Tests der Mechanik und Kühlung des Spurdetektors für das P2-Experiment

von

Frederic Jonathan Stieler



Bachelorarbeit in Physik vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08) der Johannes Gutenberg-Universität Mainz am 17. Dezember 2018

Gutachter: Prof. Dr. Niklaus Berger
 Gutachter: Prof. Dr. Frank Maas

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Mainz, den 17.12.2018

Frederic Jonathan Stieler Institut für Kernphysik Staudingerweg 7 Johannes Gutenberg-Universität D-55128 Mainz fstieler@students.uni-mainz.de

Abstract

Das P2-Experiment versucht das Standardmodell der Teilchenphysik zu überprüfen. Hierzu wird ein Spurdetektor genutzt, um den Zusammenhang des schwachen Mischungswinkels mit dem Impulsübertrag von Elektronen an einem unpolarisierten Protonentarget aus flüssigen Wasserstoff experimentell zu bestimmen.

In dieser Arbeit wurde die Mechanik und die Kühlung des Spurdetektors für das P2-Experiment getestet. Hierbei verwendet man für Messungen und Simulationen Heizstreifen anstelle der im P2-Experiment verwendeten HV-MAPS genutzt, um die Tests durchzuführen. Da Helium sehr teuer ist, wurden Luft für die ersten Tests der Kühlung als Kühlmittel genutzt.

Zu Beginn wurde der genutzte experimentelle Aufbau in einem Computerprogramm nachgestellt und Simulationen für verschiedene Szenarien der Testmessungen angefertigt. Daraufhin wurde der bereits teilweise vorhandene experimentelle Aufbau im Labor fertiggestellt. Nun konnten Messungen durchgeführt werden und deren Ergebnisse mit den vorangegangenen Simulationen verglichen werden. Hierbei stellte sich heraus, dass die Simulationen lediglich kleine Abweichungen zu den gemessenen Werten aufweisen.

Zuletzt wurde noch die Mechanik des Aufbaus getestet. Da man verhindern möchte, dass sich die Heizstreifen während der Messung biegen, wurden Federn zu beiden Seiten der Streifen angefügt. Dabei wurde festgestellt, dass die genutzten Federn stark genug sind, um die Heizstreifen während ihrer Erhitzung zu strecken und damit an der Verbiegung zu hindern.

Inhaltsverzeichnis

1	Ein	leitung	1
2	P2-	Experiment	2
	2.1	Schwacher Mischungswinkel	2
	2.2	Ziel der Messung	2
		2.2.1 Messung des schwachen Mischungswinkeis	ა ე
	0.0	2.2.2 Messung des Impulsubertrages	3 4
	2.3	High Voltage Mononthic Active Pixel Sensoren	4
	2.4	Kunlung der High Voltage Monolitnic Active Pixel Sensoren	5
3	The	eoretische Grundlagen	7
	3.1	Reynolds-Zahl	7
	3.2	Spezifische Warmekapazitat	8
	პ.პ ე_₄	Iemperaturkoemzient	8
	3.4		9
	3.) २.८	Unmsches Gesetz	9
	3.0	Mittelwert	9
4	Ver	suchsaufbau	10
	4.1	Aufbau eines einzelnen Streifens	10
	4.2	Aufbau des Spanngerüsts	12
	4.3	Aufbau der Luftzufuhr	13
	4.4	Maximaler Gasfluss	14
5	\mathbf{Sim}	ulation der Kühlung	16
	5.1	Autodesk Inventor Modell	16
	5.2	Simulation mit CFD	16
	5.3	Simulation ohne Kühlkanäle	18
		5.3.1 Simulationsmodell - ohne Kühlkanäle	18
		5.3.2 Randbedingungen - ohne Kühlkanäle	19
		5.3.3 Geschwindigkeitsprofil der aufsteigenden Luft - ohne Kühlkanäle	20
		5.3.4 Temperaturprofil der Heizstreifen - ohne Kühlkanäle	22
	5.4	Simulation mit Kühlkanälen	25
		5.4.1 Simulationsmodell - mit Kühlkanälen	25
		5.4.2 Randbedingungen - mit Kühlkanälen	26
		5.4.3 Geschwindigkeitsprofil der aufsteigenden Luft - mit Kühlkanälen	27
		5.4.4 Temperaturprofil der Heizstreifen - mit Kühlkanälen	28
6	Mes	ssungen	32
	6.1	Messung ohne Kühlkanäle	32
	6.2	Messung mit Kühlkanälen	36
	6.3	Messung der Wärmeausdehnung von Kapton	43
7	Zus	ammenfassung und Ausblick	47

7 Zusammenfassung und Ausblick

ΑΑ	nhang		48
А	.1 Zusät	zliche Graphiken	48
	A.1.1	Zusätzliche Graphiken der Simulationen ohne Kühlkanäle	48
	A.1.2	Zusätzliche Graphiken der Simulationen mit Kühlkanälen	50
	A.1.3	Zusätzliche Graphiken zu den Messungen ohne Kühlkanäle	53
	A.1.4	Zusätzliche Graphiken zu den Messungen mit Kühlkanälen	54
А	.2 Zusät	zliche Tabellen	60
	A.2.1	Zusätzliche Tabellen zu den Messungen ohne Kühlkanäle	60
	A.2.2	Zusätzliche Tabellen zu den Messungen mit Kühlkanälen	61

1 Einleitung

Aufgabe der Physiker ist es die Welt um sich herum zu verstehen und mit Modellen beschreiben zu können. So auch in der Teilchenphysik, in der seit Jahren das Standardmodell (SM) als bisher bestes Modell zur Beschreibung der meisten teilchenphysikalischen Phänomene angesehen wird. Nichtsdestotrotz ist auch dieses Modell nicht vollständig, da es Dinge, wie zum Beispiel Neutrino-Oszillationen nicht erklären kann. Es liegt somit auf der Hand, dass dieses Modell nicht das Maß aller Dinge sein kann, weshalb man weiterhin nach einem ausgereifteren Modell sucht.

Das P2-Experiment versucht das SM zu testen, indem man gezielt nach Abweichungen von den Erwartungen des SM sucht. Eine solche Abweichung würde eindeutig beweisen, dass das SM nicht vollständig ist und somit "Neue Physik" gefunden werden muss. Mit dem P2-Experiment möchte man den elektroschwachen Mischungswinkel präzise bestimmen, indem man den Wirkungsquerschnitt der paritätsverletzenden Asymmetrie der elastischen Elektron-Proton-Streuung misst [2]. Um im Experiment den Impulsübertrag der Elektronen zu messen, nutzt man einen Spurdetektor aus High Voltage Monolithic Active Pixel Sensoren (HV-MAPS).

Da die Effizienz dieser Detektoren bei Temperaturen unter 70 $^{\circ}$ C am besten ist und sie bei etwa 140 $^{\circ}$ C zerstört werden, müssen diese während der Messung gekühlt werden. Diese Bachelorarbeit befasst sich mit den Tests der Mechanik und Kühlung der Spurdetektoren für das P2-Experiment.

2 P2-Experiment

2.1 Schwacher Mischungswinkel

Aus der Vereinheitlichung der schwachen mit der elektromagnetischen Wechselwirkung ergibt sich unter anderem, dass die zwei Eichbosonen Z_0 (schwache Wechselwirkung) und γ (elektromagnetische Wechselwirkung) als Mischzustände von zwei anderen, nicht beobachtbaren Eichbosonen B^0 und W^0 beschrieben werden können. Den mathematischen Zusammenhang liefert der schwacher Mischungswinkel θ_{ω} in einer Rotationsmatrix [1]:

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_\omega & \sin \theta_\omega \\ -\sin \theta_\omega & \cos \theta_\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^0 \\ W^0 \end{pmatrix}.$$
 (2.1)

2.2 Ziel der Messung

Im P2-Experiment möchte man diesen schwachen Mischungswinkel bei möglichst geringem Impulsübertrag μ und mit bisher unerreichter Genauigkeit bestimmen. Aufgrund von Quantenkorrekturen hängt der schwache Mischungswinkel vom Impulsübertrag ab.



Abb. 2.1: Abhängigkeit von $\sin^2(\theta_{\omega})$ vom Impulsübertrag μ . Die SM-Vorhersage ist als blaue Kurve, geplante Experimente als gelbe und fertige Experimente als rote Messpunkte dargestellt [2].

Wie man sehr gut in Abbildung 2.1 erkennen kann, ist der Fehlerbalken des P2-Experiments wesentlich geringer, als der der bisher durchgeführten Messungen in diesem Impulsübertragsbereich. Um eine solche Genauigkeit zu erlangen ist eine hohe Luminosität von etwa $2.4 \times 10^{39} \frac{1}{\text{s-cm}^2}$ erforderlich, welche am Mainz Energy-recovery Superconductiung Accelerator (MESA) erreicht werden soll. Der Bau von MESA soll ungefähr 2020/2021 abgschlossen werden [2].

2.2.1 Messung des schwachen Mischungswinkels

Um den schwachen Mischungswinkel im P2-Experiment zu bestimmen, schießt man Elektronen auf ein unpolarisiertes Protonentarget, welches aus flüssigem Wasserstoff besteht. Der Elektronenstrahl besitzt dabei eine Energie von 155 MeV und eine Stromstärke von 150 μ A. Die Helizität der Elektronen wird mit einer Frequenz von etwa 1 kHz zwischen links- zu rechtshändigen Elektronen gewechselt. Die elastisch gestreuten Elektronen werden daraufhin von Cherenkov-Detektoren nachgewiesen. Dabei bewegen sich die gestreuten Elektronen in einem Medium schneller als die Lichtgeschwindigkeit, wodurch Cherenkov-Strahlung entsteht, welche daraufhin detektiert wird.

Ginge man lediglich von einer elektromagnetischen Wechselwirkung der Elektronen mit dem Target aus, so würde man für links- und rechtshändige Elektronen genau gleich viele detektierte Ereignisse erwarten. Da jedoch auch die schwache Wechselwirkung (wenn auch nur sehr schwach) durch den Austausch eines virtuellen Z-Bosons zur Streuung beiträgt und diese eher ein Einfluss auf linkshändige als auf rechtshändige Teilchen hat, erwartet man eine leichte Asymmetrie der detektierten Teilchen, welche sich durch mehr detektierte linkshändige Elektronen äußert. Man kann somit die Asymmetrie mit

$$A^{PV} = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} \tag{2.2}$$

berechnen, wobei A^{PV} für die "paritätsverletzende Asymmetrie" und N^{\pm} für die Anzahl der elastische Streuungen von Elektronen mit Spin $\pm 1/2$ an unpolarisierten Protonen steht [2]. Man erwartet eine Asymmetrie von etwa

$$\langle A^{PV} \rangle = (39.94 \pm 0.56)ppb,$$
 (2.3)

was zu einer relativen Unsicherheit von etwa 1.4% führt. Dabei bezieht sich der Fehler auf eine Messung über ein Zeitintervall von 10^4 h.

2.2.2 Messung des Impulsübertrages

Um den theoretischen Verlauf aus Abbildung 2.1 zu überprüfen, muss noch der Impulsübertrag Q gemessen werden. Hierzu wird ein Spurrekonstruktionsdetektor aus HV-MAPS (High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors) genutzt, welche über eine sehr gute Orts- und Zeitauflösung verfügen. Diese Sensoren werden in zwei doppelten Ebenen im P2-Experiment angebracht. Damit soll sowohl der Ort, an dem das Teilchen durch die HV-MAPS gedrungen ist, als auch die jeweilige Zeit gemessen werden. Aus der Krümmung der Teilchen im äußeren Magnetfeld kann man den Impuls des Teilchens nach der Streuung bestimmen. Aus der Differenz aus Impuls vor und nach der Streuung kann man folglich den Impulsübertrag auf das Proton bestimmen.

2 P2-EXPERIMENT



Abb. 2.2: Position der Spurdetektoren im P2-Experiment [3].

2.3 High Voltage Monolithic Active Pixel Sensoren

Ursprünglich wurden die HV-MAPS Sensoren unter dem Namen MuPix für ein anderes Experiment entwickelt, das Mu3e Experiment. Hierbei wird der Zerfall $\mu^+ \rightarrow e^-e^+e^+$ untersucht, welcher nicht vom SM erwartet wird. Analog zum P2-Experiment soll also auch beim Mu3e Experiment das SM auf die Probe gestellt werden. Da die Sensoren über eine sehr gute Auflösung bei geringer Materialdichte verfügen, können sie ebenfalls für die Spurdetektion des P2-Experiments genutzt werden. Diese HV-MAPS Sensoren aus Silizium sind aus einer N-dotierten Wanne in einem P-dotierten Substrat aufgebaut, zwischen welchen eine Spannung von 85 V in Sperrichtung angelegt ist.



Abb. 2.3: Schema eines HV-MAPS Sensors [4].

Bringt man einen P- und einen N-dotierten Halbleiter zusammen, entsteht eine Raumladungszone ohne Ladungsträger, welche als Detektor fungieren soll (Abbildung 2.4 (b)). Da das intrinsische elektrische Feld im Allgemeinen nicht stark genug ist, um die freien Ladungen über Drift abzusagen und die Raumladungszone zu klein ist, um effektiv als Detektor zu arbeiten, schaltet man den Übergang in Sperrrichtung (Abbildung 2.4 (c)). Trifft nun ein hochenergetisches Teilchen auf diese neutral geladene Raumladungszone entstehen Elektronen-Loch-Paare, die von der angelegten Spannung "abgesaugt" werden und somit ein elektrisches Signal erzeugen. Somit können also Teilchen detektiert werden.



Abb. 2.4: Verschiedene Bilder zu PN-Übergängen [5].

Um Vielfachstreuung zu unterbinden, ist die Dicke der Sensoren auf 50 μ m reduziert. Obwohl die Sensoren somit sehr flach sind, kann erstmals die gesamte Ausleseelektronik in den Chips ausgeführt werden [6].

Diese HV-MAPS Sensoren produzieren während ihres Betriebes etwa $250 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ an Leistung, die sich direkt in Wärme umwandelt. Damit die Funktionstüchtigkeit der Sensoren gewährleistet ist, müssen sie gekühlt werden. Die Kühlung der Sensoren und die dazugehörige Mechanik werden in dieser Bachelorarbeit detailliert diskutiert.

2.4 Kühlung der High Voltage Monolithic Active Pixel Sensoren

Im P2-Experiment möchte man die Sensoren kühlen, da ihre Effizienz bei einer Temperatur unter 70 °C am besten ist und sie bei einer Temperatur von etwa 140 °C zerstört werden. Da Helium eine wesentlich größere Wärmekapazität als Luft besitzt und somit Wärme leichter aufnehmen kann, eignet es sich im Vergleich zur Luft wesentlich besser zur Kühlung der Detektoren. Außerdem verfügt Helium über eine höhere Mobilität und eine geringere Dichte als Luft, wodurch es zu weniger Streuungen der zu detektierenden Teilchen mit dem Kühlgas kommt.

In Abbildung 2.5 ist der Grundaufbau eines Moduls des Spurdetektors für das P2-Experiment zu sehen. Dabei ist ein Panel abgebildet, welches aus mehreren Streifen besteht, die auf

2 P2-EXPERIMENT

PCBs (printed circuit boards) befestigt wurden. Ganz oben erkennt man dabei mehrere aneinandergereihte HV-MAPS (blau), die einen Streifen bilden. Darauf ist ein Kühlkanal (gelb) angebracht. An beiden Enden ist jeweils ein PCB (grün) und ein Endblock (grau) befestigt. Darunter sieht man mehrere dieser Streifen nebeneinander aufgereiht, wobei mehrere Streifen entfernt wurden, um eine bessere Sicht auf den Aufbau zu erhalten. Die Streifen sind auf den PCBs und dem Kühlungsrohr befestigt (grün und grau). Ganz unten erkennt man die Gaszufuhr [7].



Abb. 2.5: Bild eines kleines Ausschnittes der Detektoren. Oben ist ein einzelner Streifen mit Kühlkanal, in der Mitte ist das gesamte Panel und ganz unten ist die Gaszufuhr für die Kühlung zu erkennen. Dabei symbolisieren die grünen Pfeile den inneren Gasfluss und die magentafarbenen Pfeile den Gasfluss durch die Kühlkanäle [3].

Die Kühlung dieses Panels erfolgt zum einen durch einen inneren Gasfluss und zum anderen durch einen Gasfluss durch die Kühlkanäle, die an den HV-MAPS angebracht sind. In dieser Arbeit betrachte ich lediglich die Kühlung durch die Kühlkanäle. Mit diesem Aufbau lassen sich nun die HV-MAPS kühlen, indem man Helium durch die Gaszufuhr bläst. Diese wird daraufhin durch das Kühlungsrohr in die Endblöcke geleitet und somit in die Kühlkanäle geblasen. Dort ist das Helium in direkten Kontakt mit den HV-MAPS und kühlt diese ab.

3 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden werden einige für die Arbeit relevante Zusammenhänge zu der Fluid- und Thermodynamik besprochen.

3.1 Reynolds-Zahl

Generell gibt es zwei verschiedene Arten von Luftströmungen, die man unterscheiden muss, nämlich die laminare Strömung und die turbulente Strömung. Im P2-Kühlsystem möchte man möglichst verhindern eine turbulente Strömung zu erzeugen, da die Streifen sonst vermutlich anfangen würden zu vibrieren, was die Ortsauflösung der Detektoren beeinflussen könnte [8]. Um zu verhindern, dass das kühlende Gas turbulent durch die Kühlkanäle strömt, untersucht man das jeweilige Gas auf die maximale Geschwindigkeit, bei der es noch in laminarer Strömung fließen kann.

Mit Hilfe der dimensionslosen Reynolds-Zahl kann man abschätzen um welche Art von Strömung es sich handelt. Sie charakterisiert das relative Verhältnis von destabilisierenden (Trägheit) zu stabilisierenden (Reibung) Kräften in einer Strömung.

Die kritische Reynoldzahl, die einen Grenzwert ($\operatorname{Re}_{\operatorname{krit}}$) zwischen laminarer und turbulenter Strömung darstellt, wird hierbei mit 1000 abgeschätzt. Dieser Wert liegt unter dem bekannten Schwellenwert für runde Querschnittsflächen von etwa 2300, um auch für eine dreieckige Querschnittsfläche eine perfekt laminare Strömung ohne turbulenten Anteil zu gewährleisten. Liegt der Wert der berechneten Reynolds-Zahl unter $\operatorname{Re}_{\operatorname{krit}}$, so handelt es sich um eine laminare Strömung, ist sie höher liegt eine turbulente Strömung vor.

Um die Reynolds-Zahl zu bestimmen, muss man sowohl die Dichte des fließenden Mediums ρ , die kinematische Viskosität η und die Flussgeschwindigkeit v des fließenden Mediums, als auch den hydraulischen Durchmesser d des durchflossenen Körpers kennen [9]:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}.$$
(3.1)

Während die Werte für ρ und η bekannt sind, muss der hydraulische Durchmesser d in diesem Fall gesondert betrachtet werden. Liegt ein Gasfluss durch eine runde Querschnittsfläche vor, so kann man einfacherweise den Durchmesser der Röhre als Wert für d nutzen. Da in unserem Fall jedoch Röhren mit dreieckiger Querschnittsfläche vorliegen, muss man in diesem Fall den hydraulischen Durchmesser d mit den charakteristischen Größen der Querschnittsfläche A und des Umfangs U der Öffnung eines Kühlkanals bestimmen [10]:

$$d = \frac{4A}{U}.\tag{3.2}$$

Da man sich für die maximale Geschwindigkeit eines Mediums ohne turbulente Strömung interessiert, will man im besten Falle nicht die pure Geschwindigkeit, sondern vielmehr den maximalen Volumenfluss erhalten. Aus diesem Grund formt man die Geschwindigkeit in eben diesen Volumenstrom Q um:

$$Q = v \cdot A. \tag{3.3}$$

Nun kann man also die Reynolds-Zahl in Abhängigkeit des genutzten Volumenstroms bestimmen. Hierzu werden die Gleichungen (3.2) und (3.3) in die Gleichung (3.1) für die Reynolds-Zahl eingefügt [10]:

$$Re = \frac{4 \rho Q}{\eta U}.$$
(3.4)

3.2 Spezifische Wärmekapazität

Um das angewandte Kühlprinzip zu verstehen, muss man in erster Linie auf die spezifische Wärmekapazität der benutzten Gase eingehen. Die spezifische Wärmekapazität c gibt dabei an, wie viel Energie einem Stoff zugeführt werden muss, um 1 kg dieses Stoffes um 1 K zu erhitzen [11]:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} \tag{3.5}$$

Die Werte der spezifischen Wärmekapazität werden in den folgenden Betrachtungen näherungsweise als temperaturunabhängig angesehen. Mit dieser Vereinfachung erhalten wir die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Werte.

	Luft	Helium
Wärmekapazität $c_P \left[kJ/(kg \ K) \right]$	1.005	5.193

Tabelle 3.1: Wärmekapazitäten für Luft und Helium bei festem Druck [12].

Hierbei ist zu beachten, dass die Wärmekapazität c_P bei konstantem Druck genutzt wird. Da sich die Werte der Wärmekapazität während der Messungen auch mit etwas inkonstanten Druck nicht wesentlich ändern sollte, kann man die Wärmekapazität als konstant annehmen.

3.3 Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient α beschreibt die Änderung einer Materialeigenschaft mit der Temperatur im Verhältnis zu einer Referenztemperatur T_0 . Im späteren Verlauf der Arbeit möchte ich den Temperaturunterschied ΔT von Heizstreifen mit der Änderung ihres Widerstands ΔR im Vergleich zum Anfangswiderstand R_0 bestimmen, wozu ich Formel 3.6 nutze [13].

$$\Delta T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{\Delta R}{\alpha R_0}.$$
(3.6)

Dabei ist der Temperaturkoeffizient eine materialabhängige Größe. In unserem Fall betrachtet man Kupfer, welches einen Temperaturkoeffizienten von $\alpha = 3.3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$ besitzt [14].

3.4 Wärmeausdehnungskoeffizient

Unterschiedliche Materialien dehnen sich bei Temperaturanstiegen unterschiedlich stark aus. Der direkte Zusammenhang von Temperaturunterschied zu Längenunterschied kann durch den Wärme- ausdehnungskoeffizienten β ausgedrückt werden [11].

$$\Delta L = \beta L \ \Delta T \tag{3.7}$$

Der Literaturwert für den Wärmeausdehnungskoeffizient von Kapton, welches in dieser Arbeit betrachtet wird, beträgt dabei etwa $\beta = (17-20)10^{-6} \frac{1}{K}$ [15].

3.5 Ohmsches Gesetz

Der Zusammenhang von der Spannung U, der Stromstärke I und des elektrischen Widerstandes R eines Körpers kann mittels des Ohmschen Gesetzes bestimmt werden [13]:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{I}\right)^2 + \left(\Delta I \frac{U}{I^2}\right)^2}.$$
(3.8)

Damit ist es möglich den Widerstand eines Körpers zu bestimmen, an welchem die Spannung U und die Stromstärke I anliegen. Ändert man diese Parameter, so ändert sich im Allgemeinen auch die Temperatur und der Widerstand der Körper. Diese Formel ist somit eine gute Methode die Änderung des Widerstandes mit der Temperatur zu messen.

3.6 Mittelwert

Hat man eine Vielzahl von Messwerten vorliegen, so ist es oftmals ratsam den Mittelwert zu betrachten, da er ein geeignetes Maß für die zentrale Lage der Messwerte liefert. Um diesen Mittelwert samt Standardabweichung zu bestimmen, benutzt man Formel (3.9):

$$\overline{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} T_i$$

$$\Delta \overline{T} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)N} \sum_{i=1}^{N} (\overline{T} - T_i)}.$$
(3.9)

4 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der Aufbau der Kühlung für die HV-MAPS Sensoren dargestellt. Da jedoch noch nicht genügend HV-MAPS Sensoren in ausreichender Größe zur Verfügung stehen, nutzt man einen vereinfachten Versuchsaufbau, um die Kühlung der Spurdetektoren zu untersuchen.

4.1 Aufbau eines einzelnen Streifens

Anstelle die mit ca. 250 $\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ heizenden HV-MAPS Sensoren zu nutzen, werden in diesem Test Heizstreifen verwendet, deren Heizleistung *P* mittels einer angelegten Spannung moduliert werden kann [13]:

$$P = U \cdot I. \tag{4.1}$$

Diese Heizstreifen verfügen ebenso wie die HV-MAPS Sensoren über eine Dicke von 50 μ m und eine Breite von 2 cm. Die HV-MAPS Sensoren an sich verfügen über eine Länge von 2 cm, weil jedoch insgesamt 14 HV-MAPS Sensoren hintereinander gebaut werden, ergibt sich eine Gesamtlänge von 28 cm. Da der Heizstreifen jedoch auch auf den PCBs (printed circuit board) angebracht und die Spannung angelegt werden muss, besitzt dieser eine Länge von 36 cm. In der Mitte der Streifen ist der beheizbare Teil mit der Länge von 28 cm (analog zu den HV-MAPS Sensoren) gelagert, wodurch zu beiden Seiten der Streifen noch jeweils 4 cm Platz für die vorgesehene Befestigung ist [7].

Es werden insgesamt vier, mit Wärmeleitpaste versehene Temperatursensoren an die vorgesehenen, über die gesamten Streifen verteilten Stellen, auf den Heizstreifen gelötet. Um diese Temperatursensoren auszulesen, werden an beiden Enden der Streifen jeweils zwei PCBs angebracht und an einen Arduino-Mikrokontroller [16] angeschlossen. Es wurden daher vier Temperatursensoren (DS18B20 [17]) gewählt, da man den Temperaturverlauf über den gesamten Streifen abschätzen möchte.



(a) Heizstreifen mit genutzten Temperatursensoren und PCBs. (b) Kühlkanäle an einem Heizstreifen mit PCBs.

Die anliegende Spannung wird dabei mit einer Laborspannungsquelle produziert, welche an beide Teststreifen angeschlossen wird. Aufgrund des Innenwiderstandes des Kupfers erhitzt sich der Streifen. Somit können sowohl die in Temperatur umgewandelte Leistung der HV-MAPS Sensoren von etwa $250 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$, als auch verschiedene andere Temperaturen eingestellt werden. Somit lässt sich die Kühlung der Streifen sehr gut untersuchen.

Abb. 4.1: Fotos der genutzten Heizstreifen mit Temperatursensoren und PCBs (links); Heizstreifen mit angebrachten Kühlkanälen (rechts).

Temperatursensoren DS18B20 µSOP

Es werden für die Temperaturmessung die Temperatursensoren DS18B20 μ SOP genutzt, die zwischen -55 °C und 125 °C genutzt werden können. Weil lediglich Temperaturen betrachten werden sollen, die inmitten dieses Intervalls liegen, sind diese Temperatursensoren bestens für die Messung geeignet. Der Fehler dieser Sensoren beläuft sich dabei auf etwa ± 0.5 °C zwischen -10 °C und 85 °C [17].

Ein großer Vorteil dieser Sensoren ist es, dass sie ohne externe Messgeräte funktionieren, nur drei Anschlüsse besitzen und lediglich einen Anschluss für die Kommunikation mit einem Computer benötigen. In Abbildung 4.2 kann man die insgesamt acht Anschlüsse erkennen, von denen lediglich drei genutzt werden müssen.



Abb. 4.2: Skizze der genutzten Temperatursensoren DS18B20 µSOP [17]

Diese Anschlüsse haben dabei verschiedene Zwecke:

- V_{DD} : Spannungszufuhr DQ: Datenauslese
- Gnd: Erdung N.C.: Keine Funktion (no connection)

Die nötigen Kabelführungen sind bereits intern auf dem Heizstreifen angebracht und können an den, am Anfang und Ende der Heizstreifen, befestigten PCBs zu dem dafür vorgesehenen Arduino weitergeleitet werden. Dieser Arduino kann mittels eines nebenstehenden Computers angesteuert werden, um die Daten auszulesen und zu speichern.

Auf den angefertigten Streifen werden nun jeweils auf der Rückseite zwei sogenannte Kühlkanäle angebracht. Später sollen zwischen den Kühlkanälen und den Heizstreifen die kühlende Luft geführt werden, sodass die Kühlkanäle als Rohre mit dreieckiger Querschnittsfläche dienen.

4.2 Aufbau des Spanngerüsts

Die Streifen werden daraufhin auf ein Gerüst gespannt, welches mit insgesamt vier Federn versehen ist. Diese sollen dazu dienen, die Streifen gespannt zu halten, auch wenn sie sich durch die ändernden Temperaturen ausdehnen oder zusammenziehen [7]. Hierzu muss die nötige Federkonstante gefunden werden, um den optimalen Spannungseffekt zu erlangen. Ob die genutzte Federkonstante ausreichend ist, wird in Kapitel 6.3 untersucht.

Um die Streifen auf dem Gerüst zu befestigen, werden sie auf insgesamt vier PCBs geschraubt. Ein "Gasadapter" wird zwischen zwei dieser PCBs geklebt, welcher den Kühlstrom in jeweils zwei Kanälen zu beiden Heizstreifen leitet. Hierbei wird darauf geachtet den Kleber möglichst so anzubringen, dass er einen Luftdichten Verschluss zwischen Gasadapter und PCB liefert. Somit entstehen insgesamt vier Luftströme. Diese vier gebildeten Luftströme werden daraufhin mittels zweier Endblöcke jeweils in einen Kühlkanal geführt. Dort angekommen, ist die Luft in Kontakt mit der Rückseite der Heizstreifen und soll diese dort abkühlen. Nachdem der Kühlstrom durch diese Kanäle geführt wurde, wird dieser auf der anderen Seite des Heizstreifens durch zwei weitere Endblöcke in den freien Raum geleitet.

Die Maße der Kühlkanäle sind dabei so ausgelegt, dass sie in ihrer Breite exakt zweimal nebeneinander auf einen Heizstreifen mit Klebefolie angebracht werden können und mit ihrer dreieckigen Querschnittsfläche genau in die dreieckigen Einkerbungen der Endblöcke passen, sodass der Luftstrom ohne austreten zu können in die Kühlkanäle weitergeleitet wird. Die Kühlkanäle wurden dabei aus einer großen Folie Kapton zurechtgeschnitten und gefaltet, sodass sie ihre charakteristische Form erhalten.



Abb. 4.3: Foto des genutzten Spanngerüsts mit Streifen und dazugehörigen Kühlkanälen. Der angeschlossene Arduino und das Spannungsgerät sind ebenfalls abgebildet.

4.3 Aufbau der Luftzufuhr

Ein Kompressor liefert produziert ein Druckluftreservoir, dessen Druckluftanschluss sich im Labor befindet. An diesem Auslass kann man mittels eines 10 mm Schlauches Druckluft abzapfen. Diese wird dann durch ein Rotameter geführt, welches den Luftstrom messen soll.

Rotameter

Das genutzte Rotameter ist in Abbildung 4.4 (a) zu sehen. Es besteht aus einer Kunststoffhülle, in deren Inneren sich eine Glasröhre befindet. In dieser Glasröhre steckt ein vertikal beweglicher Schwebekörper. Die Funktionsweise eines Rotameters ist darauf ausgelegt, dass der zu messende Luftstrom von unten in das Rotameter eingeführt wird und oben wieder herausfließt. Auf seinem Weg durch das Rotameter hebt der Luftstrom dann den Schwebekörper an.

Auf den Schwebekörper wirken demnach drei Kräfte, die sich zueinander im Gleichgewicht befinden.

$$F_G = F_R + F_A. \tag{4.2}$$

Dabei ist F_G die auf den Schwebekörper wirkende Gewichtskraft, F_R die Reibungskraft und F_A die Auftriebskraft. Die Reibungskraft ergibt sich aus [18]:

$$F_R \approx \rho A v^2 \quad , \tag{4.3}$$

wobei ρ_f die Dichte des fließenden Gases, A der Querschnitt des Flusses und v die Geschwindigkeit des Gases darstellt. Während also die Reibungskraft quadratisch von der Geschwindigkeit v des Gases abhängt, hängen die beiden anderen Kräfte F_A und F_G nicht von Geschwindigkeit des Gases ab. Diese lassen sich mittels

$$F_A \approx V g \rho_f \tag{4.4}$$

$$F_G \approx V g \rho_s \quad ,$$

berechnen [19], wobei V das Volumen des Flusses, ρ_s die Dichte des Schwebekörpers und g die Gravitationsbeschleunigung aufgrund der Erdanziehung darstellt. Aufgrund der Form des Rohres, stellt sich bei höherer Geschwindigkeit des Gases ein Gleichgewicht in höherer Lage im Rotameter ein. Anhand einer Skala, die auf der Glasröhre aufgetragen ist, kann somit der Durchfluss des Gases abgelesen werden.

Da das genutzte Rotameter auf Luft kalibriert ist, kann das Rotameter ohne Rekalibration genutzt werden. Das Rotameter kann Durchflüsse zwischen $0.056 \frac{1}{s}$







(b) Skizze des Prinzips eines Rotameters [20].



und $0.67 \frac{1}{s}$ messen. Da der Durchfluss von Luft in diesem Experiment zwischen diesen beiden Extremwerten liegt, ist das Rotameter also gut geeignet.

Weil dieses Rotameter nur bei aufrechter Lage präzise Werte liefert, wird ein Gestell gebaut, welches das Rotameter fixieren soll. Somit liegt nur die Skala zum Ablesen des Wertes auf dem Rotameter als Fehlerquelle vor.

Da der Durchfluss des Gases am Auslass an der Wand nur sehr grob eingestellt werden kann, wird zur genaueren Regulierung des Luftstromes das Ventil am unteren Ende des Rotameters genutzt. Mit Hilfe dieses Ventils kann der Luftstrom um einiges genauer eingestellt werden.

Der Luftauslass an der Wand wird mit einem Schlauch des Durchmessers 10 mm mit dem unteren Ende des Rotameters verbunden. Ein Schlauch mit einem Durchmesser von 10 mm kann jedoch nicht am Spanngerüst der Heizstreifen angebracht werden, da ein solcher Schlauch nicht zwischen die beiden PCBs passen würde. Aus diesem Grund wurde hierbei auf einen Schlauch mit einem Durchmesser von 8 mm ausgewichen.

4.4 Maximaler Gasfluss

Da die Kühlung mit laminarer Strömung durchgeführt werden soll, muss zunächst die maximal mögliche Geschwindigkeit des Gasflusses bestimmt werden, bei der eben dieser laminare Fluss zustande kommt und noch keine turbulente Strömung einsetzt.

Die Reynolds-Zahl wurde bereits in Abschnitt 3.1 erläutert. Diese dient als Maß dafür, ab welcher Geschwindigkeit oder ab welchem Fluss eines Gases laminare oder turbulen-

te Strömungen vorliegen. Nun soll bestimmt werden, bis zu welcher Geschwindigkeit im Falle der genutzten Kühlkanäle die durchfließende Luft mittels eines laminaren Flusses beschrieben werden kann.

Hierzu kann man in Abbildung 4.5 die Maße eines Kühlkanals einsehen die nötig sind, um den hydraulischen Durchmesser d zu ermitteln. Es ergibt sich somit für ein einzelnen Kanal eine durchflossene Fläche A von 25 mm^2 und ein Umfang U von 16 mm.



Abb. 4.5: Skizze eines Kühlkanals mit wichtigen Maßen.

Den maximalen Fluss, der noch unter laminarer Strömung erfolgt, erhält man, indem man nach Werten für Q sucht, bei denen die Reynolds-Zahl gerade noch unter der kritischen Marke von $Re_{krit} = 1000$ liegt. Werden nun die entsprechenden Werte für Luft und Helium eingesetzt, erhält man den maximalen, laminaren Fluss von Luft und Helium.

	Luft	Helium
Dichte $\rho [\mathrm{kg/m^3}]$	1.2041	0.1785
Dynamische Viskosität η [µPa s]	17.1	18.6
Reynolds-Zahl Re	968.21	959.68
Maximaler Gasfluss Q_{max} [l/s]	0.055	0.40

Tabelle 4.1: Maximale Gasflüsse von Luft und Helium für laminare Strömung in einem Kühlkanal.

Dabei ist gut zu erkennen, dass der maximale Fluss von Helium um etwa den Faktor 80 größer als der für Luft ist. Das lässt sich durch die wesentlich geringere Dichte von Helium erklären, die eine turbulente Strömung erst bei höheren Flüssen ermöglicht.

Im experimentellen Aufbau der Kühlung fließt die Luft aus einer schmaleren Öffnung in die Kühlkanäle der Streifen. Dort ist der Luftfluss also schneller und demnach auch turbulent. Da der erhitzte Teil des Streifens jedoch erst 4 cm nach dieser Öffnung beginnt, ist Luftfluss im Gleichgewicht bei Beginn des heißen Streifens bereits abgebremst und es liegt wieder laminarer Fluss vor. Aus diesem Grund, kann man mögliche turbulente Gebiete vor und nach den Heizstreifen vernachlässigen.

5 Simulation der Kühlung

Zunächst will ich die Kühlung der Heizstreifen simulieren. Ich führe diese Simulationen zum einen durch, um zu sehen ab welchen angelegten Leistungen der Heizstreifen die Temperaturen zu hoch steigen. Damit soll die Überhitzung des Systems vermieden werden. Zum anderen möchte ich die simulierten Ergebnisse mit den gemessenen Ergebnissen vergleichen und die Qualität der Simulation überprüfen. Somit können mit der Simulation zuverlässig verschiedene Szenarien überprüft und ausgewertet werden.

Da jegliche Flüsse durch ihre Umgebung nachhaltig beeinflusst werden, sind die Gleichungen zur Berechnung der Kühlung der Heizstreifen zu komplex, als dass man sie per Hand lösen könnte. Aus diesem Grund wird das Programm Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamics) genutzt.

Mit Hilfe dieses Programms können zum Beispiel thermische Leitung (mit Konvektion und Strahlung) und Fluiddynamik simuliert werden. In unserem Fall wird das Programm für die Wärmeleitung durch natürliche Konvektion und den Luftfluss durch die Kühlkanäle und der damit entstehenden erzwungenen Konvektion genutzt.

5.1 Autodesk Inventor Modell

Um mit den Simulationen zu starten, benötigt man zunächst die Formen und Geometrien der vorliegenden Gegenstände. Diese müssen also an erster Stelle auf dem Computer gezeichnet werden. Hierfür benutze ich das Programm Autodesk Inventor (AI), welches kompatibel mit Autodesk CFD ist. Nun sollen also alle wichtigen Teile des Versuchaufbaus erstellt werden, wobei darauf geachtet werden sollte, dass jegliche Strukturen, die keinen Einfluss auf die Kühlung haben, weggelassen werden (wie zum Beispiel LEDs auf den PCBs). Damit soll verhindert werden, die Simulation unnötig zu verkomplizieren.

Da für die Simulation lediglich die Teile, die direkt an den Heizstreifen anliegen von Bedeutung sind, wird lediglich der Grundaufbau des Spanngerüsts mit den Heizstreifen in AI nachgebaut. Einige Objekte sind bereits in AI erstellt worden und können einfach übernommen werden. Dazu zählen zum Beispiel die Endblöcke und der Gasadapter. Alle anderen Teile des Aufbaus müssen nachgebaut werden. Dabei beginnt man im Grunde mit einer zweidimensionalen Skizze, welche man daraufhin mittels des Befehls "Extrude" in die dritte Dimension erweitert.

5.2 Simulation mit CFD

Nachdem ich nun das benötigte AI Modell des Aufbaus fertiggestellt habe, kann dieser Aufbau via CFD aufgerufen werden. Bevor ich die Simulation starte, müssen noch mehrere Einstellungen getroffen werden.

Zunächst müssen die Materialien der einzelnen Teile des Aufbaus (inklusive der Umgebungsluft) definiert werden. Da die meisten Materialien und somit auch ihre Eigenschaften bereits in CFD aufgeführt sind, muss ich in diesem Fall lediglich Kapton (Kühlkanäle), Messing (Gasadapter) und Polyester-Polyurethan (Schläuche) spezifizieren. Hierfür müssen die Werte der Dichte, spezifischer Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit eingegeben werden. Für Kapton wird noch den Emissionsgrad eingetragen, da ich diesen Wert für die thermische Strahlung in der Simulation benötige. Diese Strahlung kann für den Gasadapter und die Schläuche vernachlässigt werden. Außerdem werden alle Werte als konstant angenommen, da sich diese Werte im erwarteten Temperaturbereich nur geringfügig ändern.

Physikalsiche Größe	Kapton	Messing	Polyester-Polyurethan
Dichte $\rho \ [g/cm^3]$	1.42	8.73	1.10
Thermische Leitfähigkeit $k [W/(K m)]$	0.158	120	0.19
Spezifische Wärmekapazität c_P [J/(kg K)]	1.09	377	1.76
Emissions grad ϵ	0.9	-	-

Tabelle 5.1: Genutzte physikalische Größen für Simulation von Kapton [21], Messing [22],
Polyester-Polyurethan [23], [24].

Des Weiteren wird die Luft als einziges Material als variabel deklariert, wodurch sich die Luft in ihrer Dichte ändern kann.

Nachdem nun die Materialien den jeweiligen Teilen zugeordnet wurden, kann ich mit den Randbedingungen fortfahren. Hierbei werden Eigenschaften wie zum Beispiel Druck oder Temperatur den jeweiligen Teilen des Aufbaus zugewiesen. Im Gegensatz zu der Materialzuweisung werden hier nicht alle Elemente des Aufbaus genutzt.

Wurden all diese Maßnahmen getroffen, muss benötige ich lediglich ein geeignetes Netz. Dabei wird die Gesamtgeometrie des Aufbaus in kleine Elemente unterteilt. Jeder Eckpunkt dieser Elemente bildet einen Knoten, an deren Ort die Berechnung der Simulation durchgeführt wird. Die Gesamtheit aller Elemente und Knoten bildet das Netz.

Der Einfachheit halber benutzte ich die Funktion des automatisch erstellten Netzes. Wurde eine erste Simulation für einen bestimmten Aufbau durchgeführt empfiehlt es sich, ein adaptiertes Netz zu nutzen. Dadurch werden die Daten der ersten Simulation genutzt, um ein besseres Netz zu erstellen. Dieses Netzt ist notwendig, da die Simulation eine Annahme für die Entwicklung der Werte zwischen den Knoten macht. Daher sind kürzere Abstände für hohe Gradienten besser geeignet. Dieses Netz wird daraufhin genutzt, um die Simulation neu zu starten und somit genauere Ergebnisse zu erhalten.

Zu allerletzt wird noch Strahlungswärmeübertragung zur Simulation hinzugefügt. Dies ist ein nicht zu vernachlässigender Faktor der Simulation, da sie diese der realen Messung ein gutes Stück näher bringt. Die Einstellung der Strahlungswärmeübertragung kann jedoch auch zu Problemen bei der Simulation führen, da das System dadurch instabil werden kann. Da ein symmetrischer Aufbau vorliegt und die abgestrahlte Wärme die Luft um sich herum erhitzt, steigt diese Luft schneller auf, wodurch es zur Instabilität kommt.

5.3 Simulation ohne Kühlkanäle

Um zu überprüfen, ob die Simulation mit dem in AI erstellten Aufbau funktioniert, wird zunächst eine Simulation der Kühlung ohne die Kühlkanäle (also auch ohne den Luftstrom) durchgeführt. Somit trägt lediglich die thermische Strahlung und die natürliche Konvektion der Umgebungsluft bezüglich der Heizstreifen zur Kühlung bei.

5.3.1 Simulationsmodell - ohne Kühlkanäle

Da ich zunächst nur eine Simulation mit natürlicher Konvektion durchführen will, muss ein Aufbau ohne Kühlkanäle in AI erstellt werden. In Abbildung 5.1 ist das genutzte experimentelle Setup zu sehen.



Abb. 5.1: Ausschnitt des Aufbaus ohne Kühlkanäle in AI.

Um den tatsächlich vorhandenen Aufbau zu simulieren, wird noch zusätzlich ein äußeres Luftvolumen benötigt. Da der tatsächliche Aufbau auf einem Tisch steht, ist es erforderlich ein entsprechendes, Tisch montiertes Luftvolumen zu nutzen.



Abb. 5.2: Aufbau samt Luftvolumen ohne Kühlkanäle in AI.

Dieses Volumen in Abbildung 5.2 zeichnet sich dadurch aus, dass sich wesentlich weniger Luft unter dem Aufbau, als über diesem befindet.

5.3.2 Randbedingungen - ohne Kühlkanäle

Zunächst muss ich die Randbedingungen der Simulation festlegen. Hierfür wird an der oberen Fläche des Luftvolumens ein "Wärmeübergangskoeffizient" erstellt. Dieser soll ein Volumen mit Luft einer bestimmten konstanten Wärme darstellen, welches über unserem Luftvolumen sitzt, ohne tatsächlich vom CFD Programm simuliert zu werden.

Weiterhin muss ich die Randbedingung des "Drucks" erstellen, welche auf 0 Pa eingestellt wird. Somit herrscht an der oberen Seite des Luftvolumens ein steter Luftaustausch. Für die Randbedingung des Wärmeübergangskoeffizienten werden 2 $\frac{W}{m^2K}$ als Übergangsko- effizienten genutzt und ein Wert von 19.85 °C als Referenztemperatur. Der Wert für die Temperatur wurde so gewählt, weil damit die stabilste Simulation möglich ist und sie den tatsächlichen Begebenheiten im experimentellen Aufbau gleicht.

Die Erhitzung der Heizstreifen wird mit der Randbedingung der "Gesamtwärmeentwicklung" simuliert. Da die Simulation auf ihre Aussagekraft überprüft werden soll, probiere ich für diesen Parameter verschiedene Werte aus (5 W, 6 W, 7 W). In Tabelle 5.2 sind alle genutzten Randbedingung kurz zusammengefasst. Alle anderen Flächen werden nicht manuell mit Randbedingungen versehen, bekommen diese aber automatisch zugewiesen, wie zum Beispiel die Temperatur der Wände des äußeren Luftvolumens.

Randbedingungen	Genutzte Werte
Wärmeüberkangskoeffizient	$2 \frac{W}{m^2 K}$, 19.85 °C
Druck p	0 Pa
Gesamtwärmeentwicklung P	$(5 \mathrm{W}, 6 \mathrm{W}, 7 \mathrm{W})$

Tabelle 5.2: Genutzte Randbedingungen für Simulation ohne Kühlkanäle.

Um die genutzten Gesamtwärmeentwicklungen besser mit den tatsächlichen Wärmeleistungen der HV-MAPS von mindestens $250 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ vergleichen zu können, sind diese in Tabelle 5.3 als Wärmeentwicklung pro Fläche angegeben.

Gesamtwärmeentwicklung	$5\mathrm{W}$	$6\mathrm{W}$	$7\mathrm{W}$
Wärmeentwicklung pro Fläche	$179 \frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^2}$	$214 \frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^2}$	$250 \frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^2}$

 Tabelle 5.3:
 Wärmeentwicklkungen pro Fläche bei Simulation ohne Kühlkanäle.

Zuletzt wird noch die Strahlungswärmeübertragung zur Simulation hinzugefügt. Hierbei wird die Simulation jedoch sehr instabil. Dies äußert sich dadurch, dass sich das Geschwindigkeitsprofil der Simulation auf eine Seite der Streifen absetzt und es zu einem unerwarteten, unsymmetrischen Verlauf des Profils kommt. Den entsprechenden Verlauf kann man in Abschnitt A.1.1 betrachten. Aus diesem Grund wird beim Hinzufügen der Strahlung nicht auf Konvergenz des Systems gewartet, sondern bereits vor dem Auftreten dieser Instabilität die Simulation abgebrochen.



Abb. 5.3: Konvergenzplot verschiedener Werte aus der Simulation für 5 W ohne Kühlkanäle.

In Abbildung 5.3 erkennt man den Konvergenzplot für eine Gesamtwärmeentwicklung von 5 W ohne fließendes Luftvolumen. Hierbei markiert der erste braune Strich die letzte Iteration ohne implementierte Strahlung. Man kann klar erkennen, dass nach dem Einschalten der Strahlung die Werte für v_x und v_y schwanken (Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung).

Um die Schwankungen zu unterbinden, wird die Simulation, bereits vor der vermeintlichen Konvergenz des Systems, abgebrochen (siehe zweiter brauner Strich). Da bereits nach dem zweiten braunen Strich eine konstante Durchschnittstemperatur und Geschwindigkeit in z-Richtung v_z des Systems erreicht wird und somit die einzigen stark schwankenden Werte die Geschwindigkeiten v_x und v_y sind, welche eine untergeordnete Rolle in den folgenden Betrachtungen spielen, ist dieses Vorgehen gerechtfertigt.

Um die Qualität der Simulationen für die drei unterschiedlichen Gesamtwärmeentwicklungen zu überprüfen, lohnt es sich, das Geschwindigkeitsprofil der aufsteigenden Luft und die Verteilung der Temperatur zu betrachten. Diese Verteilungen sind im Abschnitt 5.3.3 dargestellt.

5.3.3 Geschwindigkeitsprofil der aufsteigenden Luft - ohne Kühlkanäle

Ich erwarte, dass die maximale Geschwindigkeit der Luft über den Heizstreifen liegt, da dort die Luft erhitzt wird und somit aufgrund der geringeren Dichte im Vergleich zur restlichen, kühleren Luft schneller aufsteigt. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die maximale Geschwindigkeit mit zunehmender Gesamtwärmeentwicklung ebenfalls ansteigt.

In Abbildung 5.4 kann man das Verhalten des Luftvolumens hinsichtlich seiner Geschwindigkeit für eine Gesamtwärmeentwicklung von 7 W einsehen. Dabei nimmt das Geschwindigkeitsprofil die erwartete Form an. In Abbildungsteil (c) kann weiterhin beobachtet werden, dass das Geschwindigkeitsprofil kreisförmig um den Mittelpunkt der Heizstreifen gebildet wird. Dabei ist das Maximum der Geschwindigkeit inmitten dieser Kreise.

Des Weiteren kann man in Abbildung 5.4 (c) erkennen, dass es trotz verfrühten Abbrechens der Simulation zu einer leichten asymmetrischen Verschiebung des Geschwindigkeitsprofils kommt. Diese minimale Abweichung stellt jedoch kein Problem für die Auswertung dar.







(b) yz-Ebene für 7W



(c) xy-Ebene für 7W

Abb. 5.4: Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 7 W Gesamtwärmeentwicklung am oberen und unteren Heizstreifen ohne Kühlkanäle.

Die Simulationen für die anderen Gesamtwärmeentwicklungen sind im Abschnitt A.1.1 vorzufinden. In Tabelle 5.4 kann man sehen, dass die maximalen Geschwindigkeiten der aufsteigenden Luft mit steigender angelegter Leistung ansteigen.

	Gesamtwärmeentwicklung		
Parameter	$5 \mathrm{W}$	$6\mathrm{W}$	7 W
Maximale Luft-Geschwindigkeit $v \left[\frac{cm}{s}\right]$	20.1	21.4	22.3

Tabelle 5.4: Maximale Geschwindigkeiten der aufsteigenden Luft aus der Simulation für Ge-
samtwärmeentwicklungen von 5 W, 6 W und 7 W pro Heizstreifen ohne Kühlkanäle.

5.3.4 Temperaturprofil der Heizstreifen - ohne Kühlkanäle

Da uns in dieser Ausarbeitung lediglich die Temperaturen der Heizstreifen interessieren und nicht die Temperaturen der umliegenden Luft, werden wir in diesem Abschnitt auf eben diese Temperaturen eingehen und sämtliche andere Temperaturen ausklammern. Da erwartet wird, dass die Heizstreifen die höchsten Temperaturen des gesamten Systems erreichen, ist dieses Vorgehen berechtigt.

Ich erwarte einen Temperaturanstieg der Heizstreifen für steigende Gesamtwärmeentwicklungen, sodass wir für 7 W die höchste Temperatur erhalten.

In Abbildung 5.5 kann man die verschiedenen Temperaturprofile der Streifen für ihre jeweilige Gesamtwärmeentwicklung einsehen. Dabei wurde der vordere Aluminiumbalken auf unsichtbar gestellt, um eine bessere Sicht auf die Heizstreifen zu erhalten.



(a) Temperaturprofil für 5 W

(b) Temperaturprofil für 6 W



(a) Temperaturprofil für 7 W

Abb. 5.5: Simulation des Temperaturprofils für 5 W, 6 W und 7 W am oberen und unteren Streifen ohne Kühlkanäle.

Den erwarteten Temperaturanstieg mit steigender Gesamtwärmeentwicklung kann man sehr gut erkennen. Des Weiteren sieht man, dass der obere Heizstreifen stärker erhitzt wird, als der untere. Der Grund dafür ist, dass der untere Streifen mit kühlerer Luft gekühlt wird. Diese erwärmt sich beim Kühlen des unteren Heizstreifens und steigt hoch zum oberen Heizstreifen. Dadurch wird der Kühleffekt des oberen Steifens gelindert.

Nun nutze ich eine Funktion in CFD, welche es mir erlaubt den Temperaturverlauf zwischen zwei beliebig gewählten Punkten im Aufbau der Simulation graphisch darzustellen. Dazu lege ich jeweils eine Ebene auf den oberen und unteren Streifen, markiere den Startund Endpunkt und lasse mir den Temperaturverlauf dazwischen ausgeben. Somit kann ich den Temperaturverlauf für die unterschiedlichen Leistungen besser untersuchen.

Dabei erkennt man, dass der Effekt der schlechteren Kühlung des oberen Heizstreifen im Vergleich zum unteren mit steigender Gesamtwärmeentwicklung ansteigt. Die schwankenden Temperaturwerte in der Mitte der Streifen könnten auf die nicht konvergierte Simulation zurückzuführen sein. Da die Schwankungen jedoch nur sehr minimal ausfallen und sie symmetrisch zu beiden Seiten der Heizstreifen verlaufen, spielen diese keine Rolle für die Qualität der Simulation.



Abb. 5.6: Vergleich der Simulation ohne Kühlkanäle für verschiedene angelegte Leistungen. Dabei symbolisiert die durchgezogene Linie jeweils den oberen, die gestrichelte den unteren Streifen.

5 SIMULATION DER KÜHLUNG

Ein einfaches Indiz um die Qualität der Simulation abzuschätzen ist es, sich die Leistungsdifferenz aus hineingesteckter Energie (Gesamtwärmeentwicklung) zu herausgeführter Energie (erwärmte Luft) anzuschauen. Hierzu kann die Differenz unter dem Abschnitt "Energiefluss-Balance Information" in der Zusammenfassung der Simulation im CFD Programm geöffnet werden. Diese gibt an, wieviel Leistung in der Simulation "verloren geht". Allgemein gilt dabei eine Leistungsdifferenz von wenigen Prozentpunkten bezüglich der hineingesteckten Leistung als gutes Simulationsergebnis.

	Gesamtwärmeentwicklung			
Parameter	$5\mathrm{W}$	$6\mathrm{W}$	$7\mathrm{W}$	
Leistungsdifferenz $[W]$	0.220	0.280	0.296	
relative Leistungsdifferenz	2.2%	2.3%	2.1%	

Tabelle 5.5: Auflistung der Leistungsdifferenzen für Gesamtwärmeentwicklungen von $5 \,\mathrm{W}, \, 6 \,\mathrm{W}$ und $7 \,\mathrm{W}$ pro Heizstreifen mit Kühlkanälen.

Alle relativen Leistungsdifferenzen liegen somit bei ca. 2.2%, was ein Indiz für eine gute Simulation darstellt. Möchte man die Simulation noch genauer auf ihre Übereinstimmung mit der Realität überprüfen, so muss man ihre Ergebnisse mit echten Messwerten vergleichen. Dieser Vergleich wird in Abschnitt 6.1 durchgeführt.

5.4 Simulation mit Kühlkanälen

Nachdem die Simulation ohne Kühlkanäle durchgeführt wurde, möchte ich nun den gewünschten experimentellen Aufbau mit diesen Kanälen simulieren. Somit wird nicht nur die natürliche Konvektion betrachtet, sondern auch die durch den Luftstrom entstehende Kühlung.

5.4.1 Simulationsmodell - mit Kühlkanälen

Um die Kühlung durch den Luftstrom zu simulieren, müssen zunächst die Kühlkanäle zu dem vorherigen Aufbau aus Abschnitt 5.3.2 hinzugefügt werden. Einen Querschnitt dieses Aufbaus kann man in Abbildung 5.7 begutachten.



Abb. 5.7: Ausschnitt des Aufbaus mit Kühlkanälen in AI.

Auch in dieser Simulation benötigen wir wieder ein Luftvolumen, welches dem tatsächlichen Aufbau auf dem Tisch ähnelt. Dieses Tischvolumen in Abbildung 5.8 dargestellt.



Abb. 5.8: Aufbau samt Luftvolumen mit Kühlkanälen in AI.

Der wichtige Unterschied zu dem Luftvolumen, welches für die Simulation ohne die Kanäle genutzt wurde ist, dass es nicht mehr den gesamten Versuchsaufbau umschließt. Die beiden Schläuche reichen jeweils ein kleines Stück aus diesem Volumen heraus. Der Grund dafür ist, dass ich zwei getrennte Luftvolumen erstellen möchte. Andernfalls würden die Schläuche Luft in das äußere Luftvolumen pumpen, wodurch Luftströme innerhalb der Luft entstünden, welche im realen Aufbau nicht auftreten.

5.4.2 Randbedingungen - mit Kühlkanälen

Bei den Randbedingungen mit Kühlkanälen übernehme ich nahezu alle Randbedingungen der Simulation ohne diese Kanäle. Lediglich die Werte Gesamtwärmeentwicklungen werden geändert, da wir von einer besseren Kühlung ausgehen und somit höhere Werte gewählt werden können, um die Gesamtkühlung zu untersuchen.

Da ich nun auch zusätzlich Luft durch die Kühlkanäle blasen möchte, müssen auf der Einlassseite des Schlauches die Randbedingung der "Temperatur" und des "Volumenflusses" definiert werden. Hierfür wird die Temperatur erneut auf 19.85 °C gestellt, während ich für den Volumenfluss mehrere Werte testen möchte. Wie bereits in Abschnitt 4.4 erläutert wurde, ist die maximale Geschwindigkeit für den laminaren Fluss in etwa 0.22 $\frac{1}{s}$. Um den genauen Einfluss dieses Parameters zu begutachten, wähle ich hierfür drei weitere Werte (0.12 $\frac{1}{s}$, 0.17 $\frac{1}{s}$, 0.27 $\frac{1}{s}$). Die Temperaturen dieser drei weiteren Werte können später miteinander verglichen werden. Auf der Auslassseite muss die Randbedingung des "Drucks" erstellt werden, die genau wie bei der oberen Seite des äußeren Luftvolumens auf 0 Pa gesetzt werden muss. Alle genutzten Randbedingungen sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Randbedingungen	Genutzte Werte
Wärmeüberkangskoeffizient	$2 \frac{W}{m^2 K}$, 19.85 °C
HV-MAPS	0 Pa
Gesamtwärmeentwicklung P	$(6 \mathrm{W}, 8 \mathrm{W}, 10 \mathrm{W}, 12 \mathrm{W})$
Luftfluss Eingang	19.85 °C, $(0.12 \frac{1}{s}, 0.17 \frac{1}{s}, 0.27 \frac{1}{s})$
Luftfluss Ausgang	0 Pa

Tabelle 5.6: Genutzte Randbedingungen für Simulation mit Kühlkanälen.

Um die genutzten Gesamtwärmeentwicklungen besser mit den tatsächlichen Wärmeleistungen der HV-MAPS von mindestens $250 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ vergleichen zu können, sind diese in Tabelle 5.7 als Wärmeentwicklung pro Fläche angegeben.

Gesamtwärmeentwicklung	$6\mathrm{W}$	8 W	$10\mathrm{W}$	$12\mathrm{W}$
Wärmeentwicklung pro Fläche	$214 \frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^2}$	$286 \frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^2}$	$357 \frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^2}$	$429 \frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^2}$

Tabelle 5.7: Wärmeentwicklkungen pro Fläche bei Simulation mit Kühlkanälen.

In Abbildung 5.9 sieht man den Konvergenzplot, nachdem ich die Strahlung eingeschaltet habe. Der braune Streifen steht für den Moment des Einschaltens der Strahlung. Da auch danach alle Werte konvergieren, muss ich die Simulation nicht manuell abbrechen.



Abb. 5.9: Konvergenzplot verschiedener Werte aus der Simulation für 8 W und $0.22 \frac{1}{s}$ mit Kühlkanälen.

5.4.3 Geschwindigkeitsprofil der aufsteigenden Luft - mit Kühlkanälen

Nun betrachte ich die Geschwindigkeitsprofile des äußeren Luftvolumens. Hierbei erwarte ich einen ähnlichen Verlauf, wie für die Simulation ohne Kühlkanäle aus Abschnitt 5.3.3. Allerdings sollte sich das Geschwindigkeitsprofil etwas zu dem Schlauch verschieben, aus dem die Luft nach dem Kühlen wieder herausströmt. Da die Luft beim Kühlen selbst an Temperatur gewinnt, erhitzt sie wiederum den kühleren Teil der PCBs und des herausführenden Schlauches.

In Abbildung 5.10 kann man das Geschwindigkeitsprofil der aufsteigenden Luft für die Simulation mit Kühlkanälen für eine Gesamtwärmeentwicklung von 8 W sehen. Dabei wird die Vermutung bestätigt, dass sich das Geschwindigkeitsprofil leicht zum herausführenden Schlauch verzogen hat. Außerdem erkennt man, dass die maximale Geschwindigkeit im Vergleich zur Simulation ohne Kühlkanäle stark angestiegen ist. Dies kann man damit erklären, dass sich das Geschwindigkeitsprofil zentrierter gebildet hat. Da ähnlich viel Luft ausgetauscht wird, wie bei der Simulation ohne Kühlkanäle, steigt dadurch auch die Geschwindigkeit der aufsteigenden Luft.

Die Geschwindigkeitsprofile für die anderen Gesamtwärmeentwicklungen sind in Abschnitt A.1.2 vorzufinden. Die maximalen Geschwindigkeiten können in Tabelle 5.8 nachgelesen werden. Es werden dabei lediglich die Geschwindigkeitsprofile für den Gasfluss von $0.22 \frac{l}{s}$ betrachtet, da ich hierbei lediglich überprüfen möchte, ob die simulierten Profile sinnvoll sind.



(a) yz-Ebene für 8 W

(b) xz-Ebene für 8W



(c) xy-Ebene für 8W

Abb. 5.10: Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 8 W Gesamtwärmeentwicklung am oberen und unteren Heizstreifen mit Kühlkanälen.

Da sich die Profile für die anderen Gasflüsse komplett analog dazu verhalten, kann man sie an dieser Stelle vernachlässigen.

	Gesamtwärmeentwicklung			
Parameter	$6\mathrm{W}$	8 W	$10\mathrm{W}$	$12\mathrm{W}$
Maximale Luft-Geschwindigkeit $v \left[\frac{cm}{s}\right]$	30.3	32.2	34.0	38.1

Tabelle 5.8: Maximale Geschwindigkeiten der aufsteigenden Luft aus der Simulation für Gesamtwärmeentwicklungen von 6 W, 8 W, 10 W und 12 W pro Heizstreifen mit Kühlkanälen.

Man kann erkennen, dass die maximale Luft-Geschwindigkeit des äußeren Luftvolumens erneut mit steigender Temperatur ansteigt. Auch hier sieht man deutlich, dass die maximale Luft-Geschwindigkeit stark im Vergleich zur Simulation ohne Kühlkanäle angestiegen ist. Dies kann man damit erklären, dass die warme Stelle nun eher am Ende der Heizstreifen liegt und somit nicht mehr gleichmäßig über den gesamten Streifen verteilt ist.

5.4.4 Temperaturprofil der Heizstreifen - mit Kühlkanälen

Nun kann man die Temperatur der Heizstreifen für die Messung mit Kühlkanälen betrachten. Analog zur Simulation ohne Kühlkanäle erwarte ich auch hier, dass die Temperatur der Heizstreifen mit steigender Gesamtwärmeentwicklung ansteigt. Außerdem erwarte ich, dass die Temperatur der Streifen mit größerem Abstand vom Gasfluss-Eingang steigt, da die Temperatur, der durch die Kühlkanäle fließenden Luft, durch die Heizstreifen erhitzt wird.

In der Qualitativen Betrachtung der Temperaturen betrachte ich lediglich den Luftfluss von $0.22 \frac{l}{s}$. In Abbildung 5.11 kann man diese Temperaturprofile einsehen. Dabei wird sowohl die Vermutung, dass der Streifen bei größerer Entfernung vom Gas-Eingang immer


heißer wird, als auch die Vermutung, dass die Temperatur mit steigender Gesamtwärmeentwicklung ansteigt, bestätigt.

88.1





Temperatur T [°C]





(d) Temperaturprofil für 12 W.

Abb. 5.11: Simulation des Temperturprofils für 6 W, 8 W, 10 W und 12 W am oberen und unteren Streifen ohne Kühlkanäle mit einem Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$.

Im Vergleich zu den Temperaturprofilen ohne die Kühlkanäle fällt es auf, dass der untere Streifen kaum kühler ist als der obere. Dies lässt sich damit erklären, dass die Temperaturen durch den Luftfluss eher im Gleichgewicht liegen.

Im Gegensatz zur Simulation ohne Kühlkanäle, ändert sich die Temperatur entlang der Heizstreifen sehr deutlich. Um diesen Verlauf der Temperaturen der Heizstreifen genauer zu betrachten, benutze ich eine Funktion in CFD, mit welcher ich eine Ebene jeweils parallel zu den beiden Heizstreifen lege. Dann markiere ich zwei Punkte an beiden Enden des jeweiligen Streifens und lasse mir 100 Temperaturdaten zwischen diesen festgelegten Punkten darstellen. Somit erhalte ich den Verlauf der Temperatur entlang der Heizstreifen aus Abbildung 5.12.

Man kann dabei sehr gut erkennen, dass die Temperatur zu beiden Seiten der Heizstreifen



Abb. 5.12: Vergleiche der simulierten Temperaturen der Heizstreifen mit Kühlkanälen für verschiedene Gesamtwärmeentwicklungen von 6 W, 8 W, 10 W und 12 W und Luftflüsse. Dabei ist der obere Streifen stets ungebrochen, der untere Streifen gestrichelt dargestellt. Die Länge der Streifen ist vom Luftausgang aus gemessen.

abfällt. Dabei ist die Temperatur am Lufteingang wesentlich niedriger, als die am Luftausgang, was meiner Vermutung von oben entspricht. Ein weiterer auffälliger Punkt ist, dass sich die Temperaturen aller vier Luftflüsse an den jeweiligen Enden der Streifen annähern. Auch das ist nicht weiter verwunderlich, da diese Teile am weitesten von den Heizstreifen entfernt liegen. Somit werden diese Stellen kaum beheizt, können dafür aber sehr gut gekühlt werden.

Im Gegensatz zur Simulation ohne Kühlkanäle, kann ich die Qualität der Simulation hierbei nicht mittels des CFD Programms betrachten. Dies liegt daran, dass ich nun zwei unterschiedliche Luftzufuhren zu dem Aufbau habe. Zum einen wird die Luft an der oberen Fläche des Luftvolumens ausgetauscht, zum anderen fließt durchgängig ein Luftstrom durch den Aufbau. Da ich die Leistungdifferenz in CFD lediglich für den Luftaustausch am äußeren Luftvolumen einsehen kann, kann ich die Qualität dieser Simulation nur im Vergleich mit den gemessenen Daten abgeschätzt werden. Dies geschieht in Abschnitt 6.2.



Abb. 5.13: Vergleich der simulierten Temperaturen mit und ohne Luftfluss für eine Gesamtwärmeentwicklung von 6 W. Dabei ist der obere Streifen stets ungebrochen, der untere Streifen gestrichelt dargestellt. Die Länge der Streifen ist vom Luftausgang aus gemessen.

Vergleiche ich nun die Temperaturen aus den Simulationen mit und ohne Luftfluss, so erhalte ich Abbildung 5.13. Da ich beide Simulationen für eine Leistung von 6 W durchgeführt habe, kann man diese Ergebnisse miteinander vergleichen. Hierbei kann man sehr gut erkennen wie gut die Kühlung in der Simulation funktioniert. Wie erwartet ist der größte Temperaturunterschied von etwa 20 °C nach ungefähr 5 cm erreicht, da der Heizstreifen dort bereits stark heizt und der Luftfluss noch sehr kühl ist. Da die Temperatur des Luftflusses jedoch während des Kühlens stetig ansteigt, kühlt der Fluss immer schlechter und die Temperaturen der Simulation mit und ohne Luftfluss nähern sich immer weiter an. Dabei fällt besonders auf, dass das Temperaturmaximum des unteren Streifens für kleine Luftflüsse größer ist, als das ohne Luftfluss. Ohne den Luftfluss würden sich die Heizstreifen an dieser Stelle bereits abkühlen, da sie sich ihrem Rand nähern. Da die Luft in der Simulation mit dem Luftfluss bereits so stark erhitzt wurde, erhitzt sie den Heizstreifen an dieser Stelle leicht.

Man erkennt somit sehr gut, dass die Heizstreifen durch den hinzugefügten Luftfluss sehr gut gekühlt werden, auch wenn sie sich zum Ende des Heizstreifens wieder der Temperatur ohne den Luftfluss annähern. Um die Qualität der Simulationen zu überprüfen, werden die Simulationen in Abschnitt 6 mit den Ergebnissen der Messungen verglichen.

6 Messungen

6.1 Messung ohne Kühlkanäle

Bevor die Messung mit Kühlkanälen durchgeführt wird, möchte ich ein paar Messungen ohne diese Kanäle ausarbeiten. Damit versuche ich die Ergebnisse aus der Simulation zu verifizieren und daraus Schlüsse für deren Qualität zu ziehen. Es wird also ein Aufbau ohne Kanäle und somit auch ohne einen Luftzufluss genutzt.

Analog zu den Simulationen nutze ich Spannungen an den Heizstreifen, damit diese eine Gesamtwärme von 5 W, 6 W und 7 W entwickeln. Die Heizstreifen bestehen jeweils aus zwei separaten Heizschleifen. Diese befinden sich jeweils auf einer Hälfte des Streifens, sodass pro Streifen zwei Spannungen angelegt werden. Die Werte der Spannungen und der somit entstehenden Leistung pro halben Streifen kann man in Tabelle 6.1 begutachten.

Parameter	Wert		
Leistung P $[W]$	(2.50 ± 0.05)	(3.00 ± 0.05)	(3.50 ± 0.05)
Spannung U $[V]$	(2.030 ± 0.001)	(2.270 ± 0.001)	(2.470 ± 0.001)

Tabelle 6.1: Angelegte Spannungen und Leistungen pro halbe Streifen, um Gesamtleistungen von
 $5\,\mathrm{W},\,6\,\mathrm{W}$ und $7\,\mathrm{W}$ pro Heizstreifen zu erlangen.

Werden diese Spannungen angelegt, so erzeugt jeder Streifen insgesamt die selbe Leistung, wie sie in der Simulation auch genutzt werden. Somit kann man die Messung gut mit der Simulation vergleichen.

Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert wird ein Arduino benutzt, um die Temperatursensoren auf den Heizstreifen auszulesen. Die Messwerte werden jeweils über einen Zeitintervall von zwei Stunden aufgenommen, um danach genug Daten für den Vergleich mit den Simulationsergebnissen zu erhalten.



Abb. 6.1: Zeitliche Temperaturschwankungen für eine angelegte Leistung von 7 W ohne Kühlkanäle. T1 bis T4 stehen dabei für die Temperatursensoren des oberen und T5 bis T8 für die des unteren Streifen vom Lufteinlass aus nummeriert.

In Abbildung 6.1 ist beispielhaft der Temperaturverlauf der vier Sensoren pro Streifen für eine angelegte Leistung von 7 W gegen die Zeit aufgetragen. Hierbei kann man exemplarisch gut erkennen, dass die Werte der Temperatur über die gesamte Messdauer sehr stark schwanken. Kühlende Einflüsse, wie zum Beispiel etwaige Luftzüge tragen während der gesamten Messung zu einer ungewollten Kühlung der Streifen bei. Des weiteren schwanken auch die Werte für die angelegte Stromstärke des Spannungsgeräts durchgängig, sodass an jedem Streifen eine leicht variierende Leistung anliegt. Aufgrund dieser starken Schwankungen wird für jeden Messwert ein systematischer Fehler von 2 °C angesetzt. Zusätzlich besitzen auch die Temperatursensoren einen systematischen Fehler von 0.5 °C [17]. Die zeitlichen Verläufe der anderen Messungen verlaufen dabei analog zu diesem Beispiel.

Um die gemessenen Daten zu analysieren, wird sowohl der Mittelwert als auch der Maximalwert an jedem Temperatursensor bestimmt. Der Mittelwert samt Fehler wird dabei mit Hilfe der Formel (3.9) bestimmt. Da über ein Zeitintervall von 2 h gemessen wurde, ist davon auszugehen, dass der statistische Fehler des Mittelwertes vernachlässigbar klein sein wird. Die erhaltenen Werte für die gemessenen mittleren und maximalen Temperaturen sind in Abschnitt A.2.1 Tabelle A.2.1 aufgelistet.



Abb. 6.2: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen aus der Simulation für 7 W ohne Kühlkanäle. Die Temperaturen wurden an den entsprechenden Stellen der Temperatursensoren gemessen.

In den Graphen 6.2 kann man den Vergleich zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen begutachten. Hierbei fällt auf, dass sich die Werte der Messung für den unteren und oberen Streifen kaum in ihrer Temperatur unterscheiden. Den Temperaturunterschied zwischen dem oberen und unteren Streifen, der sich aus der Simulation ergibt, von etwa 10 °C können die gemessenen Werte nicht verifizieren. Da sich der untere Streifen näher am Tisch befindet liegt die Vermutung nahe, dass es aufgrund eben dieses Tisches zu einer zu stark ausfallenden Erhitzung des unteren Streifen kommt. Während in der Simulation der Tisch als adiabatische Fläche betrachtet wird, nimmt der Tisch im realen Aufbau Wärme auf und erwärmt sich dadurch etwas.

Außerdem fällt auf, dass die Temperaturen des unteren simulierten Streifens mehr den gemittelten Messwerten ähneln. Die maximalen gemessenen Werte hingegen liegen genau

6 MESSUNGEN

zwischen den Simulationen des oberen und unteren Streifens. Des Weiteren misst der dritte Temperatursensor des oberen Streifens immer eine deutlich höhere Temperatur, als alle anderen Sensoren. Dies lässt darauf schließen, das ein systematischer Fehler an diesem Sensor vorliegt, von dem die anderen Sensoren nicht betroffen sind.

Die Graphen für die anderen genutzten Leistungen sind in Abschnitt A.1.3 vorzufinden. Auch hierbei wird nochmals bestätigt, dass sich die gemessenen Temperaturen des oberen und unteren Streifen kaum unterscheiden.

Ein Grund für den im Verhältnis zur Simulation heißeren unteren Streifen wäre, dass unterschiedliche Mengen Wärmeleitpaste an den verschiedenen Temperatursensoren genutzt werden oder die Widerstände der Heizstreifen unterschiedlich sind. Aus diesem Grund werden weitere Messungen durchgeführt, mit denen ich ohne die Temperatursensoren die Durchschnittstemperatur der vier halben Heizstreifen bestimmen kann. Hierzu lege ich an allen vier halben Heizstreifen verschiedene Spannungen an, welche die halben Streifen jeweils mit einer Leistung in einem Intervall von 0 W bis 3.5 W versorgen sollen. Da sich die beider Heizstreifen oben und unten jeweils addiert, kommt der gesamte Streifen auf die, in der vorherigen Messung, genutzten 7 W. Daraufhin werden die entsprechenden Stromstärken am Spannungsgerät abgelesen (siehe Abschnitt A.2.1 Tabelle A.2.1) und daraus mittels des Ohmschen Gesetzes aus Formel (3.8) der Widerstand der halben Heizstreifen bestimmt.



Abb. 6.3: Verhältnis der berechneten Widerstände der halben Streifen zu verschiedenen angelegten Leistungen.

In Abbildung 6.3 kann man das Ergebnis der Widerstandsbestimmung auf diese Weise begutachten. Hierbei fällt auf, dass ein linearer Zusammenhang besteht, der für alle 4 halben Streifen im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmt. Mittels der bestimmten Widerstände und Formel (3.6) kann ich nun die durchschnittlichen Temperaturunterschiede pro halbe Streifen berechnen. Ich erhalte damit die Temperaturen in Abbildung 6.4. Auch in dieser Abbildung ist klar zu erkennen, dass alle vier halbe Streifen im Rahmen der Messgenauigkeit in ihrer Durchschnittstemperatur übereinstimmen. Somit können die Abweichungen der Temperatur des unteren Streifens der Messung im Vergleich zur Simulation aufgrund von unterschiedlichen Streifen (wie zum Beispiel Menge an Wärmeleitpaste) ausgeschlossen werden.



Abb. 6.4: Verhältnis der berechneten Durchschnittstemperaturen der halben Streifen zu verschiedenen angelegten Leistungen.

Alles in allem kann die Simulation ohne die Kühlkanäle im Vergleich zu den gemessenen Werten jedoch als gelungen angesehen werden, da die durchschnittlichen gemessenen Temperaturen sehr gut mit den Temperaturen des unteren Streifens der Simulation übereinstimmt und die maximalen Temperaturen zwischen den beiden Streifen aus der Simulation liegen. Da es sich bei Simulationen immer um idealisierte Bedingungen handelt, sind kleinere Abweichungen durchaus zu erwarten.

6.2 Messung mit Kühlkanälen

Bei der Messung mit Kühlkanälen werden im Vergleich zur Simulation nicht alle Leistungen gemessen, damit die Streifen nicht überhitzen. Aus diesem Grund lege ich nur Leistungen an, bei denen die Temperatur nicht über 80 °C steigt. Die genutzten Werte für die entsprechenden Leistungen, Spannungen und Luftflüsse sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Parameter	Wert für einen Luftfluss von $Q = 0.00 \frac{l}{s}$		
Leistung P $[W]$	(3.00 ± 0.05)	(4.00 ± 0.05)	(5.00 ± 0.05)
Spannung U $[V]$	(2.320 ± 0.001)	(2.720 ± 0.001)	-

Parameter	Wert für einen Luftfluss von $Q = 0.12 \frac{l}{s}$		
Leistung P $[W]$	(3.00 ± 0.05)	(4.00 ± 0.05)	(5.00 ± 0.05)
Spannung U $[V]$	(2.300 ± 0.001)	(2.660 ± 0.001)	-

Parameter	Wert für einen Luftfluss von Q = 0.17 $\frac{l}{s}$		
Leistung P $[W]$	(3.00 ± 0.05)	(4.00 ± 0.05)	(5.00 ± 0.05)
Spannung U $[V]$	(2.660 ± 0.001)	(2.280 ± 0.001)	-

Parameter	Wert für einen Luftfluss von Q = 0.22 $\frac{l}{s}$		
Leistung P $[W]$	(3.00 ± 0.05)	(4.00 ± 0.05)	(5.00 ± 0.05)
Spannung U $[V]$	(2.280 ± 0.001)	(2.620 ± 0.001)	(3.01 ± 0.001)

Parameter	Wert für einen Luftfluss von Q = 0.27 $\frac{l}{s}$		
Leistung P $[W]$	(3.00 ± 0.05)	(4.00 ± 0.05)	(5.00 ± 0.05)
Spannung U $[V]$	(2.270 ± 0.001)	(2.620 ± 0.001)	(3.00 ± 0.001)

Tabelle 6.2: Angelegte Spannungen und Leistung pro halbe Streifen mit jeweiligen angelegten Luftflüssen Q, um Gesamtleistungen von 6 W, 8 W und 10 W pro Heizstreifen zu erlangen.

Dabei kann man sehen, dass ich die angelegte Spannung für die selben Leistungen mit wachsenden Luftflüssen niedriger eingestellt habe. Dies liegt daran, dass die Temperaturen der Streifen mit höheren Luftflüssen niedriger sind und somit auch der Widerstand sinkt. Ich muss also die Spannung ebenfalls niedriger einstellen, um die selbe Leistung pro halben Streifen zu erhalten.

Des Weiteren sieht man, dass ich die Messungen mit insgesamt 10 W pro gesamten Streifen erst ab einem Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$ gestartet habe und Messungen mit insgesamt 12 W vollkommen ausgelassen habe. Dies liegt an der zu hohen Temperatur der Streifen, die bei diesen Einstellungen entstehen würde. Diese würden den Versuchsaufbau schädigen.

Betrachtet man nun den zeitlichen Verlauf der Messungen aus Abbildung 6.5 wird schnell klar, dass die gemessenen Temperaturen wesentlich weniger schwanken, als bei der Messung ohne die Kühlkanäle, weshalb ich die Messung auch nur 10 min laufen lasse. Auch hierbei wird ein Fehler für die Sensoren von 0.5 °C und der selbe systematische Fehler der Messung wie bei der Simulation ohne Kühlkanäle von 2 °C angenommen. Man kann davon ausgehen, dass sich die Fehler im Vergleich zu dieser Simulation nicht geändert haben, da der Aufbau des Experiments bis auf die hinzugefügten Kühlkanäle nicht geändert wurde.

Außerdem ist auffällig, dass der Temperatursensor T4 kühler ist als Sensor T3. Ich habe dabei das Gegenteil erwartet, da Sensor T3 näher am Lufteinlass liegt und somit besser gekühlt werden sollte. Bereits in Abschnitt 6.1 habe ich vermutet, dass dieser Sensor T3 einen eigenen systematischen Fehler besitzt, welcher durchweg höhere Temperaturen liefert, als alle anderen Sensoren. Dies erklärt auch das Verhalten in Abbildung 6.5.



Abb. 6.5: Zeitliche Temperaturschwankungen für eine angelegte Leistung von 8 W und einen Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$. T1 bis T4 stehen dabei für die Temperatursensoren des oberen und T5 bis T8 für die des unteren Streifen vom Lufteinlass aus nummeriert.

Auch der zeitliche Verlauf der Temperaturen direkt nach dem Einschalten des Luftflusses ist interessant zu betrachten. Hierzu werden die Leistungen von 6 W und 8 W ohne Luftfluss eingeschaltet und darauf gewartet, dass sich die Temperaturen stabilisieren. Danach wird die Messung der Temperaturen gleichzeitig mit dem Einschalten des Luftflusses von $0.22 \frac{1}{s}$ betrachtet. Ich erwarte hierbei einen schnellen Temperaturabfall.



Abb. 6.6: Zeitlicher Temperaturverlauf für eine angelegte Leistung von 8 W und einen gerade erst hinzugefügten Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$. T1 bis T4 stehen dabei für die Temperatursensoren des oberen und T5 bis T8 für die des unteren Streifen vom Lufteinlass aus nummeriert.

6 MESSUNGEN

In Abbildung 6.6 kann man beispielhaft den Kühlbeginn der Heizstreifen für eine angelegte Leistung von 8 W sehen. Dabei entsteht der erwartete Verlauf, bei welchem die Temperaturen zunächst sinken und daraufhin einen konstanten Wert annehmen. Vergleicht man diese Messung nun mit dem zeitlichen Verlauf der Messung, bei der die Temperaturen an den Sensoren bereits eingependelt sind, erkennt man, dass sich die Temperaturen der einzelnen Sensoren noch ändern und weiter sinken. Dieser Vorgang geht jedoch langsamer voran, da sich dabei der untere und obere Streifen gegenseitig beeinflussen. Außerdem besitzten auch die Sensoren eine Wärmekapazität, die im Vergleich zu der des Streifens nicht zu vernachlässigen ist. Man muss also auch den Sensor mitkühlen.

Des Weiteren ist auch in dieser Messung auffällig, das der Sensor T3 am oberen Streifen deutlich am heißesten ist, was zu meiner obigen Vermutung passt, dass dieser Sensor einen eigenen systematischen Fehler besitzt. Auch beim unteren Streifen tritt der Effekt auf, dass der am weitesten entfernte Sensor nicht der heißeste ist, aber wie man in Abbildung 6.5 gesehen hat, ändert sich dies nachdem sich die Temperaturen stabilisiert haben.

Um nun die Auswirkungen der verschiedenen angelegten Luftflüsse genau zu untersuchen, trage ich jeweils die Temperaturen aller Sensoren des oberen und unteren Streifen gegen alle genutzten Luftflüsse auf.



Abb. 6.7: Vergleich der maximalen Temperaturen T_{max} und der durchschnittlichen Temperaturen \overline{T} für verschiedene Flüsse Q für eine angelegte Leistung von 8 W.

Da man den Luftfluss nicht exakt am Rotameter festlegen und ablesen kann, sind in Abbildung 6.7 Fehlerbalken für den Fluss abgebildet. Da die Skala des Rotameters in $\frac{l}{h}$ angegeben ist, kann ich die Werte dort mit einer Genauigkeit von $\pm 10\frac{l}{h}$ ablesen.

In dieser Abbildung sieht man den bereits erwarteten Verlauf der Temperaturen, welche mit steigenden Flüssen immer niedriger werden. Auch die Tatsache, dass der am nächsten an den Lufteingang gelegene Sensor am stärksten gekühlt wird, war zu erwarten. Erneut fällt jedoch für den oberen Streifen auf, dass der dritte Sensor T3 höhere Temperaturen annimmt, als man erwarten sollte. Beim unteren Streifen ist nur bei der Messung mit dem turbulenten Fluss von $0.27 \frac{1}{s}$ eine unerwartete Anordnung der gemessenen Temperaturen der Sensoren zu sehen. Dies fällt jedoch nicht schwerer ins Gewicht, da die Temperaturen dort im Rahmen der Messgenauigkeit nahe aneinander liegen.

Auffällig ist außerdem, dass bei einem Luftfluss von $0.27 \frac{1}{s}$ die Temperatur des zweiten Sensors T2 leicht ansteigt im Vergleich zur Messung mit $0.22 \frac{1}{s}$. Dies kann man mit der entstehenden turbulenten Strömung erklären. Dabei können sich Luftwirbel bilden, welche zu einer unausgeglichenen Kühlung des Streifens führen können. Befindet sich solch ein Wirbel in der Nähe des zweiten Sensors, so wird dieser schlechter gekühlt. Das könnte auch der Grund dafür sein, dass die Kühlung der Streifen für den Fluss von $0.27 \frac{1}{s}$ im Vergleich zu den anderen Flüssen abgeschwächt wird und die Temperaturen ab dort schwächer sinkt. Die Graphik für die Messung mit einer Leistung von 6 W ist in Abschnitt A.1.4 dargestellt.



Abb. 6.8: Vergleich der maximalen Temperaturen T_{max} und der durchschnittlichen Temperaturen \overline{T} für verschiedene Leistungen P für einen Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$.

Der Vollständigkeit halber ist in Abbildung 6.8 der Verlauf der Temperaturen für verschiedene angelegte Leistungen mit einem konstanten Luftfluss von $0.22 \frac{l}{s}$ zu sehen. Hierbei wird der erwartete Verlauf steigender Temperaturen für steigende angelegte Leistungen bestätigt. Analog zu Abbildung 6.7 sieht man, dass der Temperatursensor T3 höhere Temperaturen als alle anderen Sensoren annimmt. Des Weiteren fällt dabei auf, dass der Temperaturunterschied des nächsten Sensors zum Lufteingang im Vergleich zu den darauf folgenden Sensoren für höhere Leistungen ansteigt. Dieses Verhalten kommt daher, dass die Luft bereits am ersten Sensor so stark erhitzt wird, dass sie die hinteren Sensoren schlechter kühlen kann. Die Graphik für die Messung mit einem Luftfluss von $0.27 \frac{l}{s}$ ist in Abschnitt A.1.4 vorzufinden.

Nun möchte ich die Temperaturen der Messungen mit und ohne genutzten Luftfluss für eine angelegte Leistung von 6 W vergleichen. Dieser Vergleich ist in Abbildung 6.9 dargestellt.



Abb. 6.9: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit und ohne Luftfluss für eine Gesamtwärmeentwicklung von 6 W.

Dabei erkennt man, dass sich ein analoger Verlauf zum Vergleich der Temperaturen mit und ohne Luftfluss aus den Simulationen darstellt. Auch in diesem Vergleich ist der Temperaturunterschied zwischen der Messungen mit und der Messung ohne Luftstrom anfangs am größten und am Ende am geringsten.

Um nun die gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen aus der Simulation zu vergleichen, tragen wir die jeweiligen Ergebnisse der Simulation und der Messung im selben Graphen auf. Das Resultat für die Messung mit verschiedenen Luftflüssen und einer angelegten Leistung von 8 W ist in Abbildung 6.10 zu sehen.



(a) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 8 W und einem Luftfluss von $0.12 \frac{l}{s}$.



(b) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 8 W und einem Luftfluss von $0.17 \frac{1}{s}$.



(c) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 8 W und einem Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$.



(d) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 8 W und einem Luftfluss von $0.27 \frac{1}{s}$.

Abb. 6.10: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen aus der Simulation für 8 W und verschiedene Luftflüsse. Die Temperaturen wurden an den entsprechenden Stellen der Temperatursensoren gemessen.

In den Graphen erkennt man deutlich, dass der Unterschied der gemessenen Temperaturen im Vergleich zu den simulierten Werten für steigende Luftflüsse ebenfalls ansteigt. Vor allem der zweite und dritte Temperatursensor liefert dabei immer höher wachsenden Werte. Der Grund für diesen Temperaturunterschied könnte sein, dass die Kühlkanäle nicht perfekt luftdicht an die Heizstreifen angebracht sind. Somit entweicht während der Messung Luft, die zur Kühlung der Streifen fehlt.

Der vierte Sensor hingegen liefert während allen Messungen niedrigere Werte als die Simulationen. Das kommt daher, dass dieser Sensor am weitesten vom Lufteinlass entfernt ist, wodurch er eher durch natürliche Konvektion gekühlt wird. In Abschnitt 6.1 habe ich bereits festgestellt, dass die simulierten Temperaturen für die natürliche Konvektion stets leicht über den gemessenen Werten liegen.

Des Weiteren kann man erneut beobachten, dass es nur einen geringen Unterschied der gemessenen Temperaturen für den oberen und unteren Streifen gibt. Im Vergleich zum Temperaturunterschied der beiden Streifen für die simulierten Werte ist der gemessene Unterschied kaum zu erkennen. Dieses Phänomen wurde bereits in Abschnitt 6.1 festgestellt und analysiert.

Unter Abschnitt A.1.4 kann man noch die jeweiligen Graphen für die Messung mit 6 W und 10 W betrachten. Während die Ergebnisse der 6 W Messung analog zu denen der 8 W Messung sind, werden die Unterschiede zwischen Messung und Temperatur bei dem Vergleich der Werte für 10 W größer. Dies liegt ganz einfach daran, dass die Temperatur durch die höhere angelegte Leistung höher ausfällt und somit auch die Unterschiede aufgrund der nicht ganz luftundurchlässigen Befestigung der Kühlkanäle stärker ins Gewicht fällt.

6.3 Messung der Wärmeausdehnung von Kapton

Erhitzt man ein Material, so dehnt es sich in der Regel aus. Da die Temperatur des Kaptonstreifens für verschiedene angelegte Leistungen in den Messungen variiert, dehnt auch dieser sich währenddessen aus und zieht sich zusammen. Um zu verhindern, dass der Streifen durchhängt wurden an beiden Seiten des Streifens Federn angebracht, sodass der Streifen seine Länge ohne durchzuhängen variieren kann.

Nun soll überprüft werden ob dieser Aufbau funktioniert, indem man aus der Ausdehnung der Streifen für unterschiedliche Temperaturen den Wert des Wärmeausdehnungskoeffizienten bestimmt und mit dem Literaturwert aus Abschnitt 3.4 vergleicht. Um die Ausdehnung der Streifen zu bestimmen, wird der Versuchsaufbau samt Kühlkanälen modifiziert, indem man ein Gestell an die Streifen anlegt, welches diese während der Messung fixiert und an dem eine Kamera befestigt ist.



Abb. 6.11: Aufbau der Wärmeausdehnungs-Messung mit Kamera-Setup. Dabei wird die Spannvorrichtung der Heizstreifen in einer Halterung fixiert und von einer Kamera, die an einem Stativ befestigt ist, fotografiert.

Da man die Kamera nutzen möchte, um Bilder für verschiedene Temperaturen des oberen Streifen zu machen, die Pixel zu zählen und daraus die Ausdehnung zu errechnen, wird diese so ausgerichtet, sodass sie den Streifen von oben fotografiert. Ein Millimeterlineal soll dabei den Zusammenhang von den Pixeln zu der Länge der Ausdehnung dienen. Um ein genaueres Bild zu erhalten, wird die Kamera nur auf ein Ende des oberen Streifens gerichtet. Um dennoch die gesamte Längenänderung des Streifens zu beobachten, wird das andere Ende des Streifens fixiert, sodass dieser nicht von der Feder gestreckt werden kann.

Für die Messung wird die Kamera Canon EOS 400D [25] mit einer 100 mm Macro-Linse genutzt. Da ich erwarte, dass die Ausdehnung der Streifen sehr gering ausfällt, befestige ich die Kamera so so nahe wie möglich über dem Streifen, ohne dass das Bild der Kamera dabei unscharf wird. Somit sind die einzelnen Pixel der Fotos möglichst klein im Verhältnis zur Ausdehnung der Streifen.

Um die Ausdehnung für mehrere verschiedene Temperaturen zu bestimmten, werden insgesamt sechs verschiedene Spannungen (0 V, 0.5 V, 1 V, 1.5 V, 2 V, 2.5 V) an beide Streifen gelegt und die entsprechende Durchschnittstemperatur der Streifen mittels der Temperatursensoren gemessen. Der Streifen wird für jede angelegte Spannung einmal fotografiert. In Abbildung 6.12 sieht man ein exemplarisches Foto für eine angelegte Spannung von 0 V.



Abb. 6.12: Foto für die Messung der Ausdehnung der Kaptonstreifen für eine angelegte Spannung von 0 V.

Dabei habe ich eine Stelle auf dem Spanngerüst mit einem schwarzen Stift markiert. Dieses Teil des Spanngerüsts bewegt sich nicht mit der Ausdehnung der Kaptonstreifen, sondern lediglich das PCB, welches am rechten Rand des Fotos zu erkennen ist.

Für die Auswertung der Fotos nutze ich das Programm GIMP (GNU Image Manipulation Program) [28]. Damit kann man das Foto vergrößern und die einzelnen Pixel zählen. Bei allen Fotos tritt das Problem auf, dass die Ausrichtung der Kamera nicht perfekt exakt gelingt, wodurch die Pixel nicht genau parallel zum Aufbau verlaufen. Dieses Problem kann mittels des Satzes von Pythagoras gelöst werden. Da das Verhältnis von gemessenen Pixeln entlang der Streifen wesentlich höher ist als die Abweichung senkrecht dazu, kann man diese Anpassung vernachlässigen.

Um zunächst zu bestimmen welche Länge ein einzelner Pixel besitzt, werden die Pixel zwischen weit auseinanderliegenden Punkten des Millimeterlineals gezählt und ins Verhältnis mit der Längendifferenz gestellt. Somit erhält man für die Länge eines Pixels

$$1 \text{ Pixel} \approx 0.001218 \text{ mm.}$$
 (6.1)

Nun kann man die Längenausdehnung der Streifen betrachten. Als einheitlichen Startpunkt für die Zählung der Pixel nutze ich den Markierten Punkt auf dem Lineal und als Endpunkt den Beginn der PCBs. Die Anzahl der Pixel kann ich daraufhin in die dazugehörige Länge umrechnen. Da die erste Messung bei 0V als Startpunkt für die Längenausdehnung angesehen wird, bilde ich die Differenz von den anderen gemessenen Längen zu dieser Messung, wodurch man die Längenausdehnung des Streifens mit Temperatur erhält. Da die Übergänge am Start- und Endpunkt der Messung bei herangezoomten Bildern nicht mehr scharf zu erkennen sind, nehme ich für jede Messung einen Fehler von 1 Pixel an. Für die Längenmessung mit zunehmender Temperatur ergibt sich Tabelle 6.3.

Spannung U $[V]$	Temperatur T [° C]	Vergleichslänge L $\left[mm\right]$
(0.000 ± 0.001)	(25 ± 2.5)	(15.28590 ± 0.01218)
(0.500 ± 0.001)	(27 ± 2.5)	(15.29808 ± 0.01218)
(1.000 ± 0.001)	(34 ± 2.5)	(15.33462 ± 0.01218)
(1.500 ± 0.001)	(45 ± 2.5)	(15.39552 ± 0.01218)
(2.000 ± 0.001)	(57 ± 2.5)	(15.44424 ± 0.01218)
(2.500 ± 0.001)	(69 ± 2.5)	(15.49296 ± 0.01218)

Tabelle 6.3: Gemessene Werte zur Bestimmung des Zusammenhangs von Temperatur T und Ver-
gleichslänge L von Kapton.

Nun kann man die Ausdehnung L gegen die Temperatur auftragen. Dabei wird mittels eines linearen Fits, der mit dem Python Paket "Kafe" [29] kreiert wurde, deutlich, dass der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Temperatur und Ausdehnung im Rahmen der Messgenauigkeit gegeben ist.



Abb. 6.13: Abhängigkeit der Ausdehnung L der Kaptonstreifen im Verhältnis zur Temperatur T. Der eingefärbte Bereich um die Fit-Gerade herum stellt deren Unsicherheit dar.

6 MESSUNGEN

Durch den Fit erhält man die Steigung b der Geraden, welche in diesem Fall dem Wärmeausdehnungskoeffizienten β entspricht. Nun vergleiche ich diesen ermittelten Wert mit dem Literaturwert für Kapton.

Wärmeausdehnungskoeffizienten		
Fitparamteter b Literaturwert		
$(17.5 \pm 1.3)10^{-6} \frac{1}{K}$	$(17-20)\cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$	

Tabelle 6.4: Vergleich des Fitparameters mit dem Literaturwert für den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kapton.

Es ist somit klar zu sehen, dass der mittels des Fits bestimmte Wärmeausdehnungskoeffizient sehr gut mit dem Literaturwert übereinstimmt. Daraus kann man schließen, dass die Federn den Heizstreifen so strecken, dass er sich lediglich in Zugrichtung der Federn ausbreitet und nicht anfängt mittig durchzuhängen. Der gesamte Aufbau des Spanngerüsts erfüllt somit seinen Zweck.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Abschnitt werden noch einmal alle Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

Zunächst wurde der experimentelle Aufbau im Programm Autodesk Inventor nachgestellt und daraufhin in CFD für Simulationen genutzt. Die Simulationen ohne Kühlkanäle lieferte dabei Ergebnisse, die meinen Erwartungen entsprechen. Jedoch musste die Simulation dabei vor ihrer Konvergenz abgebrochen werden, da sie zu instabil war und die Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung zu divergieren drohten. Da diese Werte jedoch keinen Einfluss auf die wichtigen Größen haben und die wichtigen Größen der Temperatur und der z-Geschwindigkeit schon konvergiert waren, stellte das kein Problem dar.

Daraufhin wurde die Simulation mit Kühlkanälen durchgeführt, welche ebenfalls sinnvolle Ergebnisse lieferte. Dabei konvergierten auch alle Werte, sodass die Simulation nicht abgebrochen werden musste.

Als man nun die Simulationsergebnisse ohne Kühlkanäle mit den gemessenen Werte verglich, so stellte man fest, dass die Ergebnisse bis auf kleine Abweichungen übereinstimmen, wie zum Beispiel der Tatsache, dass die gemessenen Temperaturen des oberen und unteren Streifens im Vergleich zur Simulation kaum einen Unterschied aufwiesen. Diese Abweichungen sind jedoch darauf zurückzuführen, dass eine Simulation immer eine Näherung der tatsächlichen Umstände einer Messung darstellen. Außerdem fiel hierbei auf, dass vor allem der dritte obere Temperatursensor durchweg höhere Temperaturen maß, was auf einen gesonderten systematischen Fehler dieses Sensors hinweist.

Der Vergleich der Simulationen mit Kühlkanälen mit den gemessenen Werten lieferte ebenfalls recht ähnliche Ergebnisse. Jedoch wurden die Temperaturen der Sensoren mit steigenden Luftflüssen im Vergleich zur Simulation immer heißer. Dies lässt darauf schließen, dass im experimentellen Aufbau kein perfekt luftundurchlässiger Aufbau vorliegt, sodass Luft währen der Messung aus den Kühlkanälen austreten kann. Weiterhin fiel auch hierbei auf, dass wider der dritte obere Temperatursensor höhere Temperaturen maß, als der Rest der Sensoren.

Zu guter Letzt wurde noch überprüft, ob die jeweils an beiden Seiten der Heizstreifen angebrachten Federn stark genug sind, um die Beugung der Streifen während ihrer Erhitzung zu verhindern. Um dies zu überprüfen wurde der Wärmeausdehnungskoeffizient von Kapton entlang der Streifen bestimmt und mit dem Literaturwert verglichen. Dies lieferte einen Wert von $(17.5 \pm 1.3)10^{-6} \frac{1}{\circ C}$ im Vergleich zum Literaturwert von $(17-20)\cdot 10^{-6} \frac{1}{\circ C}$. Da hierbei eine gute Übereinstimmung vorliegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Federn ihren Zweck erfüllen.

Um die Kühlung der P2-Detektoren weiter zu überprüfen lohnt es sich, die Luftdurchlässigkeit des Aufbaus zu überprüfen, um eine genauere Messung zu erhalten. Außerdem empfiehlt es sich nun auch Messungen mit Helium anstelle von Luft durchzuführen, da dies für die finale Kühlung im P2-Experiment geplant ist. Hierzu können abermals Simulationen und Messungen durchgeführt werden.

A Anhang

A.1 Zusätzliche Graphiken

A.1.1 Zusätzliche Graphiken der Simulationen ohne Kühlkanäle

Die Graphiken für die Simulation ohne Kühlkanäle für die restlichen Gesamtwärmeentwicklungen sind in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt.



(a) yz-Ebene für 6 W.

(b) xz-Ebene für 6 W.



- (c) xy-Ebene für 6 W.
- **Abb. A.1:** Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 6 W Gesamtwärmeentwicklung am oberen und unteren Heizstreifen ohne Kühlkanäle.

A ANHANG



(e) xy-Ebene für 5 W vor Strahlung.

(f) xy-Ebene für 5 W nach Strahlung.

Abb. A.2: Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 5 W Gesamtwärmeentwicklung am oberen und unteren Heizstreifen ohne Kühlkanäle vor und nach manuellen Abbruch der Simulation.

A.1.2 Zusätzliche Graphiken der Simulationen mit Kühlkanälen

Die Graphiken für die Simulation mit Kühlkanälen für die restlichen Gesamtwärmeentwicklungen sind in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt.





(c) xy-Ebene für 6 W.

Abb. A.3: Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 6 W Gesamtwärmeentwicklung am oberen und unteren Heizstreifen ohne Kühlkanäle.



(a) xz-Ebene für 10W.

(b) yz-Ebene für 10 W.



(c) xy-Ebene für 10 W.

Abb. A.4: Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 10 W Gesamtwärmeentwicklung am oberen und unteren Heizstreifen ohne Kühlkanäle.

A ANHANG



(a) xz-Ebene für 12 W.

(b) yz-Ebene für 12W.

Geschwindigkeit v [cm/s]



(c) xy-Ebene für 12W.

Abb. A.5: Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 12 W Gesamtwärmeentwicklung am oberen und unteren Heizstreifen ohne Kühlkanäle.

A.1.3 Zusätzliche Graphiken zu den Messungen ohne Kühlkanäle

Die Vergleiche der Simulation mit den gemessenen Maximal- und Mittelwerten ohne Kühlkanäle für 5 W und 6 W sind unten dargestellt.



Abb. A.6: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen aus der Simulation für 5 W ohne Kühlkanäle.



Abb. A.7: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen aus der Simulation für 6 W ohne Kühlkanäle.

A.1.4 Zusätzliche Graphiken zu den Messungen mit Kühlkanälen

Die gemessenen Temperaturen für verschiedene Luftflüsse bei einer genutzten Leistung von 6 W sind in Abbildung A.8 dargestellt.



Abb. A.8: Vergleich der maximalen Temperaturen T_{max} und der durchschnittlichen Temperaturen \overline{T} für verschiedene Flüsse Q für eine angelegte Leistung von 6 W.

Die gemessenen Temperaturen für verschiedene Leistungen bei einem Luftfluss von 0.27 $\frac{1}{s}$ sind in Abbildung A.9 dargestellt.



Abb. A.9: Vergleich der maximalen Temperaturen T_{max} und der durchschnittlichen Temperaturen \overline{T} für verschiedene Leistungen P für einen Luftfluss von 0.27 $\frac{1}{s}$.

Der Vergleich gemessener mit simulierten Temperaturen für Leistungen von 6 W und 10 W mit verschiedenen Luftflüssen ist in Abbildung A.10 dargestellt.



(a) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 6 W und einem Luftfluss von $0.12 \frac{1}{s}$.



(b) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 6 W und einem Luftfluss von $0.17 \frac{1}{s}$.



(c) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 6 W und einem Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$.



(d) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 6 W und einem Luftfluss von $0.27 \frac{1}{s}$.



(e) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für eine Leistung von 10 W und einem Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$.



(f) Vergleich der Simulation mit gemessenen Daten für Leistungen von 6 W und 10 W und einem Luftfluss von $0.27 \frac{1}{s}$.

Abb. A.10: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen aus der Simulation für 6 W und 10 W für verschiedene Luftflüsse. Die Temperaturen wurden an den entsprechenden Stellen der Temperatursensoren gemessen.

Die restlichen Fotos zur Bestimmung der Ausdehnung der Kaptonstreifen sind in Abbildung A.11 zu sehen.



(a) Foto für 0.5 V.



(b) Foto für 1.0 V.



(c) Foto für 1.5 V.



(d) Foto für 2.0 V.



Abb. A.11: Fotos für die Messung der Ausdehnung der Kaptonstreifen für verschiedene angelegte Spannungen.

A.2 Zusätzliche Tabellen

A.2.1 Zusätzliche Tabellen zu den Messungen ohne Kühlkanäle

Die gemessenen Werte für die maximalen und durchschnittlichen Temperaturen für die Messung ohne Kühlkanäle sind in untenstehender Tabelle kompakt zusammengetragen.

Leistung $[W]$	Sensoren	$\overline{T} \ [^{\circ}C]$	$T_{max} \ [^{\circ}C]$
	1	(56.40 ± 2.02)	(59.81 ± 2.50)
	2	(58.36 ± 2.02)	(61.25 ± 2.50)
	3	(59.59 ± 2.02)	(62.13 ± 2.50)
5	4	(56.34 ± 2.02)	(59.63 ± 2.50)
	5	(57.36 ± 2.03)	(59.69 ± 2.50)
	6	(57.05 ± 2.03)	(60.31 ± 2.50)
	7	(56.71 ± 2.03)	(60.38 ± 2.50)
	8	(55.61 ± 2.03)	(58.81 ± 2.50)
	1	(61.85 ± 2.02)	(66.06 ± 2.50)
	2	(64.35 ± 2.02)	(67.25 ± 2.50)
	3	(66.04 ± 2.02)	(69.50 ± 2.50)
6	4	(61.98 ± 2.02)	(65.50 ± 2.50)
	5	(63.75 ± 2.03)	(66.13 ± 2.50)
	6	(63.35 ± 2.03)	(67.00 ± 2.50)
	7	(62.96 ± 2.03)	(67.63 ± 2.50)
	8	(61.72 ± 2.03)	(65.44 ± 2.50)
	1	(66.99 ± 2.03)	(71.63 ± 2.50)
	2	(69.84 ± 2.03)	(73.19 ± 2.50)
	3	(71.62 ± 2.03)	(75.56 ± 2.50)
7	4	(67.44 ± 2.02)	(71.13 ± 2.50)
	5	(69.16 ± 2.03)	(72.00 ± 2.50)
	6	(68.40 ± 2.04)	(72.69 ± 2.50)
	7	(68.15 ± 2.05)	(73.56 ± 2.50)
	8	(66.28 ± 2.03)	(70.81 ± 2.50)

Tabelle A.1: Gemessene maximale und mittlere Temperaturen für 5 W, 6 W und 7 W ohne Kühlkanäle.

	Stromstärke I			
Spannung U	I1	I2	I3	I4
(0.100 ± 0.001) V	$(67.9 \pm 0.1) \mathrm{mA}$	(67.4 ± 0.1) mA	(67.8 ± 0.1) mA	$(67.4 \pm 0.1) \mathrm{mA}$
(0.880 ± 0.001) V	(575 ± 4) mA	(576 ± 4) mA	(571 ± 4) mA	(570 ± 4) mA
(1.250 ± 0.001) V	(798 ± 5) mA	(801 ± 5) mA	(793 ± 5) mA	(793 ± 5) mA
(1.570 ± 0.001) V	(969 ± 5) mA	(972 ± 5) mA	(967 ± 5) mA	(968 ± 5) mA
(1.820 ± 0.001) V	(1.10 ± 0.01) A	(1.10 ± 0.01) A	(1.10 ± 0.01) A	(1.10 ± 0.01) A
(2.060 ± 0.001) V	(1.21 ± 0.01) A	(1.22 ± 0.01) A	(1.22 ± 0.01) A	$(1.22 \pm 0.01) A$
(2.270 ± 0.001) V	$(1.32 \pm 0.01) A$	$(1.33 \pm 0.01) A$	$(1.33 \pm 0.01) A$	$(1.32 \pm 0.01) A$
(2.480 ± 0.001) V	(1.41 ± 0.01) A	(1.42 ± 0.01) A	(1.42 ± 0.01) A	(1.42 ± 0.01) A

Tabelle A.2: Gemessene Stromstärken der halben Streifen für verschiedene Spannungen.

Die gemessenen Spannungen und Stromstärken zur Bestimmung des Widerstandes der halben Heizstreifen sind in Tabelle A.2.1 dargestellt. Hierbei steht der Wert von I_1 für die Stromstärke des linken oberen, der von I_2 für die des rechten oberen, der von I_3 für die des linken unteren und der von I_4 für die des rechten unteren halben Streifen.

A.2.2 Zusätzliche Tabellen zu den Messungen mit Kühlkanälen

In Tabelle A.3 sind die gemessenen maximalen und mittleren Temperaturen der Temperatursensoren für die Messung mit verschiedenen Luftflüssen kompakt zusammengefasst.

Leistung $[W]$	Sensoren	$\overline{T} \ [^{\circ}C]$	$T_{max} \ [^{\circ}C]$
	1	(66.43 ± 2.04)	(68.81 ± 2.50)
	2	(68.93 ± 2.03)	(68.88 ± 2.50)
	3	(70.32 ± 2.03)	(71.06 ± 2.50)
6	4	(67.71 ± 2.05)	(68.94 ± 2.50)
	5	(65.54 ± 2.06)	(68.69 ± 2.50)
	6	(66.11 ± 2.05)	(69.00 ± 2.50)
	7	(65.50 ± 2.05)	(67.94 ± 2.50)
	8	(64.90 ± 2.02)	(65.75 ± 2.50)
	1	(75.55 ± 2.03)	(76.81 ± 2.50)
	2	(79.83 ± 2.02)	(80.38 ± 2.50)
	3	(81.66 ± 2.02)	(82.38 ± 2.50)
8	4	(77.74 ± 2.05)	(78.81 ± 2.50)
	5	(75.40 ± 2.05)	(77.25 ± 2.50)
	6	(76.36 ± 2.03)	(77.69 ± 2.50)
	7	(75.10 ± 2.02)	(76.25 ± 2.50)
	8	(74.39 ± 2.02)	(75.00 ± 2.50)

(a) Gemessene maximale und mittlere Temperaturen für einen Fluss von $0.00 \frac{1}{s}$.

Leistung $[W]$	Sensoren	$\overline{T} \ [^{\circ}C]$	$T_{max} \ [^{\circ}C]$
	1	(51.67 ± 2.03)	(52.56 ± 2.50)
	2	(57.75 ± 2.05)	(59.38 ± 2.50)
	3	(63.87 ± 2.02)	(64.44 ± 2.50)
6	4	(63.66 ± 2.01)	(64.19 ± 2.50)
	5	(49.44 ± 2.01)	(49.75 ± 2.50)
	6	(59.21 ± 2.01)	(59.88 ± 2.50)
	7	(61.91 ± 2.03)	(63.50 ± 2.50)
	8	(63.22 ± 2.01)	(63.63 ± 2.50)
	1	(59.33 ± 2.02)	(60.06 ± 2.50)
	2	(67.54 ± 2.03)	(68.81 ± 2.50)
	3	(73.14 ± 2.01)	(73.50 ± 2.50)
8	4	(74.90 ± 2.02)	(75.81 ± 2.50)
	5	(55.59 ± 2.02)	(56.19 ± 2.50)
	6	(67.75 ± 2.02)	(68.19 ± 2.50)
	7	(71.10 ± 2.02)	(71.44 ± 2.50)
	8	(73.06 ± 2.01)	(73.38 ± 2.50)

(b) Gemessene maximale und mittlere Temperaturen für einen Fluss von $0.12 \frac{l}{s}$

Leistung $[W]$	Sensoren	$\overline{T} \ [^{\circ}C]$	$T_{max} [^{\circ}C]$
	1	(49.01 ± 2.01)	(49.88 ± 2.50)
	2	(55.91 ± 2.01)	(56.63 ± 2.50)
	3	(62.03 ± 2.02)	(62.56 ± 2.50)
6	4	(60.68 ± 2.01)	(60.88 ± 2.50)
	5	(46.00 ± 2.01)	(46.75 ± 2.50)
	6	(56.92 ± 2.02)	(57.56 ± 2.50)
	7	(59.17 ± 2.01)	(59.50 ± 2.50)
	8	(59.98 ± 2.01)	(60.25 ± 2.50)
	1	(55.25 ± 2.02)	(56.06 ± 2.50)
	2	(64.15 ± 2.03)	(65.38 ± 2.50)
	3	(71.45 ± 2.03)	(72.31 ± 2.50)
8	4	(69.89 ± 2.01)	(70.50 ± 2.50)
	5	(51.67 ± 2.02)	(53.50 ± 2.50)
	6	(65.73 ± 2.02)	(66.75 ± 2.50)
	7	(68.20 ± 2.01)	(69.00 ± 2.50)
	8	(69.23 ± 2.02)	(69.81 ± 2.50)

(c) Gemessene maximale und mittlere Temperaturen für einen Fluss von $0.17 \frac{1}{s}$

Leistung $[W]$	Sensoren	$\overline{T} \ [^{\circ}C]$	$T_{max} [^{\circ}C]$
	1	(47.36 ± 2.02)	(48.00 ± 2.50)
	2	(54.20 ± 2.03)	(55.75 ± 2.50)
Leistung [W] 6 8 10	3	(59.78 ± 2.01)	(60.19 ± 2.50)
6	4	(58.49 ± 2.01)	(58.69 ± 2.50)
Leistung [W] 6 8 10	5	(44.96 ± 2.02)	(45.74 ± 2.50)
	6	(55.47 ± 2.03)	(56.59 ± 2.50)
	7	(57.90 ± 2.01)	(58.31 ± 2.50)
	8	(56.51 ± 2.01)	(56.81 ± 2.50)
	1	(52.10 ± 2.01)	(52.63 ± 2.50)
	2	(60.20 ± 2.02)	(61.00 ± 2.50)
	3	(67.39 ± 2.01)	(67.81 ± 2.50)
Leistung [W] 6 8 10	4	(65.91 ± 2.01)	(66.38 ± 2.50)
	5	(49.78 ± 2.01)	(50.06 ± 2.50)
	6	(60.34 ± 2.02)	(61.13 ± 2.50)
	7	(64.84 ± 2.01)	(65.19 ± 2.50)
	8	(65.09 ± 2.02)	(65.44 ± 2.50)
10	1	(60.50 ± 2.02)	(61.50 ± 2.50)
	2	(71.64 ± 2.03)	(73.44 ± 2.50)
	3	(78.90 ± 2.02)	(79.69 ± 2.50)
	4	(77.36 ± 2.02)	(77.81 ± 2.50)
	5	(56.79 ± 2.02)	(58.25 ± 2.50)
	6	(73.37 ± 2.03)	(75.25 ± 2.50)
	7	(76.17 ± 2.01)	(76.63 ± 2.50)
	8	(74.85 ± 2.02)	(75.88 ± 2.50)

(d) Gemessene maximale und mittlere Temperaturen für einen Fluss von $0.22\,\frac{\rm l}{\rm s}$

Leistung $[W]$	Sensoren	$\overline{T} \ [^{\circ}C]$	$T_{max} \ [^{\circ}C]$
	1	(45.29 ± 2.01)	(45.81 ± 2.50)
Leistung [W] 6 8 10	2	(53.90 ± 2.02)	(54.44 ± 2.50)
	3	(58.34 ± 2.01)	(58.50 ± 2.50)
6	4	(56.39 ± 2.00)	(56.56 ± 2.50)
Leistung [W] 6 8 10	5	(43.68 ± 2.01)	(44.06 ± 2.50)
	6	(54.22 ± 2.02)	(55.06 ± 2.50)
	7	(56.73 ± 2.00)	(56.94 ± 2.50)
	8	(53.65 ± 2.01)	(53.94 ± 2.50)
	1	(50.29 ± 2.02)	(50.88 ± 2.50)
	2	(61.01 ± 2.03)	(61.81 ± 2.50)
	3	(66.14 ± 2.02)	(66.75 ± 2.50)
8	4	(63.63 ± 2.03)	(64.50 ± 2.50)
	5	(47.81 ± 2.02)	(48.69 ± 2.50)
	6	(61.33 ± 2.03)	(62.50 ± 2.50)
	7	(63.90 ± 2.03)	(64.69 ± 2.50)
	8	(60.06 ± 2.03)	(60.81 ± 2.50)
10	1	(57.43 ± 2.03)	(58.56 ± 2.50)
	2	(69.79 ± 2.04)	(71.13 ± 2.50)
	3	(76.58 ± 2.02)	(77.00 ± 2.50)
	4	(74.21 ± 2.02)	(74.81 ± 2.50)
	5	(54.86 ± 2.02)	(55.44 ± 2.50)
	6	(70.64 ± 2.04)	$(7\overline{2.50 \pm 2.50})$
	7	(75.00 ± 2.01)	(75.31 ± 2.50)
	8	(70.37 ± 2.02)	(71.19 ± 2.50)

(e) Gemessene maximale und mittlere Temperaturen für einen Fluss von 0.27 $\frac{1}{s}$

 Tabelle A.3: Gemessene maximale und mittlere Temperaturen für verschiedene Flüsse und verschiedene angelegte Leistungen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Abhängigkeit von $\sin^2(\theta_{\omega})$ vom Impulsübertrag μ .	2
2.2	Position der Spurdetektoren im P2-Experiment.	4
2.3	Schema eines HV-MAPS Sensors	4
2.4	Bilder zu PN-Übergängen.	5
2.5	Kleiner Ausschnitt eines Detektors.	6
4.1	Fotos der genutzten Heizstreifen.	10
4.2	Skizze der genutzten Temperatursensoren	11
4.3	Foto des Spanngerüsts mit Streifen und Kühlkanälen.	12
4.4	Foto und Skizze des Rotameters.	14
4.5	Skizze eines Kühlkanals	15
5.1	Ausschnitt des Aufbaus ohne Kühlkanäle in AI.	18
5.2	Aufbau samt Luftvolumen ohne Kühlkanäle in AI.	18
5.3	Konvergenzplot aus CFD ohne Kühlkanäle	20
5.4	Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 7 W ohne Kühlkanäle	21
5.5	Simulation des Temperatur profils für $5\mathrm{W},6\mathrm{W}$ und $7\mathrm{W}$ ohne Kühlkanäle	22
5.6	Vergleich der Simulationsergebnisse ohne Kühlkanäle.	23
5.7	Ausschnitt des Aufbaus mit Kühlkanälen in AI.	25
5.8	Aufbau samt Luftvolumen mit Kühlkanälen in AI.	25
5.9	Konvergenzplot aus CFD mit Kühlkanälen.	27
5.10	Simulation des Geschwindigkeitsrofils für 8 W mit Kühlkanälen.	28
5.11	Simulation des Temperaturprofils für 6 W, 8 W, 10 W und 12 W mit Kühl-	
	kanälen	29
5.12	Vergleiche der simulierten Temperaturen mit Kühlkanälen für verschiedene	
	Leistungen und Luftflüsse.	30
5.13	Vergleich der simulierten Temperaturen mit und ohne Luftfluss	31
6.1	Zeitliche Temperaturschwankungen für 7 W ohne Kühlkanäle	32
6.2	Vergleich der gemessenen mit den simulierten Temperaturen für 7 W ohne	
	Kühlkanäle.	33
6.3	Verhältnis der Widerstände zu den Leistungen pro halbe Streifen	34
6.4	Verhältnis der Temperaturen zu den Leistungen pro halbe Streifen	35
6.5	Zeitliche Temperaturschwankungen für 8 W und $0.22 \frac{1}{s}$ mit Kühlkanälen	37
6.6	Zeitlicher Temperaturverlauf für 8 W und hinzugefügtem Luftfluss von $0.22 \frac{1}{s}$	~
~ -	mit Kühlkanälen.	37
6.7	Vergleich der maximalen und mittleren Temperaturen für 8 W und verschie-	
	dene Luftflüsse.	38
6.8	Vergleich der maximalen und mittleren Temperaturen für $0.22 \frac{1}{s}$ und ver-	
<u> </u>	schiedenen Leistungen.	39
6.9	Vergleich der gemessenen Temperaturen mit und ohne Luftfluss	40
0.10	vergieich der gemessenen mit den simulierten Temperaturen mit Kuhlkanalen	40
6 1 1	Tur o w und verschiedene Luttilusse.	42
0.11	Foto des Aufbaus der Warmeausdennungs-Messung.	43
0.12	roto zur Auswertung der warmeausdennung für eine Spannung von UV	44
6.13	Ausdehnung von Kapton mit der Temperatur samt Fit.	45
------	---	----
A.1	Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 6 W ohne Kühlkanäle	48
A.2	Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 5 W ohne Kühlkanäle vor und	
	nach Abbruch der Simulation.	49
A.3	Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 6 W mit Kühlkanälen.	50
A.4	Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 10 W mit Kühlkanälen.	51
A.5	Simulation des Geschwindigkeitsprofils für 12 W mit Kühlkanälen	52
A.6	Vergleich der gemessenen mit der simulierten Temperaturen für 5 W ohne	
	Kühlkanäle	53
A.7	Vergleich der gemessenen mit der simulierten Temperaturen für 6 W ohne	
	Kühlkanäle	53
A.8	Vergleich der maximalen und mittleren Temperaturen für 6 W und verschie-	
	dene Luftflüsse.	54
A.9	Vergleich der maximalen und mittleren Temperaturen für $0.27 \frac{1}{s}$ und ver-	
	schiedenen Leistungen	55
A.10	Vergleich der gemessenen mit den simulierten Temperaturen mit Kühlkanälen	
	für 6 W und 10 W mit verschiedenen Luftflüssen. $\dots \dots \dots \dots \dots \dots$	57
A.11	Fotos für die Messung der Ausdehnung der Kaptonstreifen für verschiedene	
	angelegte Spannungen	59

Tabellenverzeichnis

3.1	Wärmekapazitäten für Luft und Helium	8
4.1	Maximale Gasflüsse von Luft und Helium für laminare Strömung	15
5.1	Physikalische Größen von Kapton, Messing und Polyseter-Polyurethan	17
5.2	Randbedingungen für Simulation ohne Kühlkanäle.	19
5.3	Wärmeentwicklkungen pro Fläche bei Simulation ohne Kühlkanäle	19
5.4	Maximale Luft-Geschwindigkeiten in Simulation ohne Kühlkanäle	21
5.5	Leistungsdifferenzen für Simulation ohne Kühlkanäle	24
5.6	Randbedingungen für Simulation mit Kühlkanälen.	26
5.7	Wärmeentwicklkungen pro Fläche bei Simulation mit Kühlkanälen	26
5.8	Maximale Luft-Geschwindigkeiten in Simulation mit Kühlkanälen	28
6.1	Angelegte Spannungen und Leistungen bei Messung ohne Kühlkanäle	32
6.2	Angelegte Spannungen und Leistungen bei Messung mit Kühlkanälen	36
6.3	Gemessene Werte zur Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten	45
6.4	Vergleich des bestimmten Wärmeausdehnungskoeffizienten mit Literaturwert.	46
A.1	Gemessene maximale und mittlere Temperaturen ohne Kühlkanäle	60
A.2	Gemessene Stromstärken der halben Streifen für die Bestimmung des Wi-	
	derstandes	60
A.3	Gemessene maximale und mittlere Temperaturen mit Kühlkanälen	63

Literatur

- A. Denig Vorlesung Experimentalphysik 5b Kern- und Teilchenphysik Johannes-Gutenberg Universität Mainz 2017/18.
- [2] D.Becker et al., "The P2 Experiment A future high-precision measurement of the electroweak mixing angle at low momentum transfer." DOI: 10.1140/epja/i2018-12611-6. arXiv:1802.04759 [nucl-ex]. (aufgerrufen am 10.12.2018)
- [3] In Anlehnung an: D.Becker et al., "The P2 Experiment A future highprecision measurement of the electroweak mixing angle at low momentum transfer." DOI: 10.1140/epja/i2018-12611-6. arXiv:1802.04759 [nucl-ex]. (aufgerrufen am 10.12.2018)
- [4] I.Perić, "A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology."DOI: 10.1109/NSSMIC.2007.4437188. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 582.3: 876-885, 2007. (aufgerufen am 10.12.2018)
- [5] In Anlehnung an: Images Scientific instruments. https://www.imagesco.com/articles/photovoltaic/photovoltaic-pg3.html (aufgerufen am 28.11.2018)
- [6] J.P. Hammerich Bachelorarbeit "Studies of HV-MAPS—Analog Performance." Bachelor Thesis, University Heidelberg, 2015.
- [7] M. Zimmermann Doktorarbeit Arbeit in Bearbeitung.
- [8] L.Henkelmann Bachelorarbeit "Optical Measurements of Vibration and Deformation of the Mu3e Silicon Pixel Tracker."
 Bachelor Thesis, University Heidelberg, 2015.
- [9] The Engeneering ToolBox Reynolds Number https://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d_237.html (aufgerufen am 16.12.2018)
- [10] J.H. Lienhard
 A heat transfer textbook
 Phlogiston Press, 4. Auflage, Cambridge 2003.
 Kapitel 7.5. Heat transfer coefficients for noncircular ducts., Seiten 371-376.
- [11] V. Büscher Vorlesung Experimentalphysik 1 Mechanik und Thermodynamik Johannes-Gutenberg Universität Mainz 2015/16.

- [12] Chemie.de Spezifische Wärmekapazität http://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t. html (aufgerufen am 22.11.2018)
- [13] V. Büscher Vorlesung Experimentalphysik 2 Elektromagnetismus und Optik Johannes-Gutenberg Universität Mainz 2016.
- [14] Chemie.de Temperaturkoeffizient http://www.chemie.de/lexikon/Temperaturkoeffizient.html (aufgerufen am 22.11.2018)
- [15] Dupont Kapton Summary of Properties http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/ membranes-and-films/polyimde-films/documents/ DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf (aufgerufen am 30.11.2018)
- [16] Arduinostore Arduino Uno Rev3 https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3
- [17] Maxim Integrated DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf (aufgerufen am 23.10.2018)
- H. Schade, E. Kunz, F. Kameier, C.O. Paschereit Strömungslehre De Gruyter Verlag, 4. Auflage, Berlin 2013. Kapitel. 15.7. Volumenstrommessung, Seite 385.
- [19] H.R.Tränkler, G.Fischerauer
 Das Ingenieurwissen: Messtechnik
 Springer Verlag, 34. Auflage, Berlin 2014.
 Kapitel 3.4.2 Schwebekörper-Durchflussmessung, Seite 37.
- [20] Mecon Schwebekörper und Durchflussmessgeraete https://www.mecon.de/de/schwebekoerper-durchflussmessgeraete/ (aufgerufen am 22.10.2018)
- [21] DETAKTA Kapton HN-Polyimid-Folie https://www.detakta.de/fileadmin/datenblaetter/flexibleIsolierstoffe/ Kapton.pdf (aufgerufen am 08.11.2018)
- [22] Deutsches Kupferinstitut Copper Alliance https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/eigenschaften/ kupfer-zink-messing.html (aufgrufen am 08.11.2018)

- [23] MATERIAL ARCHIV http://www.materialarchiv.ch/app-tablet/#detail/34 (aufgerufen am 8.11.2018)
- [24] BASF Thermoplastische Polyurethan Elastomere (TPU) http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/us/function/ conversions:/publish/content/group/Arbeitsgebiete_und_Produkte/ Thermoplastische_Spezialelastomere/Infomaterial/elastollan_material_ d.pdf (aufgerufen am 08.11.2018)
- [25] Digitalkamera Canon https://www.digitalkamera.de/Kamera/Canon/EOS_400D.aspx (aufgerufen am 30.11.2018)
- [26] T. Jennewein Masterarbeit "Erste Erfahrung mit der Messelektronik für das P2-Experiment an MESA." Johannes-Gutenberg Universität Mainz, 2015.
- [27] Stefan Roth, Achim Stahl Mechanik und Wärmelehre : Experimentalphysik – anschaulich erklärt Springer Verlag, online - Ausgabe, Berlin Heidelberg, 2016. Kapitel 20.3 Längenausdehnung, Seite 524.
- [28] GIMP: GNU Image Manipulation Program Version vom 8. November 2018
 https://www.gimp.org/ (aufgerufen am 30.11.2018)
- [29] Karlsruher Fit Environment D. Savoiu, G. Quast, 2015 http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~quast/kafe/htmldoc/ (aufgerufen am 3.12.2018)

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Prof. Niklaus Berger, der mir die Möglichkeit einer Bachelorarbeit in seiner Arbeitsgruppe bot und sich in nicht selbstverstädlicher Weise um meine Fragen gekümmert hat.

Ebenfalls möchte ich mich besonders bei meinem Betreuer Marco Zimmermann für die vielen hilfreichen Ratschläge und die Unterstützung bei diversen Problemen bedanken. Auch Carsten Grzesik möchte ich meinen Dank aussprechen, der mir bei Abwesenheit von Marco gerne Fragen beantwortet hat.

Weiterhin bedanke ich mich bei Anne Mareike Galda, welche die Kühlkanäle im Rahmen ihres HiWi-Jobs anfertigte und diese an den Heizstreifen befestigte.

Außerdem bedanke ich mich bei der gesamten Arbeitsgruppe für die angenehme und lockere Atmosphäre.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht und mir stets den nötigen Rückhalt gegeben haben.