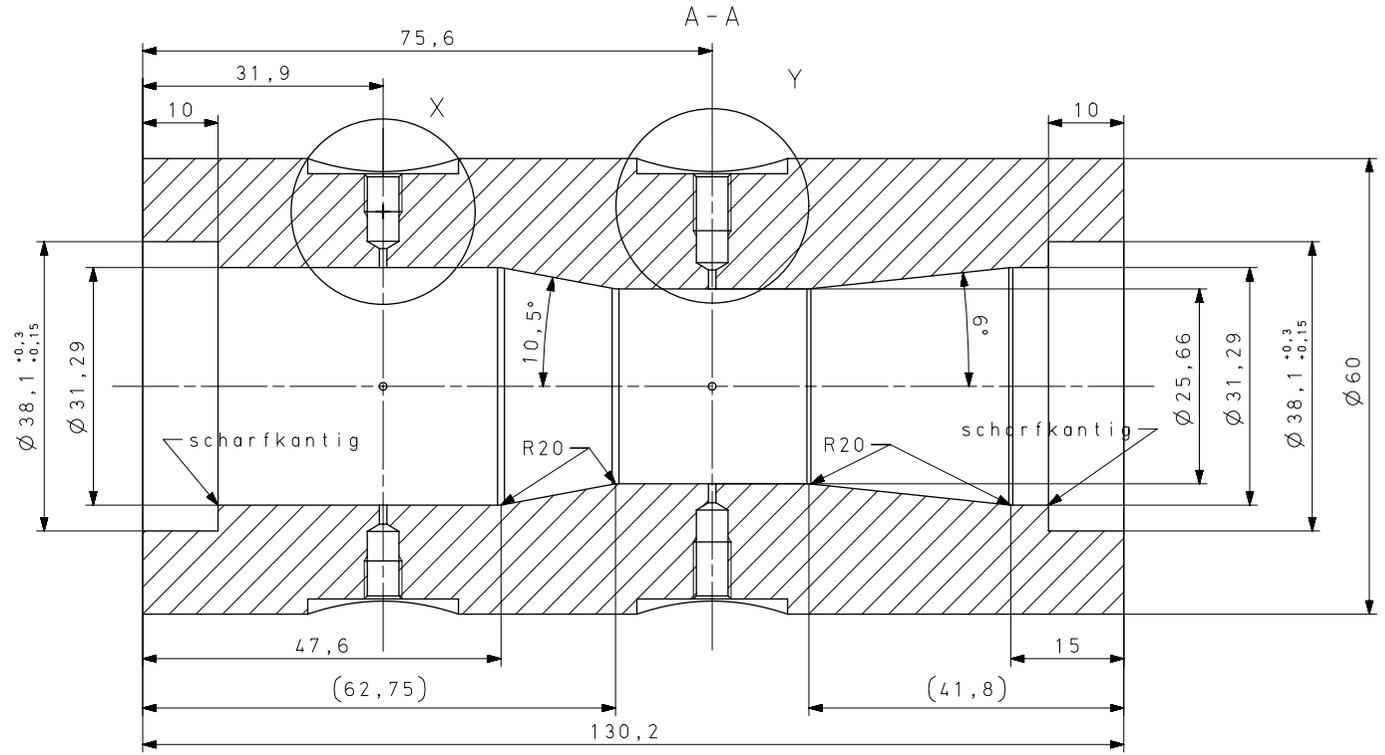
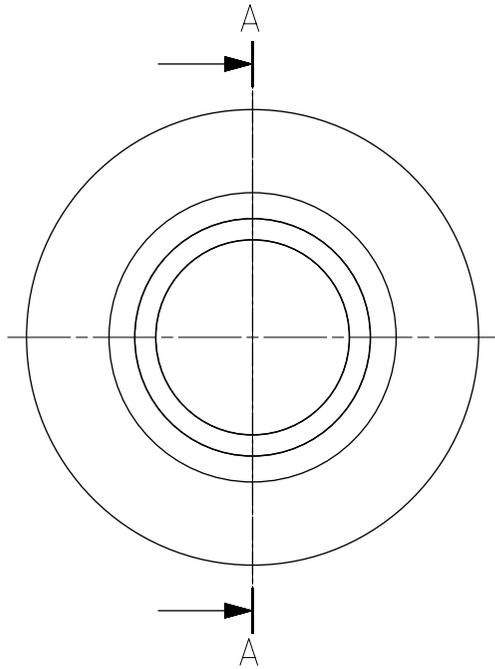
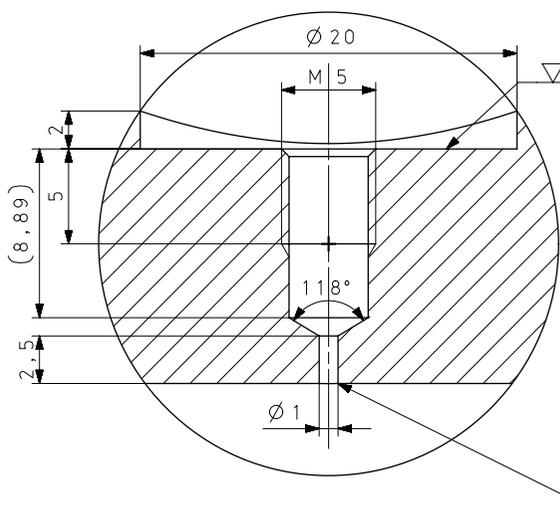


Abbildung A.2: Schema der verwendeten Kalibrierstrecke

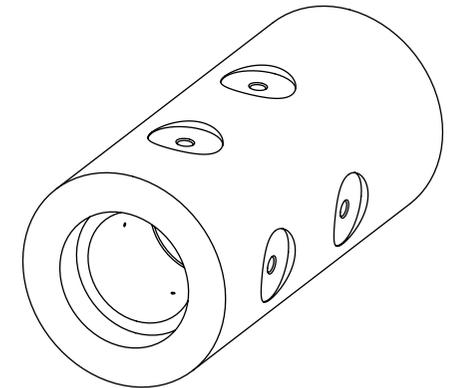
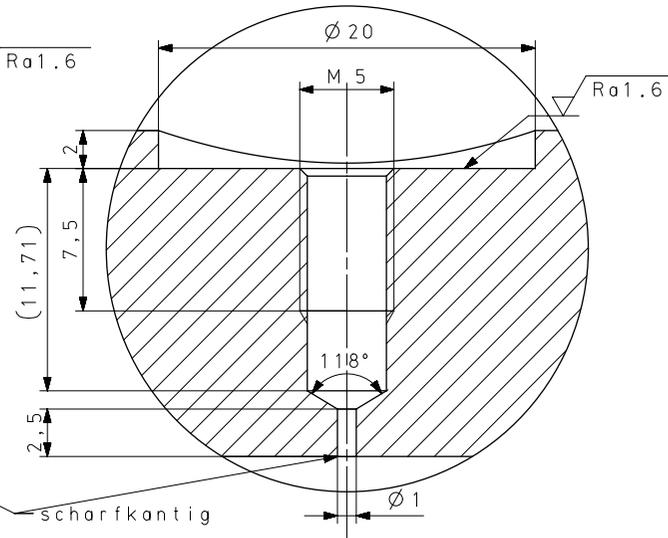
B Fertigungszeichnung Venturirohr



X (5:1)
(4x am Umfang)



Y (5:1)
(4x am Umfang)



Maßstab	2:1	Werkstoff	1.4301			
Ausgabedatum	2019-12-13	Gezeichnet				
Geprüft		Geprüft				
Allegemeintoleranz nach ISO 2768-mK		Bezeichnung	Venturirohr, 1.5 Zoll, 0.82			
Tolerierungsgrundsatz ISO 8015		Projekt	P5 Mengenmessung			
alle Masse in mm		Zeichnung	P5_Mengenmessung_Venturirohr_1.5Zoll_0.82.dwg			
Refer to ISO 16016 / SR 231.1		Änd. / Blatt	b			
	Fachhochschule Nordwestschweiz	NX-Version	11.0			
Klosterzelgstrasse 2 5210 Windisch						
++41 56 202 77 00 www.fhnw.ch/technik						
				1/1		

E PM-Dossier

Mengenmessung in Heliumkühlkreisläufen des Mu3e Experiments

Projektmanagementdossier, überarbeitete Version
Bachelor-Thesis



Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik
Institut für Thermo und Fluid Engineering
Bachelor of Science - Maschinenbau
Vertiefungsrichtung Energietechnik
Windisch, 27. März 2020

Studierender:	Niculin Flucher	niculin.flucher@students.fhnw.ch
Projektbetreuer:	Prof. Dr. Beat Ribl	
Auftraggeber:	Dr. Frank Meier Aeschbacher	

Überarbeitung vom 27. März 2020

Ausgangslage	Zusammenarbeit mit Turbokompressor entfernt
Zielsetzung	Neue Projektziele formuliert Teilziele überarbeitet
Lieferungen	-
Methodisches Vorgehen	Projektstruktur und Projektplan angepasst mit neuen geplanten Arbeiten Arbeitspakete angepasst, gestrichen und ergänzt Meilensteine angepasst, gestrichen und ergänzt
Projektrisiken	Risikoinventar überarbeitet Risiken für Laborarbeiten gelöscht
Ressourcen	Software für numerische Strömungsmechanik (CFD) ergänzt Wegfallen der Infrastruktur am Campus Brugg-Windisch ergänzt

COVID-19 als Grund für die Überarbeitung des PM-Dossiers

Im März 2020 nach dem Ausbruch des neuen Coronavirus werden vom Bundesrat für die Schulen und die Bevölkerung der Schweiz restriktive Massnahmen verordnet. Der Präsenzunterricht an der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) fällt bis Ende des Frühlingsemesters 2020 aus und auch die Projektarbeiten werden dadurch eingeschränkt. Aufgrund der Vorsichtsmassnahmen, um die Ausbreitung des COVID-19 zu bremsen, ist die Arbeit in den Räumlichkeiten der Fachhochschule nicht vorgesehen. Die Weisung vom Institut für Thermo- und Fluid-Engineering (ITFE) ist, dass die Labore nicht mehr von den Mitarbeitenden und Studierenden genutzt werden dürfen. Dies bedeutet, dass innerhalb des Zeitfensters des P6 die geplanten Ziele mit den praktischen Versuchen nicht erreicht werden können. Um das P6 dennoch abschliessen zu können und dem Auftraggeber eine Lösung zu bieten, soll das Projekt angepasst werden. Das Ziel ist, dass brauchbare Resultate für den Auftraggeber und eine bewertungsreife Bachelorarbeit eingereicht werden können, auch ohne Zugang zum Labor. Aufgrund der grossen Umstellung ist das vorliegende Dokument eine überarbeitete Version des PM-Dossiers. Der Vollständigkeit halber befindet sich das ursprüngliche PM-Dossier vom 15. März 2020 im Anhang.

Vorschlag der Analyse mittels CFD

Es werden anstelle der physischen Durchflussmessgeräte Computermodelle erstellt. Mit sinnvoll festgelegten Bedingungen werden mittels numerischer Strömungsmechanik Simulationen durchgeführt. Handrechnungen können die Resultate der Simulation teilweise voraussagen und verifizieren. Die Validierung der Simulationen kann mittels Literatur oder, wenn möglich, mit dem Versuchsaufbau an der FHNW oder einem vereinfachten Aufbau am Paul Scherrer Institut (PSI) durchgeführt werden. Davon kann jedoch nicht ausgegangen werden und das Projekt wird ohne diese Möglichkeiten geplant. Das übergeordnete Ziel eines kalibrierten Messsystems bleibt bestehen, kann jedoch aus den oben genannten Gründen nicht als physischer Prototyp umgesetzt werden. Für die ausgewählten Messsysteme und deren Komponenten wird dazu je eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, um festzustellen, wie zuverlässig die Messungen in der Theorie sein werden. Die erkennbaren Einflüsse der Strömungsparameter auf die Messung aus den Simulationen sind zu berücksichtigen und sollen möglichst viele Erkenntnisse liefern, welche bei den Laborversuchen erzielt worden wären.

Glossar

Justierung Einstellen eines Messsystems, um Messabweichungen auf Werte zu bringen, die den technischen Forderungen entsprechen [1]

Kalibrierung Feststellen des für ein Messsystem gültigen Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgrösse [1]

Mu3e Ein laufendes Projekt des PSI zur Detektion eines gemäss dem Standardmodell der Teilchenphysik extrem unwahrscheinlichen Zerfalls [2]

P5 Projektarbeit im fünften Semester, Vorbereitung für das P6

P6 Projektarbeit im sechsten Semester, Bachelor-Thesis

PM-Dossier Vorliegendes Dokument, welches die Zielvereinbarung, Planung und Struktur des P6 enthält

Projekt Turbokompressor P5- und P6-Projekt von K. Malacrida, welches sich um den im Versuchsaufbau verbauten Turbokompressor dreht

Validierung Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen der Realität (Frage: "Lösen wir das richtige Modell?")

Verifikation Vergleich der Simulationsergebnisse mit den dokumentierten und zu erwartenden Ergebnissen (Frage: "Lösen wir das Modell richtig?")

Akronyme

AP Arbeitspaket

CFD numerische Strömungsmechanik

ECTS Europäisches System zur Übertragung und Akkumulierung von Studienleistungen

FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz

FMEA Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

ITFE Institut für Thermo- und Fluid-Engineering

MS Meilenstein

PSI Paul Scherrer Institut

Inhaltsverzeichnis

Glossar	iii
Akronyme	iii
1 Ausgangslage	2
1.1 Auftraggeber und Betreuer	2
1.2 Zusammenarbeit mit dem Projekt Turbokompressor	2
2 Zielsetzung	3
2.1 Übergeordnete Zielsetzung	3
2.2 Projektziele	3
2.3 Teilziele	3
3 Lieferungen	5
3.1 Berichte	5
3.2 Präsentationen und Verteidigung	5
3.3 Datenablage	5
3.4 Versuchsaufbau	5
4 Methodisches Vorgehen	6
4.1 Kritischer Pfad	6
4.2 Projektstruktur	7
4.3 Projektplan	8
4.4 Liste der Arbeitspakete	9
4.5 Liste der Meilensteine	14
5 Projektrisiken	15
5.1 Risikoinventar P6	16
6 Ressourcen	17
6.1 Beteiligte Personen	17
6.2 Material und Software	17
6.3 Infrastruktur	17
6.4 Zeit	18
7 Geheimhaltung	18
8 Einverständniserklärung	19

1 Ausgangslage

Am Paul Scherrer Institut (PSI) wird in Zusammenarbeit mit verschiedenen Hochschulen und der FHNW im Experiment Mu3e nach dem Zerfall eines Myons in zwei Positronen und ein Elektron gesucht. Es wird dazu ein Experiment aufgebaut, mit welchem auf die Flugbahn der Zerfallsprodukte und somit auf den Zerfall selbst geschlossen werden kann. Da von den Detektoren aus Silizium-Chips im Kern des Experimentes viel Wärme erzeugt wird, müssen sie gekühlt werden. Die erwartete Wärmeproduktion der Detektoren beträgt $250 - 400 \text{ mW/cm}^2$, wobei sie sich nicht über 70°C erhitzen dürfen. Als Kühlmedium für diesen spezielle Aufbau eignet sich gasförmiges Helium bei atmosphärischem Druck am besten [3]. Die Überwachung der dazu notwendigen Kühlkreisläufe muss ermöglicht werden. Die Kühlleistung ist vom Massenfluss $[g/s]$ abhängig und dieser soll von der Mengemessung überwacht werden. Dies kann aber nicht mit herkömmlichen Durchflussmessgeräten umgesetzt werden, da diese zu gross oder zu teuer sind oder zu grosse Druckverluste verursachen. Mit kommerziell erhältlichen Sensoren soll ein System entwickelt werden, welches im Mu3e eingesetzt werden kann. Die Kühlung der Detektoren ist sicherheitsrelevant. Es muss deshalb ermittelt werden, wie gross die Unsicherheit des Messsystems für die Kühlkreisläufe ist. In einem vorangehenden P5-Projekt wurde ein Versuchsaufbau eines solchen Kühlkreislaufes mit einem Venturirohr zur Durchflussmessung erarbeitet [4]. Weiter wurde eine Lösung mit einem Heissfilm-Durchflussmesser angedacht, welche im P6 umgesetzt werden soll. Die Erkenntnisse und Vorbereitungen aus dem P5 dienen als Grundlage für das vorliegende Projekt.

1.1 Auftraggeber und Betreuer

Der Auftraggeber ist das PSI. Die Kontaktperson ist Dr. Frank Meier Aeschbacher. Die Aufgabe wird von Prof. Dr. Beat Ribi vom ITFE der FHNW betreut.

1.2 Zusammenarbeit mit dem Projekt Turbokompressor

Da kein Zugang zum Labor und dem gemeinsamen Versuchsaufbau der Projekte Mengemessung und Turbokompressor besteht, ist die Abhängigkeit der Projekte vorerst aufgehoben.

2 Zielsetzung

Das vorliegende PM-Dossier dient als Abmachung zwischen dem Betreuer und dem Studierenden für das geplante P6 und wird in der Einverständniserklärung (Kapitel 8) vom Auftraggeber mitunterschrieben. Abweichungen und Anpassungen während des Projekts müssen begründet, besprochen und dokumentiert werden. Die Zielsetzung basiert auf der Projektausschreibung (siehe Anhang).

2.1 Übergeordnete Zielsetzung

Es soll ein oder mehrere kalibrierte Mengenmesssysteme mit geringem Druckverlust für die Heliumkühlkreisläufe des Mu3e mit einem Durchfluss von 2-10 g/s realisiert werden. Dabei soll ermittelt werden, welche Messgenauigkeit mit den Systemen möglich ist.

2.2 Projektziele

Die folgenden Ziele sollen während des P6 erreicht werden.¹

- Es soll festgestellt werden, ob das konzipierte Venturirohr die gewünschten Effekte zeigt und ob der mikrothermische Differenzdrucksensor im Bypass ohne Temperatur- und Druckkompensation als Durchflussmessung ausreicht.
- Es soll geprüft werden, ob der Heissfilmsensor gemäss Konzept in der Strömung platziert werden kann und die erwarteten Strömungsbedingungen erfährt.
- Für beide Messmethoden soll die theoretisch erreichbare Messgenauigkeit ermittelt werden.
- Das Messsystem, welches besser für den Einsatz im Mu3e geeignet ist, soll ausführlich simuliert werden, um Erkenntnisse zur Empfindlichkeit auf Störgrössen und Einlaufbedingungen zu sammeln.
- Es soll eine Empfehlung zur Justierung und Kalibrierung des gewählten Messsystems gegeben werden.²
- Zuhanden des Mu3e soll eine Empfehlung zum Einsatz des Messsystems angegeben werden.

2.3 Teilziele

Folgende Teilziele stellen die erforderlichen Zwischenschritte zur Erreichung der Projektziele dar und sind diesen untergeordnet. Diese Teilziele sollen in den Arbeitspaketen im Kapitel 4 widergespiegelt werden.

- Methodisches Vorgehen zum Erreichen der Projektziele ist geplant
- Sensitivitätsanalyse und Messunsicherheitsanalyse für beide Messmethoden durchgeführt
- Zu simulierende Szenarien definiert
- Modelle und Simulationen beider Messmethoden erstellt

¹Die Ziele des Studierenden, welche sich auf die notenrelevanten Lieferungen (Bericht, Poster und Verteidigung) beziehen, werden hier nicht aufgeführt.

²Siehe Definition für Justierung und Kalibrierung.

- Simulationen mit beiden Messmethoden durchgeführt
- Resultate der Simulationen ausgewertet
- Die weiterzuverfolgende Messmethode ausgewählt
- Messunsicherheit und Empfindlichkeit auf Störgrößen und Einbaubedingungen ermittelt
- Dokumentation der theoretisch erreichbaren Messgenauigkeit des gewählten Messsystems unter bestimmten Einsatzbedingungen
- Verifikation³ der Simulationen
- Validierung der Simulationen oder Empfehlung zur experimentellen Validierung⁴
- Empfehlung zur Justierung und Kalibrierung dokumentiert

³Siehe Definition für Verifikation.

⁴Siehe Definition für Validierung.

3 Lieferungen

Im P6 werden folgende Lieferungen verlangt.⁵

3.1 Berichte

- Die Bachelor-Thesis wird in Form eines technischen Berichtes verfasst. Der Bericht ist gemäss den allgemeinen Richtlinien der FHNW, beziehungsweise den spezifischen Richtlinien des ITFE zu gestalten [5]. **Abgabe: KW33**
- Ein Zwischenbericht am Ende des Semesters, welcher nicht bewertet wird, wird dem Betreuer abgegeben. Dies ermöglicht eine zeitgerechte Rückmeldung zum Zwischenstand und Anpassung auf die gestellten Anforderungen. **Abgabe: KW24**

3.2 Präsentationen und Verteidigung

- Nach der Abgabe des Zwischenberichtes findet eine Zwischenpräsentation für die Experten statt, welche nicht bewertet wird. **Termin: KW24**
- Es ist ein Poster zur Präsentation an Ausstellungen und Besuchstagen der Fachhochschule zu gestalten. Interessierte sollten sich mithilfe des Posters über das Projekt und die Resultate informieren können. **Termin: KW33**
- Die Verteidigung⁶ der Bachelor-Thesis ist die Präsentation des fertigen P6 vor Experten und Dozierenden. **Termin: KW36-37**
- Eine Präsentation für den Auftraggeber kann vom Auftraggeber und Studierenden gewünscht werden. Diese wird nicht bewertet, kann jedoch der Vorbereitung für die Verteidigung dienen.

3.3 Datenablage

Dem ITFE sind alle zur Bearbeitung der Arbeit relevanten Dateien des P5 und P6 digital via SwitchDrive zugänglich zu machen. Messprotokolle, Sitzungsprotokolle, Berichte, Poster und weiteres wird geordnet abgelegt und kann nach Beendigung des Projektes archiviert werden.

3.4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau beider Projekte Mengenmessung und Turbokompressor wird nicht als Lieferung bewertet. Ein Rückbau des Versuchsaufbaus ist nicht während des Projekts geplant. Der Versuchsaufbau wird ab KW12 nicht mehr weiterverwendet. Sobald es möglich ist, wird dieser wieder in Betrieb genommen, um die Simulationen zu validieren und das gewählte Messsystem zu justieren und kalibrieren.

⁵Bei der Überarbeitung wurden die Abgabetermine beibehalten.

⁶Wird nicht als Teil der eingeplanten Arbeitsstunden gerechnet, sondern wird nach Abgabe der Bachelor-Thesis angehängt.

4 Methodisches Vorgehen

Die Projektstruktur auf Seite 7 zeigt auf, wie das P6 in Arbeitspakete (APs) und Meilensteine (MS) gegliedert werden soll, in welcher Reihenfolge das Projekt bearbeitet wird und wie die APs (Kapitel 4.4) und MS (Kapitel 4.5) verknüpft sind. Die Absicht hinter dieser Gliederung ist das schrittweise Erreichen der Teil- und Projektziele.

Arbeitspakete

Die APs (Liste der APs in Kapitel 4.4) definieren einen Prozess. Dieser Prozess baut auf den vorhandenen Ressourcen (Input) auf und gibt gewünschte Ergebnisse (Output) aus. Für die APs wird ein Zieldatum festgelegt und der Zeitbedarf geschätzt.

Meilensteine

Die MS (Liste der MS in Kapitel 4.5) zeichnen sich durch eine Kontrolle oder Entscheidung aus. Es werden bestimmte Kriterien auferlegt, welche erfüllt werden müssen, dass mit dem Projekt weitergefahren werden kann. Entscheidungen bezüglich Meilensteinen und zusätzliche Iterationen von APs werden gemäss Projektstruktur und Beschreibung der MS gefällt. Die wöchentlichen Projektsitzungen dienen als Plattform für solche Entscheidungen.

4.1 Kritischer Pfad

Der im Kapitel 4.2 ersichtliche kritische Pfad zeigt die voneinander abhängigen APs auf. Die vorangehenden APs müssen abgeschlossen werden, sodass die Grundlage (Input) für die folgenden APs vollständig gegeben ist. Wenn ein AP oder MS auf einem kritischen Pfad Verzögerungen aufweist, kann dies eine Verzögerung des gesamten Projektes zur Folge haben, was wiederum zum Nichterreichen der Projektziele führen kann. Um dies zu verhindern, wird im Kapitel 5 eine Risikoanalyse durchgeführt.

4.2 Projektstruktur

7

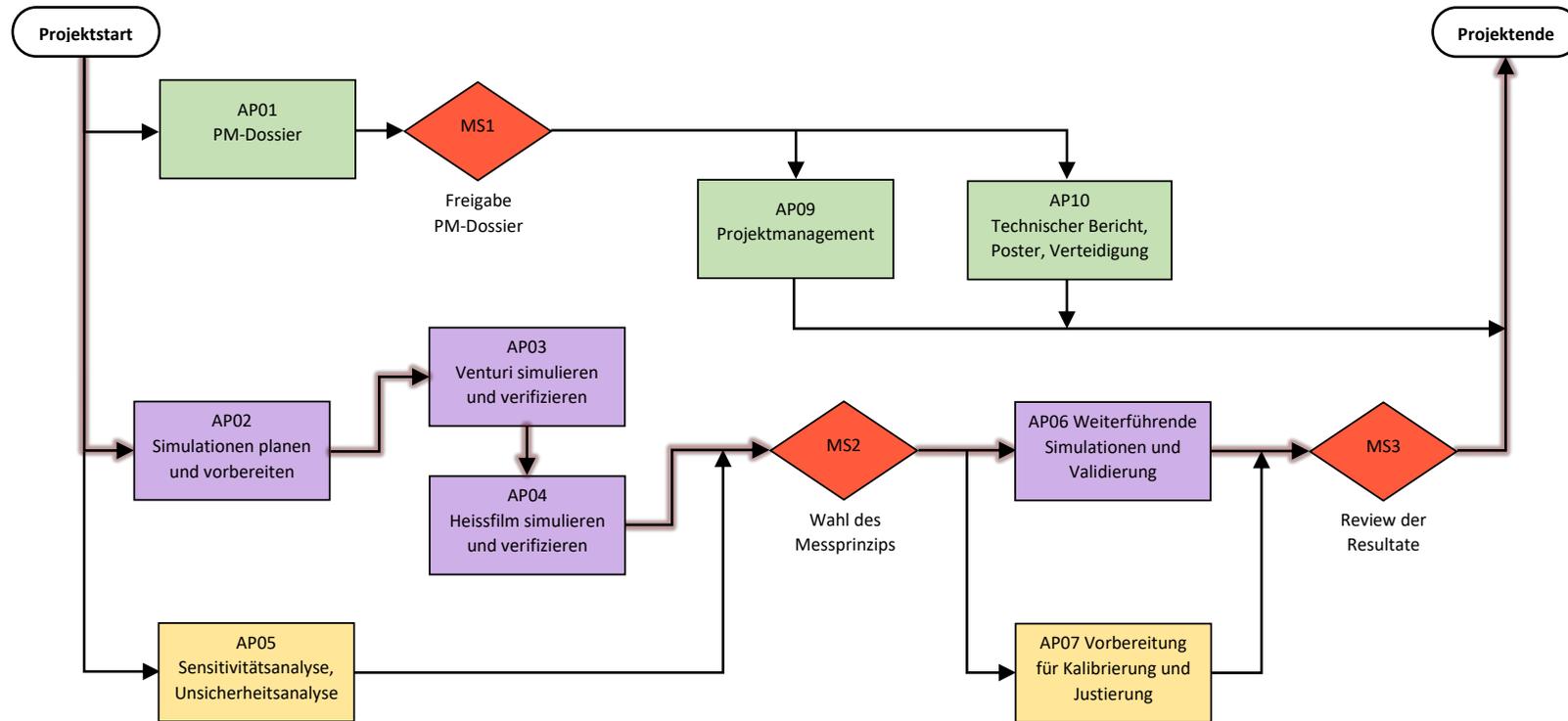


Abbildung 1: Überarbeitete Projektstruktur des P6 als Flussdiagramm

Farbcodierung:

grün APs zum Projektmanagement und Dokumentation
violett APs zur Simulation mittels CFD
gelb APs zur Messunsicherheit

rot Meilensteine
roter Glow technisch kritischer Pfad

Farbcodierung	
Grün:	Arbeitspakete zum Projektmanagement und Dokumentation
Violett:	Arbeitspakete zum Versuchsaufbau und Messungen
Gelb:	Arbeitspakete zur Auswertung und Kalibrierung
Rot:	Meilensteine
Blau:	Kontakt mit P6 Turbokompressor
roter Glow:	technisch kritischer Pfad

4.3 Projektplan

Im Projektplan sind die APs und MS entlang einer Zeitachse dargestellt. Die Arbeitsstunden pro Arbeitspaket oder Arbeitsschritt sind in der Spalte *Zeit* eingetragen. Die geplanten *Arbeitsstunden pro Woche* und *Arbeitsstunden total* sind horizontal in den untersten Zeilen eingetragen. Die Summe des Aufwandes aller geplanter Arbeitspakete ergibt 360 h. Die grau gestrichelten APs wurden teilweise bearbeitet, werden aber nicht weiterverfolgt. Der eingetragene Aufwand entspricht der bisherigen aufgewendeten Zeit.

Nr	AP/MS	Arbeit	Zeit	Soll/Ist	KW08	KW09	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22	KW23	KW24	KW25	KW26	KW27	KW28	KW29	KW30	KW31	KW32	KW33	KW34	KW35	KW36	KW37	
1	AP08	Projektmanagement, Arbeitsdokumentation	15	SOLL IST									frei																						
2	AP08	Informieren, Einarbeiten	10	SOLL IST																															
3	AP01 MS1	PM-Dossier erstellen	25	SOLL IST																															
		Versuchsaufbau mit Venturirohr abschliessen	10	SOLL IST																															
		Datenerfassung und Anweisungen Venturirohr	20	SOLL IST																															
		Versuchsaufbau Heissfilm installieren	10	SOLL IST																															
4	AP05	Sensitivitätsanalyse, Messunsicherheitsanalyse	40	SOLL IST																															
5	AP07	Vorbereitung für Kalibrierung und Justierung	50	SOLL IST																															
6	AP02	Simulationen planen und vorbereiten	30	SOLL IST																															
7	AP03	Venturirohr simulieren und verifizieren	20	SOLL IST																															
8	AP04	Heissfilm simulieren und verifizieren	20	SOLL IST																															
9	MS2	Wahl des Messprinzips		SOLL IST																															
10	AP06 MS3	Weitere Simulationen, Validierung und Review	50	SOLL IST																															
11	AP09	Zwischenpräsentation, Zwischenbericht	5	SOLL IST																															
12	AP09	Technischer Bericht verfassen, Poster	45	SOLL IST																															
13	AP09	Korrekturlesen	10	SOLL IST																															
14	AP09	Verteidigung	(10)	SOLL IST																															
		Arbeitsstunden pro Woche	360		10	20	20	15	15	15	5	20	10	10	10	10	10	10	10	10	5	0	0	0	0	40	40	25	25	20			(5)	(5)	
		Arbeitsstunden total	360		10	30	50	65	80	95	110	115	135	145	155	165	175	185	195	205	210	210	210	210	210	250	290	315	340	360					

Abbildung 2: Überarbeiteter Projektplan des P6

4.4 Liste der Arbeitspakete

AP01 - Projektmanagementdossier

Zeitbedarf 25 h
Zieldatum KW13

Input

- Leitfaden P5/P6-Projekte
- Anforderungen und Wünsche des Auftraggebers
- Hinweise Betreuer und Assistenten und Rückmeldung zu Bericht P5

Vorgehen

- Einteilung in APs und MS
- Zeitplanung erstellen
- Projektrisiken analysieren

Output

- Ausgearbeitetes PM-Dossier (Einverständnis von Betreuer, Auftraggeber und Studierenden)
-

AP02 - Simulationen planen und vorbereiten

Zeitbedarf 30 h
Zieldatum KW16

Input

- Konzept für Venturirohr und Heissfilmsensor aus P5 mit CAD-Modellen
- Berechnungen der Strömungen und resultierenden Drücke aus P5
- Datenblätter der Sensoren

Vorgehen

- Betriebspunkte für Simulationen wählen und Randbedingungen definieren
- Variierende Parameter definieren: Massenstrom, Einlauf, Druck, ...
- Zu bestimmende Grössen definieren
 - Venturirohr: Statischer Wanddruck, Empfindlichkeit Einlaufbedingungen, Druckabfall über Venturirohr, ...
 - Heissfilmsensor: Abhängigkeit von Heissfilmtemperatur, Nusselt-Zahl, Empfindlichkeit auf Einlaufbedingungen und Einstecktiefe, Wirbelablösung, ...
- Erwartungen quantitativ und qualitativ festhalten
- Geometrie und Eigenschaften der Sensoren zusammentragen (Material, Wärmeübergang, ...) und bei Bedarf beim Lieferanten anfragen
- Geometrie für Vernetzung erstellen, Vernetzung planen und besprechen
- Rechenmodelle für CFD-Solver wählen

Output

- Geometrie für Vernetzung von Venturirohr und Heissfilmsensor
 - Plan und Erwartungen für Simulationen
-

AP03 - Venturirohr simulieren und verifizieren

Zeitbedarf 20 h
Zieldatum KW20

Input

- Geometrie aus AP02
- Erwartungen aus AP02

Vorgehen

- Geometrie mit Venturirohr und Bypass vernetzen
- Definierte Betriebspunkte simulieren
- Resultate ablegen und dokumentieren
- Verifizieren der Resultate durch Vergleich mit Erwartungen
- Simulation anpassen, verfeinern und erneut verifizieren bis die Resultate die geplanten Erkenntnisse liefern

Output

- Resultate für Geschwindigkeits- und Druckverteilung
 - Kennlinie über vorgesehenen Messbereich
 - Erkenntnisse über Verhalten und Abweichungen von den Erwartungen
 - Erkenntnisse zu Empfindlichkeit auf Veränderungen im Einlauf und Auslauf
 - Erkenntniss zu Einsetzbarkeit im Mu3e
-

AP04 - Heissfilmsensor simulieren und verifizieren

Zeitbedarf 20 h
Zieldatum KW20

Input

- Geometrie aus AP02
- Erwartungen aus AP02

Vorgehen

- Geometrie mit Heissfilmsensor und Wärmeeintrag vernetzen
- Definierte Betriebspunkte simulieren
- Resultate ablegen und dokumentieren
- Verifizieren der Resultate durch Vergleich mit Erwartungen
- Simulation anpassen, verfeinern und erneut verifizieren bis die Resultate die geplanten Erkenntnisse liefern

Output

- Resultate für Geschwindigkeitsprofil und Druckverteilung
 - Kennlinie über vorgesehenen Messbereich
 - Erkenntnisse über Verhalten und Abweichungen von den Erwartungen
 - Erkenntnisse zu Empfindlichkeit auf Veränderungen im Einlauf und Auslauf
 - Erkenntniss zu Einsetzbarkeit im Mu3e
-

AP05 - Sensitivitätsanalyse und Unsicherheitsanalyse

Zeitbedarf 40 h
Zieldatum KW16

Input

- Fachliteratur (Fehlerrechnung, Messunsicherheit, Datenverarbeitung, ...)
- Datenblätter der Sensoren, Messgeräte und Messkarten

Vorgehen

- Messsystem Venturirohr und Heissfilm beschreiben
- Modellgleichungen für beide Messsysteme bilden
- Sensitivitätsanalyse durchführen
- Mögliche grobe und systematische Fehler identifizieren
- Korrekturmöglichkeiten für systematische Fehler bestimmen
- Unsicherheit abschätzen/berechnen

Output

- Erwartungen für Simulationen
 - Erkenntnisse zu Empfindlichkeit
 - Verbesserungsvorschläge zur Messung und Resultatbildung
-

AP06 - Weiterführende Simulationen und Validierung

Zeitbedarf 50 h
Zieldatum KW30

Input

- Geometrie, Netze und Resultate der Simulationen aus AP02 und AP03
- Erkenntnisse aus AP02 und AP03
- Verbesserungsvorschläge zur Messung aus AP05
- Ev. Auflagen oder neue Ziele gemäss MS02

Vorgehen

- Anpassungen an Geometrie, Vernetzung und Randbedingungen gemäss MS2 und Resultaten von AP02 und AP03 umsetzen
- Resultate dokumentieren
- Variieren von Randbedingungen um Empfindlichkeit des Systems zu erkennen
- Extreme Bedingungen simulieren um Grenzen des Messsystems zu erkennen
- Verifizierung der Resultate und Validierung mittels Literatur oder Planung der Validierung für spätere Laborversuche

Output

- Vertiefte Erkenntnisse zum Messverhalten und Querempfindlichkeit
 - Detaillierte Resultate
 - Erkenntnisse für Einsatzbereich
-

AP07 - Vorbereitung für Kalibrierung und Justierung

Zeitbedarf 50 h
Zieldatum KW30

Input

- Resultate und Erkenntnisse der Simulationen aus AP02 und AP03
- Resultate der Unsicherheitsanalyse aus AP04
- Bisheriger Fortschritt in der Datenerfassung

Vorgehen

- Übertragungsfunktionen und Modelle mit Resultaten und Kennlinien der Simulationen vergleichen
- Systematische Fehler identifizieren und mittels Korrekturparameter eliminieren
- Anweisungen für die Validierung mittels Laborversuch formulieren
- Anweisungen für Justierung und Kalibrierung aufgrund der Erkenntnisse aus Berechnungen und Simulationen formulieren

Output

- Korrigierte Übertragungsfunktionen
 - Anweisungen für Validierung
 - Anweisungen für Justierung und Kalibrierung
-

AP08 - Projektmanagement und Arbeitsdokumentation

Zeitbedarf 25 h
Zieldatum -

Input

- Status Meetings
- Leitfaden P5/P6

Vorgehen

- Besprechungen planen, durchführen und protokollieren
- Arbeit und Entscheidungen dokumentieren
- Dokumentieren der Informationsquellen

Output

- Sitzungsprotokolle
 - Arbeitsjournal und Arbeitsdokumentation
-

AP09 - Technischer Bericht, Poster und Verteidigung**Zeitbedarf** 60 h**Zieldatum** KW24 (Zwischenbericht und Zwischenpräsentation)
KW33 (Technischer Bericht und Poster)
KW36-37 (Verteidigung)

Input

- Arbeitsdokumentation aus AP08
- Erkenntnisse aus sämtlichen APs

Vorgehen

- Zwischenbericht
 - Vorlage für Bericht erstellen
 - Aktuellen Arbeitsstand dokumentieren
- Zwischenpräsentation
 - Präsentation des aktuellen Arbeitsstandes vorbereiten
 - Präsentation vor Experten halten
- Technischer Bericht erstellen
 - relevante Theorie zusammenfassen
 - Resultate veranschaulichen, interpretieren und kritisch hinterfragen
 - Erkenntnisse zusammentragen
- Poster erstellen
 - Rücksprache mit Auftraggeber und Betreuer bezüglich Inhalt und Sprache halten
- Verteidigung
 - Auftrag, Vorgehen, Resultate und Interpretation zusammenfassen
 - Präsentation erstellen, einüben und vor Experten halten

Output

- Zwischenbericht und Zwischenpräsentation
 - Bachelor-Thesis in Form eines technischen Berichtes
 - Poster für Ausstellung
 - Präsentation für Verteidigung
-

4.5 Liste der Meilensteine

MS1 - Freigabe PM-Dossier

Zielfdatum KW13

Inhalt

- Abgabe definitive Fassung des PM-Dossier

Kriterien

- Planung der Ziele und des Vorgehens ist vollständig
 - Einverständnis von Betreuer, Auftraggeber und Studierenden
-

MS2 - Wahl des weiterzuverfolgenden Messsystems

Zielfdatum KW21

Inhalt

- Vergleich der theoretisch erreichbaren Messgenauigkeit beider Systeme
- Zuverlässigkeit der Messung gemäss den Simulationen beurteilen
- Vergleich der Vor- und Nachteile für den Einsatz im Mu3e
- Status Meeting mit Auftraggeber und Projektbetreuer zur Entscheidung

Kriterien

- Einverständnis des Auftraggebers
 - Messsystem weist keine kritischen Fehler auf und kann weiterentwickelt und getestet werden
 - Messsystem ist gemäss den Erkenntnissen für den Einsatz im Mu3e geeignet
-

MS3 - Review des kalibrierten Messsystems

Zielfdatum KW30

Inhalt

- Präsentation des aktuellen Standes des Projekts
- Beurteilung der theoretisch erreichbaren Messunsicherheit
- Präsentation der Empfehlungen für den Betrieb, um die Messunsicherheit niedrig zu halten
- Ev. Auflagen für Weiterentwicklung oder Einsatz festlegen

Kriterien

- Messbereich und Messunsicherheit für das Messsystem sind bestimmt
 - Messsystem ist ohne fundamentale Anpassungen im Mu3e einsetzbar
 - Simulationen können gemäss Empfehlungen validiert werden
 - Messsystem kann gemäss Empfehlungen justiert und kalibriert werden
 - Einverständnis des Auftraggebers
-

5 Projektrisiken

Für jedes Risiko wird eine ganzzahlige Wahrscheinlichkeit $p = 1...3$ und ein ganzzahliges Schadenpotential $s = 1...3$ abgeschätzt. Das Produkt $p \cdot s$ ergibt die Priorität. Gemäss der Abbildung 3 wird sichtbar, welche Risiken reduziert werden müssen.

Schaden	hoch 3	3	6	9
	mittel 2	2	4	6
	gering 1	1	2	3
		gering 1	mittel 2	hoch 3
		Eintretenswahrscheinlichkeit		

Abbildung 3: Risikomatrix mit Prioritäten 1...9

grün (1-2) Dieses Risiko kann getragen werden.

gelb (3-4) Dieses Risiko soll reduziert werden. Wenn nicht möglich, soll das Risiko entsprechend überwacht werden.

rot (6-9) Dieses Risiko kann nicht getragen werden. Es muss durch vorbeugende Massnahmen reduziert werden.

Die im Risikoinventar im Kapitel 5.1 aufgeführten Risiken werden gemäss der Risikomatrix (Abbildung 3) eingestuft (Spalten: Risiko und Auswirkung). Für sämtliche Risiken werden präventive Massnahmen definiert, um die Eintretendwahrscheinlichkeit p und/oder den Schaden s zu reduzieren (Spalte: Überwachen und Bewältigen). Die entsprechenden Massnahmen werden im vorliegenden PM-Dossier eingeplant. Das Risiko wird unter Berücksichtigung der Massnahmen neu eingeschätzt (Spalte: Verbesserung). Die immer noch gelb eingefärbten, erhöhten Risiken werden während des Projekts überwacht. Das Risikoinventar muss bei einer Veränderung der Umstände und dem Auftauchen neuer Risiken überarbeitet werden. Als zusätzliche Risikoabschätzung wurde im P5 eine Fehlermöglichkeits- und -influssanalyse (FMEA) durchgeführt, welche auf die Sicherheitsaspekte des Versuchsaufbaus bezieht.⁷ Die entsprechenden Präventivmassnahmen wurden bereits getroffen. Eines der wichtigsten Werkzeuge zur Überwachung und Neuevaluierung der Risiken ist das wöchentliche Status Meeting (siehe Kapitel 6).

⁷Sämtliche Risiken, welche sich auf die Arbeit im Labor beziehen (Sicherheit von Personen und Einrichtungen, Sicherheit für Versuchserfolg) werden hier in der überarbeiteten Version des PM-Dossier nicht mehr aufgeführt.

5.1 Risikoinventar P6

Die wichtigsten Massnahmen zur Reduktion und Überwachung der grössten Risiken gemäss Risikoinventar in Abbildung 4 sind hier der Übersichtlichkeit halber aufgelistet und ergänzt.

- Sensitivitätsanalyse frühzeitig durchführen und, wenn nötig, Korrekturen vornehmen
- Wöchentliche Meetings wahrnehmen und zur Überprüfung des Fortschritts und neu auftretenden Risiken nutzen
- Soll- und Ist-Zustand des Projektfortschritts und Zeitplans regelmässig vergleichen
- Experten bezüglich Simulation, den Resultaten und der Auswertung befragen um Fehler zu vermeiden
- Resultate systematisch prüfen und kritisch hinterfragen

Identifizieren			Bewerten			Überwachen & bewältigen			Verbesserung		
AP	Risiko	Auswirkung	Wahrsch.	Schaden	Prio	Präventivmassnahmen			Wahrsch.	Schaden	Prio
			p (1-3)	s (1-3)	=p*s	p'p' und s's'			p' (1-3)	s' (1-3)	=q'*s'
01	Unpräzise oder falsche Ziele formuliert	Ziele werden verfehlt	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Ziele mit Betreuer und Auftraggeber absprechen. Kriterien für MS formulieren, um überprüfbare Ziele zu haben. Einverständniserklärung von Beteiligten unterschreiben lassen.			gering 1	mittel 2	● 2
	Ungenügende Kommunikation zu Betreuer und Auftraggeber	Ziele werden verfehlt	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Wöchentliche Meetings wahrnehmen und Status und Schwierigkeiten vorstellen. Informationen selbständig einholen. s: Meilensteine zur Kontrolle der Resultate durch Beteiligte nutzen.			gering 1	mittel 2	● 2
	Zeitverzögerung im Projekt	Ziele werden nicht erreicht, Versuche können nicht durchgeführt werden	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Regelmässiger Soll/Ist-Vergleich im Zeitplan durchführen. Zeitplan mit Turbokompr. abgleichen. s: Zeitpuffer einplanen			mittel 2	mittel 2	● 4
08	ungenügend verfügbare Informationen zur Problemstellung	Probleme können nicht gelöst werden	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Datenbanken berücksichtigen. s: Fachpersonal (Dozenten, Assistenten, Auftraggeber) bei erfolgloser Recherche befragen.			gering 1	mittel 2	● 2
02 03 04 06	Annahme falscher Parameter für Simulationen	Simulationen ergeben unbrauchbare Resultate	mittel 2	mittel 2	● 4	p: Verifizierung der Resultate als nachträgliche Prüfung. Unterschiedliche Randbedingungen setzen und vergleichen.			gering 1	mittel 2	● 2
02 03 04 06	fehlerhafte Vernetzung	Simulationen ergeben unbrauchbare Resultate	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Vernetzung mit Fachpersonal besprechen. Verifizierung der Resultate als nachträgliche Prüfung.			gering 1	hoch 3	● 3
02	fehlende Resultate oder Berechnungen	Fehlerhafte Auswertung	mittel 2	mittel 2	● 4	p: Auswertung und Interpretation der Resultate planen. Erwartungen formulieren und prüfen. Input und Output der APs bei der Bearbeitung kontrollieren.			gering 1	mittel 2	● 2
02 03 04 06	Fehlerhafte Auswertung, falsche Annahmen	Fehlerhafte Grundlage für weitere Arbeiten	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Vorgehen für Messungen gemäss GUM. Simulationen gemäss Guide aufbauen. s: Resultate vor MS prüfen und präsentieren. Resultate kritisch prüfen (verifizieren und ev. validieren).			gering 1	mittel 2	● 2
07 08	Sensoren oder Datenerfassung sind ungenau	Kalibrierung und Justierung ergeben eine ungenügende Genauigkeit	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Frühzeitige Sensitivitätsanalyse durchführen. Beide Messmethoden verfolgen. s: Bei Versagen, alternative Lösungen auf dem Markt suchen.			gering 1	mittel 2	● 2

Abbildung 4: Überarbeiteter Risikoinventar

6 Ressourcen

Während einem wöchentlichen Status Meeting präsentiert der Studierende dem Betreuer und ev. dem Auftraggeber den Fortschritt und hat die Möglichkeit, Fragen zu stellen oder Rücksprache zu halten, bevor Entscheidungen getroffen werden. Während des Projektes kann der Studierende von den wissenschaftlichen Assistenten und Mitarbeitern des ITFE Hilfe erfragen.

6.1 Beteiligte Personen

Seitens der FHNW und des PSI wird das Projekt von folgenden Personen betreut:

Personen der FHNW

- Dr. Prof. Beat Ribi
Institutsleiter ITFE
- Carsten Hersberger, MSc Eng.
Wissenschaftlicher Assistent
- Manuel Voggesser, MSc Eng.
Wissenschaftlicher Assistent
- Marin Deflorin, MSc Eng.
Wissenschaftlicher Assistent
- Tom Strebel, EMBA
Sicherheitsbeauftragter

Personen des PSI

- Dr. Frank Meier Aeschbacher
Technischer Koordinator Mu3e Mu3e

6.2 Material und Software

Käufe von nicht vorhandenen Mitteln laufen über das ITFE und müssen vom Studierenden beantragt werden. Messgeräte, Materialien und Werkzeuge vom ITFE-Labor müssen ebenfalls vom Studierenden beantragt werden. Messgeräte für die Durchfluss-, Temperatur- und Druckmessung sind vorhanden, müssen jedoch reserviert werden. Über die Schulserver stehen Programme zum Vernetzen, Simulieren, Berechnen, Modellieren, Auswerten und Dokumentieren zur Verfügung (z.B. ICEM CFD, Ansys CFX, MatLab, LabVIEW, Siemens NX). Im Falle von sehr rechenaufwändigen Simulationen kann angefragt werden, dass die Simulationen über einen *Cluster* am ITFE laufen können.

6.3 Infrastruktur

Die Arbeitsplätze am Campus Brugg-Windisch sollen bis Ende Semester nicht benutzt werden. Für den Messaufbau wurde ein Arbeitsplatz im in der Maschinenhalle im Gebäude 2 eingerichtet. Die Maschinenhalle soll jedoch auch nicht von Studierenden genutzt werden, solange die Ausnahmeregelungen in Kraft sind.

6.4 Zeit

Für das P6 erhalten Studierende beim erfolgreichen Bestehen des Modules 12 ECTS (Europäisches System zur Übertragung und Akkumulierung von Studienleistungen). Ein ECTS erfordert gemäss Bologna-Reform rund 30 Stunden Arbeitsaufwand. Demzufolge wird für das P6 ein Aufwand von 360 Arbeitsstunden erwartet.⁸

7 Geheimhaltung

Eine projektspezifische Vertraulichkeitserklärung nicht benötigt, da das Mu3e Experiment mit Steuergeldern finanziert wird und Informationen deshalb nicht geheim gehalten werden dürfen. Eine Ausnahme gilt nur für die Informationen von Lieferanten, sofern deren Informationen vertraulich zu behandeln sind. Ansonsten gilt das Studienreglement für die Hochschule für Technik.

⁸Diese Anzahl Stunden bleibt bei der überarbeiteten Version gleich. Bisher erledigte Arbeiten zählen in gleicher Weise zum P6.

8 Einverständniserklärung

Mit folgender Unterschrift bestätigen die Projektbeteiligten, einverstanden zu sein mit dem PM-Dossier, welches als Projektvereinbarung für das Projekt P6 gilt.

Datum: _____

Ort: _____

Studierender: _____
Niculin Flucher

Betreuender Dozent: _____
Prof. Dr. Beat Ribl

Auftraggeber: _____
Dr. Frank Meier Aeschbacher

Literatur

- [1] Jörg Hoffmann. *Taschenbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 7., aktualisierte auflage edition, 2015.
- [2] A Blondel, A Bravar, M Pohl, S Bachmann, N Berger, M Kiehn, A Schöning, D Wiedner, B Windelband, P Eckert, P Fischer, I Perić, M Hildebrandt, G Dissertori, C Grab, R Wallny, R Gredig, P Robmann, and U Straumann. Research Proposal for an Experiment to Search for the Decay $\mu \rightarrow eee$. page 104.
- [3] Marin Deflorin. Helium cooling of Silicon Pixel Detector for Mu3e Experiment. Master's thesis, FHNW, March 2019.
- [4] Niculin Flucher. Projektbericht P5 Mengenmessung. unveröffentlicht, January 2020.
- [5] Go, Hek, Hm, Rbb, Stp, Wsd. Leitfaden P5/P6-Projekte, August 2019.

Projektarbeiten / Bachelorthesis

Titel des Projektes

Durchflussmessung mittels kommerziellen MEMS-Sensoren

Auftraggeber

Firma: Paul Scherrer Institut, WBWA 131

Name: Meier Aeschbacher, Dr.

Vorname: Frank

Funktion:

Strasse:

PLZ / Ort: 5232 Villigen

Telefon: +41 56 310 3671

Mobile: +41 78 632 0790

E-Mail: frank.meier@psi.ch

Betreuender Dozierende / Assistierende: B. Ribi /**Themengebiet (in Stichworten):**

- Experimentelle Untersuchung
 Simulation

Projekt eignet sich für:

5. Semesterprojekt
 Bachelor-Thesis

-
-

Schwierigkeitsgrad (leicht/mittel/schwer):

mittel/schwer

Kurze Beschreibung des ProjektsAusgangslage / Problemstellung:

Im sogenannten Mu3e-Experiment wird nach dem Zerfall eines Myons in zwei Positronen und ein Elektron gesucht. Tritt dieser Zerfall auf, bedeutet das eine Verletzung des Standardmodells der Teilchenphysik.

Unter Führung und Koordination des Paul Scherrer-Instituts sucht ein internationales Konsortium aus verschiedenen Hochschulen nach diesem Zerfall. Dazu wird z. Zt. ein Experiment aufgebaut, in dem mittels verschiedener Halbleiterdetektoren auf die Bahn der Teilchen und damit auf den Zerfall selbst geschlossen werden kann. Die Detektoren bestehen aus Silizium-Chips, die mit Helium gekühlt werden müssen. Dazu sind mehrere Kreisläufe nötig, die separat geregelt werden müssen. Der jeweilige Durchsatz muss dazu bekannt sein. Da aber herkömmliche Messmethoden mit der erforderlichen Genauigkeit entweder zu teuer sind oder einen zu hohen Druckverlust aufweisen, soll mittel kommerziellen MEMS-Sensoren zur Druckmessung ein System aufgebaut werden (Venturi-Rohr), das kalibriert die erforderliche Messgenauigkeit sicherstellt.

Aufgabe:

Parameterstudie hinsichtlich Geometriegrößen für die zu erreichende Genauigkeit bei geg. Massenstrombereich und Druck.

Konzeption, Dimensionierung und Fertigung der Mengenmessung

Kalibrierung derselben

Ziele/Ergebnisse/Lieferobjekte:

Kalibrierte Mengenmessung mit MEMS mit zu erwartender Genauigkeit liegt vor

Rahmenbedingungen:

Besondere Bemerkungen / Geheimhaltung:
Vertraulichkeitsvereinbarung erforderlich

Studierender:

Projektstatus, durch den betreuenden Dozenten auszufüllen:

Der Auftraggeber ist über unsere Rahmenbedingungen informiert:

Ja Nein

Das Projekt ist in die Übersichts-Projektliste eingetragen :

Ja Nein

RICHTLINIEN FÜR STUDIERENDENPROJEKTE

Rahmenbedingungen

Im Rahmen des Bachelor-Studiums Maschinenbau haben die Studierenden der FHNW im 5. und im 6. Semester jeweils ein Projekt zu bearbeiten, diese Projekte werden meist kurz als "P5"- bzw. "P6"-Projekt bezeichnet. Das Projekt P6 (Bachelor Thesis) ist die Abschlussarbeit des Studiums.

Die Projekte sind mit 6 (für die Projekte P5) bzw. 12 (für die Projekte P6) ECTS-Punkten gewichtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass der von den Studierenden erbrachte Aufwand mindestens etwa 180 Arbeitsstunden (für die Projekte P5) bzw. 360 Arbeitsstunden (für die Projekte P6) beträgt.

Ablauf

Im P5 wird der Aufwand während eines Semesters zum einen Teil parallel zum Studium (im Umfang von etwa 1 Tag/Woche während 15 Semesterwochen), zum anderen Teil während einer Woche Intensivphase (KW 49) erbracht. Im P6 wird der Aufwand einerseits während des Semesters zum einen Teil parallel zum Studium, zum anderen Teil während einer Projektwoche (KW 19), zusätzlich während einer Intensivphase von fünf Wochen im Anschluss an das Semester (KW 29 bis 33) erbracht. Die Projekte P5 und P6 werden sehr oft in Zusammenarbeit mit und für einen industriellen Partner durchgeführt. Thematisch schliesst sich das Projekt P6 meist an das Projekt P5 an, so dass beim Projekt P6 die weitere Einarbeitungszeit entfällt.

Kosten

Die FHNW erhebt eine Bearbeitungsgebühr zur Deckung eines Teils der Aufwendungen. Es wird pro Semester eine vom Projekterfolg unabhängige Pauschale von CHF 1'500.- zuzüglich MWSt erhoben.

Die Studierenden haben kein Anrecht auf Entschädigungen oder Honorare. Spesen, welche während der Arbeiten bei den Studierenden anfallen, sind i.d.R. vom Auftraggeber zu übernehmen und bei der Auftragsklärung mit den Studierenden zu vereinbaren.

Gewährleistung

Weder die FHNW noch das ITFE können irgendwelche Gewähr bieten für das Erreichen der Projektziele. Das Engagement der Studierenden ist jedoch in aller Regel hoch, unsere Betreuung sowie das Gewicht der Projektbewertung vergrössern zusätzlich die Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs.

Termine

Einreichung: bis 1.2. (Frühlingssemester) bzw. bis 1.9. (Herbstsemester)
im Sekretariat ITFE oder an die Dozierenden

Projektstart: Februar (KW 8, i.d.R. als Bachelor Thesis) bzw.
September (KW 38, Semester-Projekte)

Geheimhaltung, Rechte und Veröffentlichung

Aufgabenstellungen, bei denen Informationen und Ergebnisse vertraulich behandelt werden müssen, können diskret bearbeitet und verwaltet werden. Hierzu wird eine gegenseitige Geheimhaltungsvereinbarung unterzeichnet. Die Rechte an den Ergebnissen der Projektarbeit gehören dem Auftraggeber, sofern nichts anderes vereinbart wurde. Die Veröffentlichung von Projektergebnissen erfolgt ausschliesslich mit beiderseitigem Einverständnis von Auftraggeber und betreuendem Dozierenden. Für ein Einverständnis muss der zu veröffentlichende Text im Wortlaut vorliegen.

Kontakt:

- | | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------------------|
| ▪ Prof. Dr. Christoph Gossweiler | Tel. 056 202 7397 | christoph.gossweiler@fhnw.ch |
| ▪ Prof. Dr. Timothy Griffin | Tel. 056 202 7436 | timothy.griffin@fhnw.ch |
| ▪ Prof. Dr. Kai Herrmann | Tel. 056 202 7767 | kai.herrmann@fhnw.ch |
| ▪ Prof. Dr. Norbert Hofmann | Tel. 056 202 7398 | norbert.hofmann@fhnw.ch |
| ▪ Prof. Dr. Beat Ribi | Tel. 056 202 7434 | beat.ribi@fhnw.ch |
| ▪ Prof. Dr. Peter Stuber | Tel. 056 202 7646 | peter.stuber@fhnw.ch |
| ▪ Prof. Dr. Daniel Weiss | Tel. 056 202 7401 | daniel.weiss@fhnw.ch |
| ▪ Sekretariat ITFE, Verna Roos | Tel. 056 202 8536 | verena.roos@fhnw.ch |



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Technik

Mengenmessung in Heliumkühlkreisläufen des Mu3e Experiments

Projektmanagementdossier
Bachelor-Thesis



Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik
Institut für Thermo und Fluid Engineering
Bachelor of Science - Maschinenbau
Vertiefungsrichtung Energietechnik
Windisch, 15. März 2020

Studierender:	Niculin Flucher	niculin.flucher@students.fhnw.ch
Projektbetreuer:	Prof. Dr. Beat Ribl	
Auftraggeber:	Dr. Frank Meier Aeschbacher	

Glossar

Justierung Einstellen eines Messsystems, um Messabweichungen auf Werte zu bringen, die den technischen Forderungen entsprechen [1]

Kalibrierung Feststellen des für ein Messsystem gültigen Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgrösse [1]

Mu3e Ein laufendes Projekt des Paul Scherrer Instituts (PSIs) zur Detektion eines gemäss dem Standardmodell der Teilchenphysik extrem unwahrscheinlichen Zerfalls [2]

P5 Projektarbeit im fünften Semester, Vorbereitung für das P6

P6 Projektarbeit im sechsten Semester, Bachelor-Thesis

PM-Dossier Vorliegendes Dokument, welches die Zielvereinbarung, Planung und Struktur des P6 enthält

Projekt Turbokompressor P5- und P6-Projekt von K. Malacrida, welches sich um den im Versuchsaufbau verbauten Turbokompressor dreht

Akronyme

AP Arbeitspaket

ECTS Europäisches System zur Übertragung und Akkumulierung von Studienleistungen

FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz

FMEA Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

ITFE Institut für Thermo- und Fluid-Engineering

MS Meilenstein

PSI Paul Scherrer Institut

Inhaltsverzeichnis

Glossar	ii
Akronyme	ii
1 Ausgangslage	2
1.1 Auftraggeber und Betreuer	2
1.2 Zusammenarbeit mit dem Projekt Turbokompressor	2
2 Zielsetzung	3
2.1 Übergeordnete Zielsetzung	3
2.2 Projektziele	3
2.3 Teilziele	3
3 Lieferungen	5
3.1 Berichte	5
3.2 Präsentationen und Verteidigung	5
3.3 Datenablage	5
3.4 Versuchsaufbau	5
4 Methodisches Vorgehen	6
4.1 Kritischer Pfad	6
4.2 Schnittstellen zum Projekt Turbokompressor	6
4.3 Projektstruktur	7
4.4 Projektplan	8
4.5 Liste der Arbeitspakete	9
4.6 Liste der Meilensteine	16
5 Projektrisiken	18
5.1 Risikoinventar P6	19
6 Ressourcen	21
6.1 Beteiligte Personen	21
6.2 Material und Software	21
6.3 Infrastruktur	21
6.4 Zeit	22
7 Geheimhaltung	22
8 Einverständniserklärung	23

1 Ausgangslage

Am Paul Scherrer Institut (PSI) wird in Zusammenarbeit mit verschiedenen Hochschulen und der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) im Experiment Mu3e nach dem Zerfall eines Myons in zwei Positronen und ein Elektron gesucht. Es wird dazu ein Experiment aufgebaut, mit welchem auf die Flugbahn der Zerfallsprodukte und somit auf den Zerfall selbst geschlossen werden kann. Da von den Detektoren aus Silizium-Chips im Kern des Experimentes viel Wärme erzeugt wird, müssen sie gekühlt werden. Die erwartete Wärmeproduktion der Detektoren beträgt $250 - 400 \text{ mW/cm}^2$, wobei sie sich nicht über 70°C erhitzen dürfen. Als Kühlmedium für diesen speziellen Aufbau eignet sich gasförmiges Helium bei atmosphärischem Druck am besten [3]. Die Überwachung der dazu notwendigen Kühlkreisläufe muss ermöglicht werden. Die Kühlleistung ist vom Massenfluss $[\text{g/s}]$ abhängig und dieser soll von der Mengemessung überwacht werden. Dies kann aber nicht mit herkömmlichen Durchflussmessgeräten umgesetzt werden, da diese zu gross oder zu teuer sind oder zu grosse Druckverluste verursachen. Mit kommerziell erhältlichen Sensoren soll ein System entwickelt werden, welches im Mu3e eingesetzt werden kann. Die Kühlung der Detektoren ist sicherheitsrelevant. Es muss deshalb ermittelt werden, wie gross die Unsicherheit des Messsystems für die Kühlkreisläufe ist. In einem vorangehenden P5-Projekt wurde ein Versuchsaufbau eines solchen Kühlkreislaufes mit einem Venturirohr zur Durchflussmessung erarbeitet [4]. Weiter wurde eine Lösung mit einem Heissfilm-Durchflussmesser angedacht, welche im P6 umgesetzt werden soll. Die Erkenntnisse und Vorbereitungen aus dem P5 dienen als Grundlage für das vorliegende Projekt.

1.1 Auftraggeber und Betreuer

Der Auftraggeber ist das PSI. Die Kontaktperson ist Dr. Frank Meier Aeschbacher. Die Aufgabe wird von Prof. Dr. Beat Ribi vom Institut für Thermo- und Fluid-Engineering (ITFE) der FHNW betreut.

1.2 Zusammenarbeit mit dem Projekt Turbokompressor

Kevin Malacrida (ein Studierender an der FHNW) bearbeitet zeitgleich ein Projekt, welches den Turbokompressor untersucht, der im Mu3e verwendet werden soll. Dieser wurde im vorangehenden P5 ebenfalls im Versuchsaufbau installiert. Dabei sind die Projekte teilweise gekoppelt. Dies trifft primär auf die Versuche mit Kompressor und Durchflussmessung zu.

2 Zielsetzung

Das vorliegende PM-Dossier dient als Abmachung zwischen dem Betreuer und dem Studierenden für das geplante P6 und wird in der Einverständniserklärung (Kapitel 8) vom Auftraggeber mitunterschrieben. Abweichungen und Anpassungen während des Projekts müssen begründet, besprochen und dokumentiert werden. Die Zielsetzung basiert auf der Projektausschreibung (siehe Anhang).

2.1 Übergeordnete Zielsetzung

Es soll ein oder mehrere kalibrierte Mengenmesssysteme mit geringem Druckverlust für die Heliumkühlkreisläufe des Mu3e mit einem Durchfluss von 2-10 g/s realisiert werden. Dabei soll ermittelt werden, welche Messgenauigkeit mit den Systemen möglich ist.

2.2 Projektziele

Die folgenden Ziele sollen während des P6 erreicht werden.¹

- Die Durchflussmessung mit Venturirohr soll als Versuchsaufbau abgeschlossen und geprüft werden.
- Die Durchflussmessung mit Heissfilm soll im Versuchsaufbau umgesetzt und geprüft werden.
- Für beide Messmethoden soll die erreichbare Messgenauigkeit ermittelt werden.
- Das Messsystem, welches besser für den Einsatz im Mu3e geeignet ist, soll justiert und kalibriert werden.²
- Zuhanden des Mu3e soll eine Empfehlung zum Einsatz des Messsystems angegeben werden.

2.3 Teilziele

Folgende Teilziele stellen die erforderlichen Zwischenschritte zur Erreichung der Projektziele dar und sind diesen untergeordnet. Diese Teilziele sollen in den Arbeitspaketen im Kapitel 4 widergespiegelt werden.

- Methodisches Vorgehen zum Erreichen der Projektziele ist geplant
- Versuchsaufbau mit Venturirohr fertiggestellt und mit Sensoren bestückt
- Versuchsaufbau mit Heissfilm-Durchflussmessung fertiggestellt und mit Sensoren bestückt
- Versuchsaufbau auf Dichtheit optimiert und geprüft
- Versuchsaufbau bezüglich Sicherheit optimiert und freigegeben
- Sensitivitätsanalyse und Messunsicherheitsanalyse für beide Messmethoden durchgeführt
- System zur Datenerfassung für Venturirohr und Heissfilm umgesetzt

¹Die Ziele des Studierenden, welche sich auf die notenrelevanten Lieferungen (Bericht, Poster und Verteidigung) beziehen, werden hier nicht aufgeführt.

²Siehe Definition für Justierung und Kalibrierung.

- Messauftrag für Probemessungen und Versuche beider Messmethoden erstellt und auf Kalibrierung ausgelegt
- Probemessungen und Versuche mit beiden Messmethoden durchgeführt
- Messresultate der Versuche ausgewertet
- Zu kalibrierende Messmethode ausgewählt
- Messsystem nach Auswertung mechanisch oder elektronisch verbessert und justiert
- Messsystem kalibriert und Messunsicherheit ermittelt
- Dokumentation der erreichbaren Messgenauigkeit des kalibrierten Messsystems unter bestimmten Einsatzbedingungen

3 Lieferungen

Im P6 werden folgende Lieferungen verlangt.

3.1 Berichte

- Die Bachelor-Thesis wird in Form eines technischen Berichtes verfasst. Der Bericht ist gemäss den allgemeinen Richtlinien der FHNW, beziehungsweise den spezifischen Richtlinien des ITFE zu gestalten [5]. **Abgabe: KW33**
- Ein Zwischenbericht am Ende des Semesters, welcher nicht bewertet wird, wird dem Betreuer abgegeben. Dies ermöglicht eine zeitgerechte Rückmeldung zum Zwischenstand und Anpassung auf die gestellten Anforderungen. **Abgabe: KW24**

3.2 Präsentationen und Verteidigung

- Nach der Abgabe des Zwischenberichtes findet eine Zwischenpräsentation für die Experten statt, welche nicht bewertet wird. **Termin: KW24**
- Es ist ein Poster zur Präsentation an Ausstellungen und Besuchstagen der Fachhochschule zu gestalten. Interessierte sollten sich mithilfe des Posters über das Projekt und die Resultate informieren können. **Termin: KW33**
- Die Verteidigung³ der Bachelor-Thesis ist die Präsentation des fertigen P6 vor Experten und Dozierenden. **Termin: KW36-37**
- Eine Präsentation für den Auftraggeber kann vom Auftraggeber und Studierenden gewünscht werden. Diese wird nicht bewertet, kann jedoch der Vorbereitung für die Verteidigung dienen.

3.3 Datenablage

Dem ITFE sind alle zur Bearbeitung der Arbeit relevanten Dateien des P5 und P6 digital via SwitchDrive zugänglich zu machen. Messprotokolle, Sitzungsprotokolle, Berichte, Poster und weiteres wird geordnet abgelegt und kann nach Beendigung des Projektes archiviert werden.

3.4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau beider Projekte Mengenmessung und Turbokompressor wird nicht als Lieferung bewertet. Ein Rückbau des Versuchsaufbaus ist nicht während des Projekts geplant.

³Wird nicht als Teil der eingeplanten Arbeitsstunden gerechnet, sondern wird nach Abgabe des Bachelor-Thesis angehängt.

4 Methodisches Vorgehen

Die Projektstruktur auf Seite 7 zeigt auf, wie das P6 in Arbeitspakete (APs) und Meilensteine (MS) gegliedert werden soll, in welcher Reihenfolge das Projekt bearbeitet wird und wie die APs (Kapitel 4.5) und MS (Kapitel 4.6) verknüpft sind. Die Absicht hinter dieser Gliederung ist das schrittweise Erreichen der Teil- und Projektziele.

Arbeitspakete

Die APs (Liste der APs in Kapitel 4.5) definieren einen Prozess. Dieser Prozess baut auf den vorhandenen Ressourcen (Input) auf und gibt gewünschte Ergebnisse (Output) aus. Für die APs wird ein Zieldatum festgelegt und der Zeitbedarf geschätzt.

Meilensteine

Die MS (Liste der MS in Kapitel 4.6) zeichnen sich durch eine Kontrolle oder Entscheidung aus. Es werden bestimmte Kriterien auferlegt, welche erfüllt werden müssen, dass mit dem Projekt weitergefahren werden kann. Entscheidungen bezüglich Meilensteinen und zusätzliche Iterationen von APs werden gemäss Projektstruktur und Beschreibung der MS gefällt. Die wöchentlichen Projektsitzungen dienen als Plattform für solche Entscheidungen.

4.1 Kritischer Pfad

Der im Kapitel 4.3 ersichtliche kritische Pfad zeigt die voneinander abhängigen APs auf. Die vorangehenden APs müssen abgeschlossen werden, sodass die Grundlage (Input) für die folgenden APs vollständig gegeben ist. Wenn ein AP oder MS auf einem kritischen Pfad Verzögerungen aufweist, kann dies eine Verzögerung des gesamten Projektes zur Folge haben, was wiederum zum Nichterreichen der Projektziele führen kann. Um dies zu verhindern, wird im Kapitel 5 eine Risikoanalyse durchgeführt.

4.2 Schnittstellen zum Projekt Turbokompressor

Bei einigen APs muss das Vorgehen mit dem Projekt Turbokompressor abgestimmt werden. Der Versuchsaufbau soll gemeinsam freigegeben werden, sodass beide Projekte Versuche durchführen können. Dies gilt für die Freigabe mit Venturirohr (MS2) und mit Heissfilm (MS3). Des Weiteren ist die Planung der Versuchsmessungen (AP08) auf eine gute Zusammenarbeit angewiesen, da Versuche mit Turbokompressor und Versuche ab Gasflasche für die Mengemessung wichtig sind.

4.4 Projektplan

Im Projektplan sind die APs und MS entlang einer Zeitachse dargestellt. Die Arbeitsstunden pro Arbeitspaket oder Arbeitsschritt sind in der Spalte *Zeit* eingetragen. Die geplanten *Arbeitsstunden pro Woche* und *Arbeitsstunden total* sind horizontal in den untersten Zeilen eingetragen. Die blau-graue Zeile zum Turbokompressor zeigt die geplanten Arbeiten des Projekts Turbokompressor, welche einen Einfluss auf die Arbeit und Planung der Mengenmessung haben.

Nr	AP/MS Arbeit	Zeit	Soll/Ist	KW08	KW09	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22	KW23	KW24	KW25	KW26	KW27	KW28	KW29	KW30	KW31	KW32	KW33	KW34	KW35	KW36	KW37	
1	AP11 Projektmanagement, Arbeitsdokumentation	15	SOLL IST									frei			PW							Vorbereitung	MSP											
2	AP11 Informieren, Einarbeiten	10	SOLL IST																															
3	AP01 MS1 PM Dossier erstellen	20	SOLL IST					•																										
4	AP02 MS2 Versuchsaufbau mit Venturirohr abschliessen	25	SOLL IST				•																											
5	AP03 Datenerfassung und Anweisungen Venturirohr	20	SOLL IST																															
6	AP04 Versuchsmessungen Venturirohr	10	SOLL IST																															
7	AP05 MS3 Versuchsaufbau Heissfilm installieren	20	SOLL IST								•																							
8	AP06 Datenerfassung und Anweisungen Heissfilm	5	SOLL IST																															
9	AP07 Sensitivitätsanalyse, Messunsicherheitsanalyse	30	SOLL IST																															
10	AP08 Versuche Venturi, Versuche Heissfilm	35	SOLL IST																															
11	AP09 MS4 Auswertung und Messunsicherheitsanalyse	35	SOLL IST																•															
12	AP10 MS5 Kalibrierung, Justierung und Review	60	SOLL IST																								•							
13	AP10 AP09 Reservezeit Auswertung, Kalibrierung, Justierung	10	SOLL IST																															
14	AP12 Zwischenpräsentation, Zwischenbericht	5	SOLL IST																••															
15	AP12 Technischer Bericht verfassen, Poster	50	SOLL IST																													••		
16	AP12 Korrekturlesen	10	SOLL IST																															
17	AP12 Verteidigung	(10)	SOLL IST																															•
	Turbokompressor																																	
	Arbeitsstunden pro Woche			10	20	20	15	15	15	15	5	0	10	10	40	10	10	10	10	5	0	0	0	0	40	40	25	25	10				(5)	(5)
	Arbeitsstunden total			10	30	50	65	80	95	110	115	115	125	135	175	185	195	205	215	220	220	220	220	220	260	300	325	350	360					

Abbildung 2: Projektplan des P6

4.5 Liste der Arbeitspakete

AP01 - Projektmanagementdossier

Zeitbedarf 20 h
Zieldatum KW42

Input

- Projektausschreibung
- Leitfaden P5/P6-Projekte
- Anforderungen und Wünsche des Auftraggebers
- Hinweise Betreuer und Assistenten
- Rückmeldung zu Bericht P5

Vorgehen

- Auftrag analysieren
- Einteilung in APs und MS
- Zeitplanung erstellen
- Projektrisiken analysieren

Output

- Ausgearbeitetes PM-Dossier (unterzeichnet von Betreuer, Arbeitgeber und Studierenden)
-

AP02 - Versuchsaufbau Venturirohr

Zeitbedarf 25 h
Zieldatum KW10

Input

- Versuchsaufbau und Erkenntnisse aus P5
- Absprache mit Projekt Turbokompressor
- Sensoren aus P5

Vorgehen

- Venturirohr mit Sensoren versehen und anschliessen
- Anschluss an Helium- und Stickstoff-Gasflasche umsetzen
- Versuchsaufbau abdichten

Output

- Versuchsaufbau mit Venturirohr, welcher bereit ist für die Inbetriebnahme
-

AP03 - Datenerfassung und Messanweisung für Venturirohr

Zeitbedarf 20 h
Zieldatum KW12

Input

- Versuchsaufbau und Sensorik aus AP02
- Datenblätter der Sensoren

Vorgehen

- Programm zum Auslesen der Sensoren (Differenzdruck, Temperatur, Absolutdruck) erstellen
- Programm zum Auslesen der Messgeräte (T-Mass, Coriolis, Binary Gas Analyzer) einrichten
- Anweisungen für Venturirohr ab Gasflasche und mit Turbokompressor erstellen
- Messanweisungen ausarbeiten (Vorbereitung, Einstellung der Datenerfassung und des Versuchsaufbaus, Ablauf und Betriebspunkte, ...)

Output

- System für die Datenerfassung mit Venturirohr
 - Messanweisungen/Drehbuch für Betrieb ab Gasflasche und mit Turbokompressor
-

AP04 - Versuchsmessungen mit Venturirohr

Zeitbedarf 10 h
Zieldatum KW15

Input

- Versuchsaufbau mit Venturirohr aus AP02
- Datenerfassung und Messanweisung zu Venturirohr aus AP03
- Berechnungen für Venturirohr aus P5

Vorgehen

- Vorbereitung gemäss Messanweisung
- Plausibilitätsmessungen im Betrieb mit Turbokompressor durchführen (Stickstoff und Helium)
- Messresultate aufzeichnen
- Beobachtungen protokollieren
- Messresultate interpretieren und mit Erwartungen vergleichen

Output

- Erkenntnisse über Einsetzbarkeit von Venturirohr
 - Erkenntnisse für weitere Versuche
 - erste Messresultate mit Venturirohr
 - Messprotokoll
-

AP05 - Versuchsaufbau Heissfilm

Zeitbedarf 20 h

Zieldatum KW18

Input

- Versuchsaufbau und Erkenntnisse von AP02
- Absprache mit Projekt Turbokompressor
- Sensoren aus P5

Vorgehen

- Rohrleitung bearbeiten
- Halterung für Sensor entwerfen und fertigen
- Sensor einbauen und anschliessen
- Versuchsaufbau abdichten

Output

- Versuchsaufbau mit Heissfilm, welcher bereit ist für die Inbetriebnahme
-

AP06 - Datenerfassung und Messanweisung für Heissfilm

Zeitbedarf 5 h

Zieldatum KW19

Input

- Versuchsaufbau und Sensorik aus AP05
- Datenblätter des Sensors
- Messanweisungen und Datenerfassung aus AP03
- Erkenntnisse aus den Versuchsmessungen aus AP04

Vorgehen

- Programm zum Auslesen des Heissfilm-Sensors erstellen
- Programm zum Auslesen der Messgeräte (T-Mass, Coriolis, Binary Gas Analyzer) einrichten
- Anweisungen für Heissfilm ab Gasflasche und mit Turbokompressor erstellen
- Messanweisungen ausarbeiten (Vorbereitung, Einstellung der Datenerfassung und des Versuchsaufbaus, Ablauf und Betriebspunkte, ...)

Output

- System für die Datenerfassung mit Heissfilm
 - Messanweisungen/Drehbuch für Betrieb ab Gasflasche und mit Turbokompressor
-

AP07 - Sensitivitätsanalyse und Unsicherheitsanalyse

Zeitbedarf 30 h
Zieldatum KW30

Input

- Fachliteratur (Fehlerrechnung, Messunsicherheit, Datenverarbeitung, ...)
- Datenblätter der Sensoren, Messgeräte und Messkarten

Vorgehen

- Messsystem Venturirohr und Heissfilm beschreiben
- Modellgleichungen für beide Messsysteme bilden
- Sensitivitätsanalyse durchführen
- Mögliche grobe und systematische Fehler identifizieren
- Korrekturmöglichkeiten für systematische Fehler bestimmen
- Unsicherheit abschätzen/berechnen

Output

- Erwartungen für Versuche
 - Erkenntnisse zu Empfindlichkeit
 - Verbesserungsvorschläge zum Versuchsaufbau, Datenerfassung und Resultatbildung
-

AP08 - Versuche mit Venturirohr und Heissfilm

Zeitbedarf 43 h
Zieldatum KW30

Input

- Versuchsaufbau aus AP02 und AP05
- Datenerfassung und Messanweisung aus AP03 und AP06
- Erkenntnisse aus Versuchen mit Venturirohr aus AP04
- Absprache mit Projekt Turbokompressor

Vorgehen

- Vorbereitung gemäss Messanweisung
- Plausibilitätsmessungen für Venturirohr und Heissfilm durchführen
- Versuche für Venturirohr und Heissfilm gemäss Messanweisung durchführen
- Unterschiedliche Betriebspunkte ab Gasflasche und mit Turbokompressor einstellen
- Beobachtungen und Umgebungsbedingungen protokollieren
- Messresultate aufzeichnen
- Messresultate interpretieren und mit Erwartungen vergleichen

Output

- Aufzeichnungen gemäss Messanweisung für beide Messsysteme
 - Messprotokoll
 - Erkenntnisse zur Einsetzbarkeit beider Messsysteme
-

AP09 - Auswertung und Messunsicherheit ermitteln

Zeitbedarf 35 h
Zieldatum KW26

Input

- Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse aus AP07
- Vergleichbare Messresultate und Messprotokolle aus den Versuchen aus AP08 für Venturirohr und Heissfilm
- Theorie aus AP07

Vorgehen

- Rohdaten ordnen und ev. bereinigen
- Statistische Auswertung der Daten (Streuung, Korrelationen, ...)
- Daten untersuchen (Drift, Nullpunktverschiebung, Hysterese, ...)
- Übertragungsfunktionen nach Möglichkeit linearisieren
- Messunsicherheit beider Systeme mit möglichen Korrekturen berechnen

Output

- Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Messsystems beim MS4
 - Grundlagen für Kalibrierung und Justierung
 - Kennlinie für Messsysteme
 - Erkenntnisse über Korrelationen von Parametern
-

AP10 - Kalibrierung und Justierung

Zeitbedarf 60 h
Zieldatum KW30

Input

- Kennlinie aus AP09
- Rohdaten aus den Versuchen aus AP08
- Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge aus AP07

Vorgehen

- Systematische Messfehler bestimmen
- Verbleibende zufällige Fehler bestimmen
- Parameter der Übertragungsfunktionen aus AP07 bestimmen
- Übertragungsfunktionen nach Möglichkeit linearisieren
- Korrekturen an der Resultatbildung vornehmen, um systematische Fehler zu eliminieren (Parameter und Übertragungsfunktion anpassen)
- Bei Bedarf Anpassungen an der Messkette vornehmen
- Messunsicherheit dokumentieren und Messbereich bestimmen

Output

- Übertragungsfunktionen mit Korrekturparameter
 - Dokumentation der Messunsicherheit des Messsystems
 - Quereinflüsse der Betriebsbedingungen dokumentieren
-

AP11 - Projektmanagement und Arbeitsdokumentation

Zeitbedarf 15 h

Zieldatum -

Input

- Status Meetings
- Leitfaden P5/P6

Vorgehen

- Besprechungen planen, durchführen und protokollieren
- Arbeit und Entscheidungen dokumentieren
- Dokumentieren der Informationsquellen

Output

- Sitzungsprotokolle
 - Arbeitsjournal und Arbeitsdokumentation
-

AP12 - Technischer Bericht, Poster und Verteidigung

Zeitbedarf 65 h

Zieldatum KW24 (Zwischenbericht und Zwischenpräsentation)
KW33 (Technischer Bericht und Poster)
KW36-37 (Verteidigung)

Input

- Arbeitsdokumentation aus AP11
- Erkenntnisse aus sämtlichen APs

Vorgehen

- Zwischenbericht
 - Vorlage für Bericht erstellen
 - Aktuellen Arbeitsstand dokumentieren
- Zwischenpräsentation
 - Präsentation des aktuellen Arbeitsstandes vorbereiten
 - Präsentation vor Experten halten
- Technischer Bericht erstellen
 - relevante Theorie zusammenfassen
 - Resultate veranschaulichen, interpretieren und kritisch hinterfragen
 - Erkenntnisse zusammentragen
- Poster erstellen
 - Rücksprache mit Auftraggeber und Betreuer bezüglich Inhalt und Sprache halten
- Verteidigung
 - Auftrag, Vorgehen, Resultate und Interpretation zusammenfassen
 - Präsentation erstellen, einüben und vor Experten halten

Output

- Zwischenbericht und Zwischenpräsentation
 - Bachelor-Thesis in Form eines technischen Berichtes
 - Poster für Ausstellung
 - Präsentation für Verteidigung
-

4.6 Liste der Meilensteine

MS1 - Freigabe PM-Dossier

Zieldatum KW12

Inhalt

- Abgabe definitive Fassung des PM-Dossier

Kriterien

- Planung der Ziele und des Vorgehens ist vollständig
 - Einverständnis von Betreuer, Auftraggeber und Studierenden
-

MS2 - Freigabe Versuchsaufbau mit Venturirohr

Zieldatum KW11

Inhalt

- Sicherheitsfreigabe des Versuchsaufbaus
- Dichtheitsprüfung des Versuchsaufbaus
- Anschluss der Druckflaschen und Betrieb des Turbokompressors ist freigegeben
- Synchronisierung mit Projekt Turbokompressor

Kriterien

- Versuchsaufbau ist sicher (elektrisch, thermisch, mechanisch, chemisch, ...)
 - Einverständnis des Sicherheitsbeauftragten
 - Mechanische Arbeiten am Versuchsaufbau sind abgeschlossen
-

MS3 - Freigabe Versuchsaufbau mit Heissfilm

Zieldatum KW15

Inhalt

- Sicherheitsfreigabe des Versuchsaufbaus
- Dichtheitsprüfung des Versuchsaufbaus
- Anschluss der Druckflaschen und Betrieb des Turbokompressors ist freigegeben
- Synchronisierung mit Projekt Turbokompressor

Kriterien

- Versuchsaufbau ist sicher (elektrisch, thermisch, mechanisch, chemisch, ...)
 - Einverständnis des Sicherheitsbeauftragten
 - Mechanische Arbeiten am Versuchsaufbau sind abgeschlossen
-

MS4 - Wahl des zu kalibrierenden Messsystems

Zieldatum KW23

Inhalt

- Vergleich der erreichbaren Messgenauigkeit beider Systeme
- Vergleich der Vor- und Nachteile für den Einsatz im Muße
- Status Meeting mit Auftraggeber zur Entscheidung

Kriterien

- Einverständnis des Auftraggebers
 - Messsystem weist keine kritischen Fehler auf und kann weiterentwickelt werden
-

MS5 - Review des kalibrierten Messsystems

Zieldatum KW30

Inhalt

- Präsentation des aktuellen Standes des Messsystems
- Beurteilung der erreichten Messunsicherheit
- Präsentation der Empfehlungen für den Betrieb, um die Messunsicherheit niedrig zu halten
- Ev. Auflagen für Weiterentwicklung oder Einsatz festlegen

Kriterien

- Bereich und Messunsicherheit für das Messsystem sind bestimmt
 - Messsystem ist ohne fundamentale Anpassungen im Muße einsetzbar
 - Einverständnis des Auftraggebers
-

5 Projektrisiken

Für jedes Risiko wird eine ganzzahlige Wahrscheinlichkeit $p = 1..3$ und ein ganzzahliges Schadenspotential $s = 1..3$ abgeschätzt. Das Produkt $p \cdot s$ ergibt die Priorität. Gemäss der Abbildung 3 wird sichtbar, welche Risiken reduziert werden müssen.

Schaden	hoch 3	3	6	9
	mittel 2	2	4	6
	gering 1	1	2	3
		gering 1	mittel 2	hoch 3
		Eintretenswahrscheinlichkeit		

Abbildung 3: Risikomatrix mit Prioritäten 1...9

grün (1-2) Dieses Risiko kann getragen werden.

gelb (3-4) Dieses Risiko soll reduziert werden. Wenn nicht möglich, soll das Risiko entsprechend überwacht werden.

rot (6-9) Dieses Risiko kann nicht getragen werden. Es muss durch vorbeugende Massnahmen reduziert werden.

Die im Risikoinventar im Kapitel 5.1 aufgeführten Risiken werden gemäss der Risikomatrix (Abbildung 3) eingestuft (Spalten: Risiko und Auswirkung). Für sämtliche Risiken werden präventive Massnahmen definiert, um die Eintretendwahrscheinlichkeit p und/oder den Schaden s zu reduzieren (Spalte: Überwachen und Bewältigen). Die entsprechenden Massnahmen werden im vorliegenden PM-Dossier eingeplant. Das Risiko wird unter Berücksichtigung der Massnahmen neu eingeschätzt (Spalte: Verbesserung). Die immer noch gelb eingefärbten, erhöhten Risiken werden während des Projekts überwacht. Das Risikoinventar muss bei einer Veränderung der Umstände und dem Auftauchen neuer Risiken überarbeitet werden. Als zusätzliche Risikoabschätzung wurde im P5 eine Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) durchgeführt, welche auf die Sicherheitsaspekte des Versuchsaufbaus bezieht. Die entsprechenden Präventivmassnahmen wurden bereits getroffen. Eines der wichtigsten Werkzeuge zur Überwachung und Neuevaluierung der Risiken ist das wöchentliche Status Meeting (siehe Kapitel 6).

5.1 Risikoinventar P6

Die Massnahmen zur Reduktion und Überwachung der grössten Risiken gemäss Risikoinventar in Abbildung 4 und 5 sind hier der Übersichtlichkeit halber aufgelistet und ergänzt.

- Sicherheitsvorschriften im Labor und Weisungen des Sicherheitsbeauftragten befolgen
- Versuchsaufbau nur mit Freigabe des Sicherheitsbeauftragten in Betrieb nehmen
- Dichtheitsprüfung gewissenhaft durchführen und Leckstellen verbessern
- Sensitivitätsanalyse frühzeitig durchführen und, wenn nötig, Korrekturen vornehmen
- Wöchentliche Meetings wahrnehmen und zur Überprüfung des Fortschritts und neu auftretenden Risiken nutzen
- Soll- und Ist-Zustand des Projektfortschritts und Zeitplans regelmässig vergleichen
- Regelmässige Kommunikation und Abgleiche mit Projekt Turbokompressor, um Kollisionen und Verzögerungen zu vermeiden
- Experten bezüglich den Messresultaten und der Auswertung befragen um Fehler zu vermeiden
- Resultate systematisch prüfen und kritisch hinterfragen

Identifizieren			Bewerten			Überwachen & bewältigen	Verbesserung		
AP	Risiko	Auswirkung	Wahrsch. p (1-3)	Schaden s (1-3)	Prio =p*s	Präventivmassnahmen p+s: p' und s'	Wahrsch. p' (1-3)	Schaden s' (1-3)	Prio =q'*s'
	Versuchsaufbau wird sehr heiss/kalt, steht unter Strom, fliegende Komponenten	Person wird verletzt	mittel 2	hoch 3	● 6	p+s: FMEA gemäss Weisungen des Sicherheitsbeauftragten umsetzen und Massnahmen ergreifen	gering 1	gering 1	● 1
	Austretendes Helium oder Stickstoff	Personen oder Geräte nehmen Schaden	hoch 3	gering 1	● 3	p: Infoblatt für iPhone-Nutzer während Versuch bei Eingang aufhängen und eigene Geräte schützen s: Schrittweiser Druckaufbau im System, um frühzeitig abbrechen zu können Standort auf der Empore in grosser Halle für gute Belüftung	mittel 2	gering 1	● 2
01	Unpräzise oder falsche Ziele formuliert	Ziele werden verfehlt	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Ziele mit Betreuer und Auftraggeber absprechen. Kriterien für MS formulieren, um überprüfbare Ziele zu haben. Einverständniserklärung von Beteiligten unterschreiben lassen.	gering 1	mittel 2	● 2
	Ungenügende Kommunikation zu Betreuer und Auftraggeber	Ziele werden verfehlt	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Wöchentliche Meetings wahrnehmen und Status und Schwierigkeiten vorstellen. Informationen selbständig einholen. s: Meilensteine zur Kontrolle der Resultate durch Beteiligte nutzen.	gering 1	mittel 2	● 2
	Zeitverzögerung im Projekt	Ziele werden nicht erreicht, Versuche können nicht durchgeführt werden	mittel 2	hoch 3	● 6	p: Regelmässiger Soll/Ist-Vergleich im Zeitplan durchführen. Zeitplan mit Turbokompr. abgleichen. s: Zeitpuffer einplanen	mittel 2	mittel 2	● 4

Abbildung 4: Risikoinventar Teil 1 von 2

Identifizieren			Bewerten			Überwachen & bewältigen	Verbesserung		
AP	Risiko	Auswirkung	Wahrsch.	Schaden	Prio	Präventivmassnahmen	Wahrsch.	Schaden	Prio
			p (1-3)	s (1-3)	=p*s	p'Δp' und s'Δs'	p' (1-3)	s' (1-3)	=q'*s'
11	ungenügend verfügbare Informationen zur Problemstellung	Probleme können nicht gelöst werden	mittel 2	hoch 3	6	p: Datenbanken berücksichtigen. s: Fachpersonal (Dozenten, Assistenten, Auftraggeber) bei erfolgloser Recherche befragen.	gering 1	mittel 2	2
04 08	Annahme falscher Parameter für Betrieb des Versuchsaufbaus	Versuche ergeben unbrauchbare Resultate	mittel 2	mittel 2	4	p: Berechnungen vor Versuchen überprüfen. Erwartungen formulieren. s: Vorgehen im Falle eines Fehlschlages: Betrieb ab Druckflasche Versuche ev. am PSI durchführen.	gering 1	mittel 2	2
02 05	Verspätete Lieferung oder Fertigung von Komponenten	Messungen können nicht rechtzeitig durchgeführt werden	mittel 2	mittel 2	4	p: Frühzeitig bestellen, fertigen (lassen) und Lieferfristen abklären.	gering 1	mittel 2	2
04 08	Laboreinrichtung ist nicht verfügbar	Messungen können nicht rechtzeitig durchgeführt werden	mittel 2	mittel 2	4	p: Reservation überprüfen, Einsatzzeiten abschätzen und frühzeitig einplanen.	gering 1	mittel 2	2
02 05	fehlerhafter Versuchsaufbau	Fehlerhafte Messungen, Verbesserung oder Umbau nötig	mittel 2	hoch 3	6	p: Konzept von Fachpersonal überprüfen lassen. Assistenten bei Planung und Umsetzung beiziehen.	gering 1	hoch 3	3
02 05	fehlerhafte Messgeräte	Fehlerhafte Messungen, Austausch ist nötig	mittel 2	mittel 2	4	p: Messgeräte prüfen und ev. kalibrieren lassen. Erste Resultate frühzeitig auf Plausibilität prüfen und mit Erwartungen vergleichen.	gering 1	mittel 2	2
02 05	fehlerhafte Fertigung von Teilen	Zeitverzögerung, nichterreichen der Projektziele	gering 1	hoch 3	3	p: Fertigung mit Werkstattpersonal vor Auftrag besprechen. s: Teile bei der Abholung prüfen und bei Bedarf nachbearbeiten lassen.	gering 1	hoch 3	3
02 05	Kompatibilität von Versuchsaufbau mit Turbokompressor ist ungenügend	nur Betrieb ab Druckflasche ist möglich, grösserer Gasverbrauch, weniger Erkenntnisse aus Messungen	mittel 2	mittel 2	4	p: Versuchsaufbau und Messungen gemeinsam planen. Schnittstellen klar definieren.	gering 1	mittel 2	2
	Verzögerung des Versuchsaufbaus oder Versuche durch Projekt Turbokompressor	Nichterreichen der Projektziele	mittel 2	hoch 3	6	p: Frühzeitige und regelmässige Absprachen mit K. Malacrida und Abgleich der Zeitplanung beider Projekte durchführen. s: Versuche im Betrieb ab Druckflasche durchführen bei Verzögerung.	mittel 2	mittel 2	4
02 05	Dichtigkeit des Versuchsaufbaus ist ungenügend	Verunreinigung durch Luft lässt keine repräsentativen Versuche zu und verfälscht Resultat	mittel 2	hoch 3	6	p: Dichtheitsprüfung durchführen. s: Versuche ab Druckflasche oder am PSI durchführen.	mittel 2	mittel 2	4
08 09	Falsche oder unbrauchbare Messresultate	Fehlerhafte Auswertung	mittel 2	mittel 2	4	p: Versuchsaufbau und Instrumentierung überprüfen lassen. s: Daten und Auswertung prüfen lassen. Plausibilitätskontrolle durchführen lassen.	mittel 2	mittel 2	4
09	fehlende Messresultate oder Berechnungen	Fehlerhafte Auswertung	mittel 2	mittel 2	4	p: Datenablage strukturieren und Resultate zeitnahe ablegen. Input und Output der APs bei der Bearbeitung kontrollieren.	gering 1	mittel 2	2
09	Fehlerhafte Auswertung, falsche Annahmen	Fehlerhafte Grundlage für weitere Arbeiten	mittel 2	hoch 3	6	p: Vorgehen gemäss GUM. s: Resultate vor MS prüfen und präsentieren. Resultate kritisch prüfen (validieren).	gering 1	mittel 2	2
10	Sensoren oder Datenerfassung sind ungenau	Kalibrierung und Justierung ergeben eine ungenügende Genauigkeit	mittel 2	hoch 3	6	p: Frühzeitige Sensitivitätsanalyse durchführen. Beide Messmethoden verfolgen. s: Bei Versagen, alternative Lösungen auf dem Markt suchen.	gering 1	mittel 2	2

Abbildung 5: Risikoinventar Teil 2 von 2

6 Ressourcen

Während einem wöchentlichen Status Meeting präsentiert der Studierende dem Betreuer und ev. dem Auftraggeber den Fortschritt und hat die Möglichkeit, Fragen zu stellen oder Rücksprache zu halten, bevor Entscheidungen getroffen werden. Während des Projektes kann der Studierende von den wissenschaftlichen Assistenten und Mitarbeitern des ITFE Hilfe erfragen.

6.1 Beteiligte Personen

Seitens der FHNW und des PSI wird das Projekt von folgenden Personen betreut:

Personen der FHNW

- Dr. Prof. Beat Ribi
Institutsleiter ITFE
- Carsten Hersberger, MSc Eng.
Wissenschaftlicher Assistent
- Manuel Voggesser, MSc Eng.
Wissenschaftlicher Assistent
- Marin Deflorin, MSc Eng.
Wissenschaftlicher Assistent
- Tom Strebel, EMBA
Sicherheitsbeauftragter

Personen des PSI

- Dr. Frank Meier Aeschbacher
Technischer Koordinator Mu3e Mu3e

6.2 Material und Software

Käufe von nicht vorhandenen Mitteln laufen über das ITFE und müssen vom Studierenden beantragt werden. Messgeräte, Materialien und Werkzeuge vom ITFE-Labor müssen ebenfalls vom Studierenden beantragt werden. Messgeräte für die Durchfluss-, Temperatur- und Druckmessung sind vorhanden, müssen jedoch reserviert werden. Über die Schulserver stehen Programme zum Berechnen, Auswerten und Dokumentieren zur Verfügung (z.B. Microsoft Office, MatLab, LabVIEW).

6.3 Infrastruktur

Es stehen Arbeitsplätze am Campus Brugg-Windisch zur Verfügung. Für den Messaufbau wurde ein Arbeitsplatz im in der Maschinenhalle im Gebäude 2 eingerichtet.

6.4 Zeit

Für das P6 erhalten Studierende beim erfolgreichen Bestehen des Modules 12 ECTS (Europäisches System zur Übertragung und Akkumulierung von Studienleistungen). Ein ECTS erfordert gemäss Bologna-Reform rund 30 Stunden Arbeitsaufwand. Demzufolge wird für das P6 ein Aufwand von 360 Arbeitsstunden erwartet. Aufgrund der Arbeit im Labor, welche oft zeitaufwändig aber wenig aufschlussreich für das Projekt ist, wird jedoch vorgesehen, dass mehr Zeit für diese Arbeiten zur Verfügung steht.

7 Geheimhaltung

Eine projektspezifische Vertraulichkeitserklärung nicht benötigt, da das Mu3e Experiment mit Steuergeldern finanziert wird und Informationen deshalb nicht geheim gehalten werden dürfen. Eine Ausnahme gilt nur für die Informationen von Lieferanten, sofern deren Informationen vertraulich zu behandeln sind. Ansonsten gilt das Studienreglement für die Hochschule für Technik.

8 Einverständniserklärung

Mit folgender Unterschrift bestätigen die Projektbeteiligten, einverstanden zu sein mit dem PM-Dossier, welches als Projektvereinbarung für das Projekt P6 gilt.

Datum: _____

Ort: _____

Studierender: _____
Niculin Flucher

Betreuender Dozent: _____
Prof. Dr. Beat Ribl

Auftraggeber: _____
Dr. Frank Meier Aeschbacher

Literatur

- [1] Jörg Hoffmann. *Taschenbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 7., aktualisierte auflage edition, 2015.
- [2] A Blondel, A Bravar, M Pohl, S Bachmann, N Berger, M Kiehn, A Schöning, D Wiedner, B Windelband, P Eckert, P Fischer, I Perić, M Hildebrandt, G Dissertori, C Grab, R Wallny, R Gredig, P Robmann, and U Straumann. Research Proposal for an Experiment to Search for the Decay $\mu \rightarrow eee$. page 104.
- [3] Marin Deflorin. Helium cooling of Silicon Pixel Detector for Mu3e Experiment. Master's thesis, FHNW, March 2019.
- [4] Niculin Flucher. Projektbericht P5 Mengenmessung. unveröffentlicht, January 2020.
- [5] Go, Hek, Hm, Rbb, Stp, Wsd. Leitfaden P5/P6-Projekte, August 2019.

Projektarbeiten / Bachelorthesis

Titel des Projektes

Durchflussmessung mittels kommerziellen MEMS-Sensoren

Auftraggeber

Firma: Paul Scherrer Institut, WBWA 131

Name: Meier Aeschbacher, Dr.

Vorname: Frank

Funktion:

Strasse:

PLZ / Ort: 5232 Villigen

Telefon: +41 56 310 3671

Mobile: +41 78 632 0790

E-Mail: frank.meier@psi.ch

Betreuender Dozierende / Assistierende: B. Ribi /**Themengebiet (in Stichworten):**

- Experimentelle Untersuchung
 Simulation

Projekt eignet sich für:

5. Semesterprojekt
 Bachelor-Thesis

-
-

Schwierigkeitsgrad (leicht/mittel/schwer):

mittel/schwer

Kurze Beschreibung des ProjektsAusgangslage / Problemstellung:

Im sogenannten Mu3e-Experiment wird nach dem Zerfall eines Myons in zwei Positronen und ein Elektron gesucht. Tritt dieser Zerfall auf, bedeutet das eine Verletzung des Standardmodells der Teilchenphysik.

Unter Führung und Koordination des Paul Scherrer-Instituts sucht ein internationales Konsortium aus verschiedenen Hochschulen nach diesem Zerfall. Dazu wird z. Zt. ein Experiment aufgebaut, in dem mittels verschiedener Halbleiterdetektoren auf die Bahn der Teilchen und damit auf den Zerfall selbst geschlossen werden kann. Die Detektoren bestehen aus Silizium-Chips, die mit Helium gekühlt werden müssen. Dazu sind mehrere Kreisläufe nötig, die separat geregelt werden müssen. Der jeweilige Durchsatz muss dazu bekannt sein. Da aber herkömmliche Messmethoden mit der erforderlichen Genauigkeit entweder zu teuer sind oder einen zu hohen Druckverlust aufweisen, soll mittel kommerziellen MEMS-Sensoren zur Druckmessung ein System aufgebaut werden (Venturi-Rohr), das kalibriert die erforderliche Messgenauigkeit sicherstellt.

Aufgabe:

Parameterstudie hinsichtlich Geometriegrößen für die zu erreichende Genauigkeit bei geg. Massenstrombereich und Druck.
Konzeption, Dimensionierung und Fertigung der Mengenmessung
Kalibrierung derselben

Ziele/Ergebnisse/Lieferobjekte:

Kalibrierte Mengenmessung mit MEMS mit zu erwartender Genauigkeit liegt vor

Rahmenbedingungen:

Besondere Bemerkungen / Geheimhaltung:
Vertraulichkeitsvereinbarung erforderlich

Studierender:

Projektstatus, durch den betreuenden Dozenten auszufüllen:

Der Auftraggeber ist über unsere Rahmenbedingungen informiert:

Ja Nein

Das Projekt ist in die Übersichts-Projektliste eingetragen :

Ja Nein

RICHTLINIEN FÜR STUDIERENDENPROJEKTE

Rahmenbedingungen

Im Rahmen des Bachelor-Studiums Maschinenbau haben die Studierenden der FHNW im 5. und im 6. Semester jeweils ein Projekt zu bearbeiten, diese Projekte werden meist kurz als "P5"- bzw. "P6"-Projekt bezeichnet. Das Projekt P6 (Bachelor Thesis) ist die Abschlussarbeit des Studiums.

Die Projekte sind mit 6 (für die Projekte P5) bzw. 12 (für die Projekte P6) ECTS-Punkten gewichtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass der von den Studierenden erbrachte Aufwand mindestens etwa 180 Arbeitsstunden (für die Projekte P5) bzw. 360 Arbeitsstunden (für die Projekte P6) beträgt.

Ablauf

Im P5 wird der Aufwand während eines Semesters zum einen Teil parallel zum Studium (im Umfang von etwa 1 Tag/Woche während 15 Semesterwochen), zum anderen Teil während einer Woche Intensivphase (KW 49) erbracht. Im P6 wird der Aufwand einerseits während des Semesters zum einen Teil parallel zum Studium, zum anderen Teil während einer Projektwoche (KW 19), zusätzlich während einer Intensivphase von fünf Wochen im Anschluss an das Semester (KW 29 bis 33) erbracht. Die Projekte P5 und P6 werden sehr oft in Zusammenarbeit mit und für einen industriellen Partner durchgeführt. Thematisch schliesst sich das Projekt P6 meist an das Projekt P5 an, so dass beim Projekt P6 die weitere Einarbeitungszeit entfällt.

Kosten

Die FHNW erhebt eine Bearbeitungsgebühr zur Deckung eines Teils der Aufwendungen. Es wird pro Semester eine vom Projekterfolg unabhängige Pauschale von CHF 1'500.- zuzüglich MWSt erhoben.

Die Studierenden haben kein Anrecht auf Entschädigungen oder Honorare. Spesen, welche während der Arbeiten bei den Studierenden anfallen, sind i.d.R. vom Auftraggeber zu übernehmen und bei der Auftragsklärung mit den Studierenden zu vereinbaren.

Gewährleistung

Weder die FHNW noch das ITFE können irgendwelche Gewähr bieten für das Erreichen der Projektziele. Das Engagement der Studierenden ist jedoch in aller Regel hoch, unsere Betreuung sowie das Gewicht der Projektbewertung vergrössern zusätzlich die Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs.

Termine

Einreichung: bis 1.2. (Frühlingssemester) bzw. bis 1.9. (Herbstsemester)
im Sekretariat ITFE oder an die Dozierenden

Projektstart: Februar (KW 8, i.d.R. als Bachelor Thesis) bzw.
September (KW 38, Semester-Projekte)

Geheimhaltung, Rechte und Veröffentlichung

Aufgabenstellungen, bei denen Informationen und Ergebnisse vertraulich behandelt werden müssen, können diskret bearbeitet und verwaltet werden. Hierzu wird eine gegenseitige Geheimhaltungsvereinbarung unterzeichnet. Die Rechte an den Ergebnissen der Projektarbeit gehören dem Auftraggeber, sofern nichts anderes vereinbart wurde. Die Veröffentlichung von Projektergebnissen erfolgt ausschliesslich mit beiderseitigem Einverständnis von Auftraggeber und betreuendem Dozierenden. Für ein Einverständnis muss der zu veröffentlichende Text im Wortlaut vorliegen.

Kontakt:

▪ Prof. Dr. Christoph Gossweiler	Tel. 056 202 7397	christoph.gossweiler@fhnw.ch
▪ Prof. Dr. Timothy Griffin	Tel. 056 202 7436	timothy.griffin@fhnw.ch
▪ Prof. Dr. Kai Herrmann	Tel. 056 202 7767	kai.herrmann@fhnw.ch
▪ Prof. Dr. Norbert Hofmann	Tel. 056 202 7398	norbert.hofmann@fhnw.ch
▪ Prof. Dr. Beat Ribi	Tel. 056 202 7434	beat.ribi@fhnw.ch
▪ Prof. Dr. Peter Stuber	Tel. 056 202 7646	peter.stuber@fhnw.ch
▪ Prof. Dr. Daniel Weiss	Tel. 056 202 7401	daniel.weiss@fhnw.ch
▪ Sekretariat ITFE, Verna Roos	Tel. 056 202 8536	verena.roos@fhnw.ch

F Zeitplan

Nr	AP/MS	Arbeit	Zeit	Soll/Ist	KW08	KW09	KW10	KW11	KW12	KW13	KW14	KW15	KW16	KW17	KW18	KW19	KW20	KW21	KW22	KW23	KW24	KW25	KW26	KW27	KW28	KW29	KW30	KW31	KW32	KW33	KW34	KW35	KW36	KW37		
1	AP08	Projektmanagement, Arbeitsdokumentation	15	SOLL IST									frei			PW																				
2	AP08	Informieren, Einarbeiten	10	SOLL IST																																
3	AP01 MS1	PM-Dossier erstellen	25	SOLL IST					X	♦																										
		Versuchsaufbau mit Venturirohr abschliessen	10	SOLL IST																																
		Datenerfassung und Anweisungen Venturirohr	20	SOLL IST																																
		Versuchsaufbau Heissfilm installieren	10	SOLL IST																																
4	AP05	Sensitivitätsanalyse, Messunsicherheitsanalyse	40	SOLL IST																																
5	AP07	Vorbereitung für Kalibrierung und Justierung	50	SOLL IST																																
6	AP02	Simulationen planen und vorbereiten	30	SOLL IST																																
7	AP03	Venturirohr simulieren und verifizieren	20	SOLL IST																																
8	AP04	Heissfilm simulieren und verifizieren	20	SOLL IST																																
9	MS2	Wahl des Messprinzips		SOLL IST																																
10	AP06 MS3	Weitere Simulationen, Validierung und Review	50	SOLL IST																																
	AP06 MS3	Versuche, Validierung und Review	50	SOLL IST																																
11	AP09	Zwischenpräsentation, Zwischenbericht	5	SOLL IST																																
12	AP09	Technischer Bericht verfassen, Poster	45	SOLL IST																																
13	AP09	Korrekturlesen	10	SOLL IST																																
14	AP09	Verteidigung	(10)	SOLL IST																																
Total	360 450	Arbeitsstunden pro Woche		SOLL IST	10 7	20 26	20 22	15 17	15 12	15 8	15 8	5 15	20 9	10 7	10 0	10 28	10 19	10 17	10 15	10 17	5 9	0 20	0 8	0 3	0 29	40 32	40 27	25 36	25 35	20 26	0	0	0	(5) 0	(5) 0	

Legende	
AP	Arbeitspaket
AP	AP bei Überarb. gestrichen
KW	Kalenderwoche
MS	Meilenstein ♦
	Abgabe, Präsentation ♦
	Soll
	Ist
	frei

G Digitaler Anhang

- 1_Empfehlung_Mu3e
- 2_Projektmanagement
 - PM-Dossier
 - Projektbericht P5
- 3_Protokolle
 - 01_Sitzungsprotokolle
 - 02_Präsentationen
- 4_Datenblätter
- 5_Bilder
 - 01_Verdichterkreislauf_FHNW
 - 02_Kalibrierstrecke_PSI
- 6_Fertigungsunterlagen
- 7_Arbeitsjournal
- 8_Abgaben
 - Projektbericht P6
 - Poster