

# **Gedruckte Temperatursensor-Arrays mit hoher räumlicher Auflösung**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**M.Sc. Robert Huber**

geb. in Tübingen

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Korreferent:

23.02.2024

Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer

Prof. Dr.-Ing. Hussam Amrouch



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -  
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

# Zusammenfassung

In der heutigen technologiegetriebenen Welt ist Sensorik ein unverzichtbares Instrument geworden, um den Anforderungen an Automatisierung und Vernetzung im Alltag gerecht zu werden. Von der Industrie bis in die Unterhaltungselektronik steigt das Maß der Datenerfassung, was sich unmittelbar in den massiven Wachstumsraten im Sensormarkt widerspiegelt. Mit der Erschließung neuer Anwendungsgebiete geht auch die Entwicklung neuer Sensorik einher, was sich unmittelbar bei den Anforderungen an die Fertigungsverfahren niederschlägt. Dabei stellt die gedruckte Elektronik im Bereich elektronischer Bauteile eine Revolution dar. Zwar kann die Technologie auf einige Jahrzehnte der Entwicklung zurückschauen, doch zuletzt nahm das Thema weiter an Fahrt auf. Gründe sind unter anderem neue oder verbesserte Druckverfahren, aber auch die Erforschung neuer Materialien. Im Gegensatz zu traditionellen, halbleiterbasierten Fertigungsverfahren, können leichte und flexible Substrate eingesetzt werden. Darüber hinaus können elektronische Schaltungen auch direkt auf dreidimensionalen Oberflächen aufgebracht werden, weshalb in diesem Zusammenhang häufig der Begriff der additiven Fertigung verwendet wird. Neue Materialien eröffnen außerdem die Möglichkeit neue Bauteilklassen zu fertigen, sodass gedruckte Elektronik inzwischen auch zur Herstellung von aktiven Komponenten eingesetzt wird. Zwar ist traditionelle Elektronik noch immer in Bezug auf Effizienz, Leistungsfähigkeit und Haltbarkeit überlegen, doch die Alleinstellungsmerkmale und Vorteile bei Skalierbarkeit und Kosten der Flüssigprozessierung befeuern in diesem Bereich die weitere Forschung.

Inzwischen lassen sich im Druckverfahren eine Vielzahl verschiedener Sensoren, wie beispielsweise organische Photodioden, Pulssensoren oder Dehnungssensoren, realisieren. Einer der bedeutsamsten Sensoren sind dabei Thermometer. Die Temperatur ist eine der grundlegendsten physikalischen Messgrößen und ein entscheidender Prozessparameter in vielen Abläufen. Diese Arbeit befasst sich damit, gedruckte Elektronik und Temperatursensorik zusammenzubringen. Es wird ein vollständig gedrucktes Temperatursensor-Array präsentiert, das aus 625 einzelnen Sensorpixel auf einer Fläche von 12 mm x 12 mm besteht. Somit kann nicht nur die lokale Temperatur bestimmt, sondern durch den Sensorverbund die Temperaturverteilung über eine zweidimensionale Oberfläche erfasst werden. Die Verwendung eines hybriden Druckverfahrens erlaubt dabei das schnelle und effiziente Aufbringen großflächiger Zuleitungsstrukturen durch Siebdruck, während für die feingliedrige Sensorstruktur ein Aerosol-Jet-Drucker zum Einsatz kommt. Auf diese Weise können nacheinander, mit hoher Präzession, drei Materiallagen zu einem Schichtsystem aufgebaut werden. Ein solches Thermometer, bestehend aus zwei Elektroden und einer Polymer-Komposit-Schicht, wird als Thermistor bezeichnet. Das zugrundeliegende Messprinzip beruht auf der Messung des elektrischen Widerstands, der eine hohe Temperaturabhängigkeit aufweist.

Vorgestellt werden zwei speziell entworfene Ausleseelektroniken für das Temperatursensor-Array. Die erste Version bietet einen erweiterten Messbereich, während die zweite für eine verbesserte Fehlerkorrektur und schnelles Auslesen konzipiert ist. Damit ist es schließlich möglich mit dem Temperatursensor-Array, einen auf die Sensorfläche fokussierten Laserstrahl zeitlich und räumlich nachzuverfolgen sowie zu analysieren. Beim Auftreffen des Lasers auf der Sensoroberfläche wird punktuell Wärme induziert. Durch die Auswertung des gemessenen Temperaturprofils, lässt sich unter Berücksichtigung einer Kalibrierung auf den Laserstrahldurchmesser und die Laserintensität schließen. Somit stellt die Verwendung des Sensors als Strahlprofilmessgerät für Wellenlängen jenseits des sichtbaren Bereiches eine attraktive Alternative zu kommerziellen Lösungen dar.

Darüber hinaus bietet sich die hohe Sensordichte auch zur Überwachung kritischer IT-Infrastruktur, zum Beispiel eines Prozessors, an. Durch die Erkennung von Hitzestau kann eine frühzeitige Degradation der empfindlichen Schaltkreise verhindert werden. Interessant ist dies außerdem im Bereich der Cybersicherheit, indem eine plötzliche, ungewöhnliche Hitzeentwicklung erkannt und das System zur Sicherheit kontrolliert heruntergefahren wird. Im Prozessor sind zwar bereits Temperatursensoren integriert, jedoch bieten diese nicht die nötige räumliche Auflösung für eine detaillierte Temperaturanalyse. Das in dieser Arbeit entwickelte Sensorarray, weist eine entsprechend hohe räumliche Auflösung auf und kann gleichzeitig durch additive Fertigung direkt auf einem Kühlkörper aufgedruckt werden. Somit lässt sich durch nur eine geringe Modifikation des Computersystems die laterale Temperaturverteilung der CPU messen. Die Ergebnisse demonstrieren nicht nur ein schnelles Ansprechen der Sensorpixel auf eine Temperaturänderung, sondern erlauben auch eine detaillierte Darstellung der Temperaturverhältnisse auf der Oberfläche des Prozessors. Selbst einzelne Rechenkerne der CPU können auf Basis dieser Daten eindeutig lokalisiert werden. Mit dem Ziel die Sicherheit und Leistung der IT-Infrastruktur weiter zu erhöhen, ist die Modellierung der Temperaturentwicklung eines Prozessors heute ein wichtiger Teil der Forschung. Hierzu kann das vorgestellte Temperatursensor-Array einen entscheidenden Beitrag liefern.

Über die gezeigten Anwendungsbeispiele hinaus bietet die laterale Temperaturmessung das Potential den Weg für weitere spannende Anwendungen im Bereich der Umweltsensorik, im Gesundheitswesen und Prozessüberwachung zu ebnen. Neben der Entwicklung der eigentlichen Sensorik können ebenfalls Fortschritte bei den Herstellungsverfahren verzeichnet und im Rahmen der gedruckten Elektronik erschlossen werden.

# Abstract

In today's technology-driven world, sensor technology has become an indispensable tool for meeting the demands of automation and connectivity in everyday life. From industry to consumer electronics, the level of data collection is increasing, which is directly reflected in the massive growth rates of the sensor market. The establishment of new applications is accompanied by the development of new sensor technology, which is also directly reflected in the requirements for the manufacturing processes. Printed electronics is a revolution in the field of electronic components. Although the technology has developed for several decades, it has recently gained further momentum. The reasons for this include new or improved printing processes but also research into new materials. In contrast to traditional manufacturing methods, lightweight and flexible substrates can be used. In addition, electronic circuits can be applied directly to three-dimensional surfaces, which is why the term additive manufacturing is often used in this context. New materials are also opening up the possibility of producing new classes of devices, so printed electronics are now being used to create active components. While traditional electronics are still superior in efficiency, performance, and durability, the unique selling points, such as scalability and cost advantages of liquid processing are driving further research in this area.

Meanwhile, a wide variety of different sensors, such as organic photodiodes, pulse sensors or strain sensors, can be realized with printing. In this regard, the thermometer is an essential sensor. Temperature is one of the most fundamental physical measurements and is a critical process parameter in many operations. This work is concerned with bringing printed electronics and temperature sensing together. A fully printed temperature sensor array is presented, consisting of 625 individual sensor pixels on a 12 mm x 12 mm area. The sensor allows not only to determine the local temperature but also the temperature distribution over a two-dimensional surface to be detected by the sensor array. Combining two printing methods in a hybrid process allows large-area feed structures to be applied quickly and efficiently by screen printing. At the same time, an aerosol jet printer is used for the fine-grained sensor structure. In this way, three layers of material can be built up in succession to form a highly precise layered system. Such a thermometer, consisting of two electrodes and a polymer composite layer, is called a thermistor. The fundamental measurement principle is based on the measurement of electrical resistance, which is highly dependent on temperature.

Two specially designed readout electronics for the temperature sensor array are presented. The first version offers an extended measurement range, while the second is designed for improved error correction and faster readout. Finally, the temperature sensor array is capable of tracking and analyzing the temporal and spacial properties of a laser beam, which is focused on the sensor surface. Heat is induced at specific points when the laser hits the sensor surface. By evaluating the measured temperature profile, it is possible to deduce the laser beam diameter and intensity, considering a calibration. Using the sensor as a beam profiler offers an attractive alternative to commercial solutions for wavelengths beyond the visible range.

In addition, the high sensor density also lends itself to monitoring critical IT infrastructure, such as a processor. By detecting heat build-up, premature degradation of sensitive circuits can be prevented. This is also of interest in cyber security, as a sudden, unusual build-up of heat can be detected and the system is shut down in a controlled manner for safety reasons. The temperature sensors already embedded into the processor usually do not provide the spatial resolution required for detailed temperature analysis. Additive

manufacturing allows the temperature sensor array to be integrated directly onto a heat sink. This allows to measure the lateral temperature distribution of a CPU implying only minor modifications to the computer system. The results not only show a fast response of the sensor pixels to a change in temperature but also allow a detailed representation of the temperature conditions on the surface of the processor. The lateral resolution provided is sufficient to locate even the individual processing cores of the CPU. To further increase the security and performance of IT infrastructure, modeling the temperature evolution of a processor is an essential part of today's research. The presented temperature sensor array can make a decisive contribution to this.

Beyond the application examples shown, lateral temperature measurement offers the potential for other exciting applications in the fields of environmental sensors, healthcare and process monitoring. In addition to advances in sensor technology, these includes the advantages and possibilities of new manufacturing processes.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>Abkürzungen und Symbole</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Einführung in die gedruckte Temperatursensorik . . . . .	1
1.2 Stand der Technik . . . . .	3
1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Die Temperatur . . . . .	7
2.1.1 Das Verständnis von Temperatur . . . . .	7
2.1.2 Standard-Temperaturmessverfahren . . . . .	12
2.1.3 Gedruckte Temperatursensoren . . . . .	15
2.1.4 Zweidimensionale Temperatursensoren . . . . .	16
2.2 Sensorspezifische physikalische Grundlagen . . . . .	19
2.2.1 Wärmetransport . . . . .	19
2.2.2 Leiter, Halbleiter, Isolatoren und Dioden . . . . .	22
2.2.3 Mathematische Beschreibung von Thermistoren . . . . .	27
<b>3 Druck- und Herstellungsverfahren</b> . . . . .	<b>29</b>
3.1 Eingesetzte Druckverfahren . . . . .	29
3.1.1 Siebdruck . . . . .	30
3.1.2 Aerosol-Jet-Druck . . . . .	31
3.2 Rotationsbeschichtung . . . . .	36
3.3 Schichtnachbehandlung . . . . .	37
3.3.1 Photonisches Sintern . . . . .	39
<b>4 Charakterisierungsmethoden und Materialien</b> . . . . .	<b>41</b>
4.1 Verwendete Charakterisierungsmethoden . . . . .	41
4.1.1 Taktile Profilometrie . . . . .	41
4.1.2 Weißlichtinterferometrie . . . . .	42
4.1.3 Rasterelektronenmikroskop und Ionenfeinstrahlanlage . . . . .	43
4.2 Verwendete Substrate und Materialien . . . . .	45
4.2.1 Substrate . . . . .	45
4.2.2 Materialien . . . . .	47
4.3 Beispiele zur Optimierung des Silberliniendrucks . . . . .	52
<b>5 Ausleseelektroniken und Kalibrierverfahren</b> . . . . .	<b>55</b>
5.1 Entwicklung von passenden Ausleseelektroniken . . . . .	55
5.1.1 Entwicklung einer Multiplexer-Ansteuereinheit . . . . .	56
5.1.2 Entwicklung einer angepassten Ausleseelektronik . . . . .	58

5.2	Kalibrierverfahren . . . . .	62
5.2.1	Individuelle Kalibrierung . . . . .	64
5.2.2	Gemittelte Kalibrierung . . . . .	67
5.3	Zusammenfassung . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Vollständig gedruckte Temperatursensor-Arrays . . . . .</b>	<b>71</b>
6.1	Sensorstruktur und Herstellung . . . . .	71
6.1.1	Sensorprototypen . . . . .	71
6.1.2	Hybrides Temperatursensor-Array . . . . .	74
6.2	Messplatz zur Untersuchung der Sensorfolien . . . . .	78
6.3	Charakterisierung und Kalibrierung der Sensorfolie . . . . .	80
6.4	Laserstrahlprofilmessung . . . . .	84
6.4.1	Wärmeleitungsgleichung . . . . .	85
6.4.2	Analyse eines Laserstrahls . . . . .	86
6.4.3	Simulation . . . . .	93
6.5	Zusammenfassung . . . . .	98
<b>7</b>	<b>Untersuchung eines Computerprozessors . . . . .</b>	<b>99</b>
7.1	Temperaturüberwachung von Prozessoren/Mikrochips . . . . .	99
7.2	Messplatz und Modifikationen des Prozessors . . . . .	100
7.3	Herstellung auf dem Prozessorkühlkörper . . . . .	102
7.4	Kalibriervorgang des Temperatursensor-Arrays auf dem Prozessor . . . . .	107
7.5	Zeitliche Temperaturentwicklung . . . . .	109
7.6	Unterscheidbarkeit der einzelnen Prozessorkerne . . . . .	111
7.7	Anwendbarkeit und Entwicklungspotential . . . . .	112
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>A</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>121</b>
A.1	Leiterplattenlayout Ansteuerplatine . . . . .	121
A.2	Schaltplan Ansteuerplatine . . . . .	121
A.3	Temperaturmessplatz . . . . .	124
	<b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>125</b>
	<b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>127</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen . . . . .</b>	<b>129</b>
	Journalartikel . . . . .	129
	Konferenzbeiträge . . . . .	130
	Betreute Abschlussarbeiten . . . . .	130
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>131</b>
	<b>Danksagung . . . . .</b>	<b>141</b>

# Abkürzungen und Symbole

## Abkürzungen

<b>ADC</b>	Analog-Digital-Wandler - <i>Analog Digital Converter</i>
<b>BNC</b>	Bayonet Neill–Concelman
<b>BSE</b>	Rückstreuelektronen
<b>CPU</b>	Computerprozessor - <i>Central Processing Unit</i>
<b>DGL</b>	Differentialgleichung
<b>DSB</b>	Double-Schottky-Barrier
<b>FPC</b>	Steckverbinder für flexible Leiterplatten
<b>IC</b>	Integrierter Schaltkreis - <i>Integrated Circuit</i>
<b>IoT</b>	Internet der Dinge
<b>KIT</b>	Karlsruher Institut für Technologie
<b>LTI</b>	Lichttechnisches Institut
<b>LUT</b>	Look-up-Table
<b>NPLC</b>	Anzahl der Netzyklen - <i>Number of Power Line Cycles</i>
<b>NTC</b>	Negativer Temperatur Koeffizient
<b>OD</b>	Optische Dichte
<b>PTC</b>	Positiver Temperatur Koeffizient
<b>PEDOT:PSS</b>	Poly(3,4-ethylenedioxythiophen)polystyrolsulfonat
<b>PEN</b>	Polyethylenphthalat
<b>PET</b>	Polyethylenterephthalat
<b>REM</b>	Rasterelektronenmikroskop
<b>SE</b>	Sekundärelektronen
<b>SMU</b>	Elektronisches Multifunktionsgerät - <i>Source Measurement Unit</i>
<b>TCR</b>	Temperaturkoeffizient des Widerstands
<b>TGME</b>	Triethylenglykolmonomethylether
<b>WLG</b>	Wärmeleitungsgleichung
<b>WLI</b>	Weißlichtinterferometer

## Physikalische Größen

$A$	Fläche
$\alpha$	Temperaturkoeffizient
$B$	Thermistortemperaturkoeffizient
$C$	Wärmekapazität
$d$	Schichtdicke
$E$	Energie
$\varepsilon$	Emissionsgrad
$f$	Wahrscheinlichkeitsverteilung
$h$	Wärmeübergangskoeffizient
$\eta_c$	Carnot-Wirkungsgrad
$I$	Strom
$\lambda$	Wärmeleitkoeffizient
$S$	Entropie
$p$	Druck
$Q$	Wärme
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$\dot{q}$	Wärmestromdichte
$R$	Widerstand
$S$	Entropie
$T$	Temperatur
$U$	Spannung
$V$	Volumen
$W$	Arbeit

## Konstanten

$e$	Elementarladung: $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
$k_B$	Boltzmann-Konstante: $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

# 1 Einleitung

*Als Einstieg in die vorgelegte Arbeit wird in diesem Kapitel die gedruckte Temperatursensorik motiviert und die Bedeutung für die Industrie und den Alltag hervorgehoben. Die Thematik wird in Kontext zu den aktuellen Fortschritten in Herstellung, Sensorik und Anwendung gesetzt. Dazu wird in einer Übersicht der aktuelle Stand der Technik zusammengefasst und ein kurzer Einblick in die Ergebnisse dieser Arbeit gegeben. Zu allerletzt wird der Aufbau der Arbeit und dessen Aufteilung in die Kapitel vorgestellt.*

## 1.1 Einführung in die gedruckte Temperatursensorik

Mit der Zunahme von Automatisierung und Vernetzung sowohl in der Industrie, aber auch im Alltag steigt die Anforderung an Bedarf und Umfang der Sensorik. In diesem Zusammenhang fallen vor allem die Begriffe Industrie 4.0 oder Internet der Dinge (IoT), die diesen Trend weiter beschleunigen [19, 20]. Bereits in den vergangenen Jahren erzielte der Sensormarkt massive Wachstumsraten und erreichte 2012 bereits ein Umsatzvolumen von \$120 Milliarden [21]. Aktuelle Marktstudien von *Precedence Research* zufolge, wurde 10 Jahre später bereits die \$200 Milliarden Grenze durchbrochen und es wird erwartet, dass 2032 mit einem Umsatz von über \$500 Milliarden zu rechnen ist. Daran ist zu erkennen, welcher Dynamik der Sensormarkt unterworfen ist. Hinzu kommen neue Anwendungsfelder mit neuen Anforderungsprofilen, die verbesserte oder alternative Fertigungsverfahren erfordern, um mit dem Wandel Schritt zu halten. Vor allem die gedruckte Elektronik ist ein spannender Kandidat diesen Herausforderungen zu begegnen und hat sich infolgedessen rasant weiterentwickelt. Laut *IDTechEx*, welche ebenfalls als Agentur zur Marktanalyse tätig ist, erreichte die gedruckte Elektronik im Jahr 2019 einen Anteil von \$31,7 Milliarden und wird diesen bis zum Jahr 2029 voraussichtlich mit \$73,3 Milliarden mehr als verdoppeln [22]. Über die letzten Jahre konnten im Bereich der gedruckten Elektronik beachtliche Fortschritte bei der Drucktechnik, aber auch bei den verfügbaren Materialien erzielt werden [23, 24, 25, 26]. Dadurch konnte die Komplexität der herstellbaren Strukturen gesteigert und diese gleichzeitig miniaturisiert werden. Diese neuen Materialien, die mit Flüssigprozessierung kompatibel sind, erlauben nicht nur die Fertigung passiver elektronischer Bauteile, sondern ermöglichen durch Schichtung mehrerer Materiallagen auch die Erzeugung aktiver Komponenten. Somit stößt diese Technologie mittlerweile in Gebiete vor, die zuvor ausschließlich klassischen Herstellungsmethoden vorbehalten waren. Diese bieten zwar weiterhin Vorteile im Bezug auf Leistungsfähigkeit, Energieeffizienz und Haltbarkeit, allerdings sind die Einsatzbereiche durch ihre Bauform/-größe und die Verwendung von starren Substraten limitiert. Im Gegensatz dazu bietet gedruckte Elektronik die Möglichkeit neue Formfaktoren und flexible Substrate zu verwenden, was sich für die Technologie als klares Alleinstellungsmerkmal darstellt. Da viele der Druckverfahren auf einer digitalen, maskenlosen Herstellung beruhen, lassen sich schnell und kostengünstig Anpassungen realisieren, sowie daraus Kleinserien fertigen. Im Zuge dessen entstanden neue Einsatzmöglichkeiten: Zu Beginn war dies vor allem die Beleuchtungs- und Displayindustrie, während heute gedruckte Elektronik auch im Energiesektor, Gesundheitswesen und Unterhaltungselektronik seine Anwendung findet [27, 28, 29, 30, 31, 32]. Um die Vorteile beider Welten zu nutzen, entstand außerdem die sogenannte flexible hybride Elektronik. Diese kombiniert die gedruckte Elektronik oder Sensorik mit klassischer, aber effizienter Halbleiterelektronik.

In diesem Rahmen lassen sich mittlerweile alle erdenklichen physikalischen und chemischen Sensoren realisieren [33]. Dazu zählen unter anderem Lichtsensoren [34, 35], Druck- oder Zugsensoren [36, 37, 38], pH-Sensoren [39, 40] und Gassensoren [41, 42]. Eine der wohl wichtigsten physikalischen Messgrößen ist die Temperatur. Diese ist bei einer Vielzahl von Prozessen ein entscheidender Parameter und wird aus diesem Grund bei vielen Abläufen erfasst. Einige interessante Anwendungsgebiete für die Messung der Temperatur, basierend auf gedruckter Elektronik, sind beispielsweise das Gesundheitswesen zur Überwachung des Gesundheitszustands von Patienten, die Lebensmittel- bzw. Kühlkettenüberwachung oder die Überwachung und Regelung von Elektronik. Jedes der genannten Anwendungsfelder stellt besondere Anforderung an die Temperaturmessung. Für das Gesundheitswesen ist vor allem die Flexibilität relevant, wenn ein solcher Sensor am Körper getragen werden soll. Dabei sollte der Sensor möglichst biokompatibel und gut integrierbar sein, um nicht aufzutragen und als Störfaktor wahrgenommen zu werden. Die Integration der Messtechnik ist auch bei der Überwachung von Elektronik ein wichtiges Thema. Nachgerüstete Sensorik sollte in ein bestehendes System möglichst ohne Modifikationen verbaubar sein und die Temperaturmessung unter Realbedingungen erlauben. Dies ist ebenfalls für die Kühlkettenüberwachung relevant, bei der die Temperaturmessung möglichst nahe am Kühlgut stattfinden sollte, um dessen Temperaturverlauf über die Zeit möglichst genau nachzuverfolgen. Da es sich bei der Sensorik meist um Einmalprodukte handelt, sollte die erforderliche Technik kostengünstig sein. Für die Erfüllung dieser speziellen Anforderung ist die gedruckte und additive Fertigung bestens geeignet. Folglich hat die Forschung im Bereich der gedruckten Temperatursensorik stetig zugenommen, wie sich auch an der Zahl an Publikationen hierzu in der Literaturdatenbank *Web of Science* widerspiegelt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Entwicklung neuer Materialien, Verbesserung der Herstellungsmethoden und Identifizierung von Anwendungen. Im diesem Zusammenhang entstand diese Forschungsarbeit, wobei der Schwerpunkt auf der Methodenentwicklung und der anschließenden Demonstration des Sensors anhand von Anwendungsbeispielen lag. Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, dass durch die Anordnung vieler Sensorpixel in einer Passiv-Matrix-Struktur einem vollständig gedruckten Temperatursensor-Array hergestellt werden kann. Die flächige Anordnung der Sensorpixel ermöglicht nicht nur die Bestimmung einer lokalen Temperatur, sondern erlaubt zusätzlich die Erfassung der lateralen Temperaturverteilung. Dies schafft die Möglichkeit das Sensorarray zur Bildgebung zu verwenden. Die Kombination von etablierter Siebdrucktechnik und innovativem Aerosol-Jet-Druck ermöglicht es, sowohl große Flächen zeitlich effizient zu bedrucken und gleichzeitig bei Bedarf das Drucken feiner Strukturen mit der erforderlichen Präzision. Für die Entwicklung des Sensors wird eine flexible Folie als Substrat gewählt. Im späteren Verlauf wird diese durch einen Kühlkörper ersetzt und somit im Rahmen der additiven Fertigung direkt bedruckt. Im Folgenden wird das Potential des entwickelten Sensorarrays anhand zweier Anwendungsbeispiele aufgezeigt: Bei der ersten Anwendung wird mithilfe eines Laserstrahls, die als gaußförmige Wärmequelle fungiert, Wärme in die Sensorfolie induziert. Dabei kann sowohl die Position als auch die Bewegung des Laserstrahls mitverfolgt werden. Hinzu kommt, dass aus der gemessenen Temperaturverteilung auf den Strahldurchmesser und die Intensität rückgeschlossen werden kann. In einer zweiten Anwendung wird durch die Direktintegration des Sensorarrays auf einem Prozessorkühlkörper gezeigt, dass die Wärmeverteilung eines Computerprozessors im laufenden Betrieb in Echtzeit erfasst werden kann. Dies ermöglicht die Erstellung eines Temperatur-Fingerabdrucks auf Basis der zugrundeliegenden Prozessorstruktur. Dadurch können Informationen gewonnen werden, welche eine Etablierung neuer Ansätze im Bereich der Cybersicherheit oder auch der Leistungsüberwachung in der IT-Infrastruktur möglich machen. Die eigens entwickelten Verfahren erlauben die Fertigung eines vollständig gedruckten Temperatursensor-Array mit einer bisher nicht erreichten Sensordichte. Dadurch wurden neue Möglichkeiten geschaffen, welche nicht nur auf die Fortschritte in der Sensorik zurückzuführen sind, sondern auch auf besseren und neuen Herstellungsverfahren basieren.

**Tabelle 1.1:** Übersicht über verschiedene gedruckte Temperatursensor-Arrays in der aktuellen Forschung.

Herstellung	Material	Temperaturbereich [cm <sup>2</sup> ]	Größe [cm <sup>2</sup> ]	Sensoren [#]	Dichte [# / cm <sup>2</sup> ]	Pixelgröße [mm <sup>2</sup> ]	TCR [%/K]	Referenz
Siebdruck	NTC Keramik Komposit	40-140	7x13	414	4.5	6x6	-4.00	[49]
Siebdruck	PEDOT:PSS	20-90	1x1	100	100	0.4x0.4	0.09	[5]
Inkjet	PEDOT:PSS, PU Dispersion	25-80	6x8*	25	0.52*	10x12*	0.32	[50]
Siebdruck	Metalllegierungen	20-100	6x6	25	0.7*	2x2	n/a	[51]
Siebdruck	CNT	18-44	7x7*	16	0.25*	10x10*	-0.15	[52]
Siebdruck	Polyvinylchlorid, Carbon Black	20-80	8x8	9	0.2	2x4	0.25	[53]
Inkjet/Siebdruck	Graphen PEDOT:PSS	35-45	2x3	4	0.7	1x1	0.06	[54]
E-Inkjet (EHD)	Silber NP	20-120	0,5x0,5*	4	16*	0,1x0,1*	0.09	[55]
Siebdruck/Aerosol-Jet	Carbon Black Komposit	5-90	1.2x1.2	625	434	0.06x0.06	-2,4 bis -3,6	<b><u>Diese Arbeit</u></b>

\* Die Werte wurden anhand der Abbildung abgeschätzt.

## 1.2 Stand der Technik

Im Bereich der gedruckten Elektronik im Zusammenhang mit Temperatursensorik haben sich drei Messprinzipien durchgesetzt. Die einfachste Variante beruht auf der Messung einer Widerstandsänderung einer gedruckten Metallleiterstruktur. Dadurch lässt sich die Komplexität gering halten, was in einer verhältnismäßig einfachen Herstellung resultiert. Um die messbare Widerstandsänderung zu vergrößern wird die Leiterschleife künstlich vergrößert, wie beispielsweise durch eine Mäanderstruktur [43, 44]. Am Gängigsten ist die Verwendung von nanopartikulären Metalltinten bei Druckverfahren. Der Vorzug dieser Methode ist eine in der Regel lineare Temperaturabhängigkeit des Widerstand, weshalb eine Kalibrierung problemlos ist. Ebenfalls möglich sind Thermistoren, welche aus einem Schichtsystem aus 2 Elektroden und einem Halbleiter bestehen. Zwar ist die Herstellung aufgrund der Kombination aus mehreren Materialien herausfordernd, dafür ist meist die Temperaturabhängigkeit von Thermistoren größer. Auch hierbei stellt der Widerstand die Messgröße zur Ermittlung der Temperatur dar [45, 46].

Im Gegensatz zu den beiden zuvor vorgestellten Messprinzipien, wird bei einem Thermoelement eine Spannung, die sogenannte Thermospannung, detektiert. Dazu wird ein Leiterpaar aus zwei verschiedenen Metallen gedruckt, das an einem Ende verbunden ist. Dieses Ende entspricht gleichzeitig dem Messpunkt für die Temperatur. Die gemessene Thermospannung korreliert dabei mit der Temperaturdifferenz zwischen den Leiterenden. Die Kombination aus einer bekannten Referenztemperatur am einen Ende des Leiterpaares, sowie aus der gemessenen Thermospannung, erlaubt schließlich die Berechnung der Temperatur an der Messspitze [47, 48].

In der Forschung beschäftigen sich die meisten Arbeiten zur gedruckten Temperatursensorik mit Einzelsensoren. Dies ist insbesondere der Fall, wenn es sich um die Entwicklung neuer Materialien handelt. Temperatursensor-Arrays zur Darstellung einer Temperaturverteilung, wie diese auch in der vorgelegten Arbeit untersucht werden, sind hingegen seltener Gegenstand der Wissenschaft. Um eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung zu ermöglichen, sind in Tabelle 1.1 vergleichbare Arbeiten zum Thema gedruckter Temperatursensor-Arrays zusammengetragen. Der überwiegende Teil der aufgeführten Temperatursensor-Arrays beruht auf dem Thermistorprinzip. Diese bieten den Vorteil, dass eine höhere

Sensitivität erreicht werden kann und mehr Einflussparameter bei der Entwicklung zur Verfügung stehen. Zur Herstellung wird überwiegend Siebdruck eingesetzt, da dieser ein etablierter und gut zu kontrollierender Druckprozess ist. Ein Vorteil von Inkjet wiederum ist der maskenlose Digitaldruck, der eine einfache Skalierung erlaubt. Bei der Materialauswahl spielt vor allem die Robustheit und Selektivität eine entscheidende Rolle. Die verwendeten Thermistormaterialien beschränken sich, wie in Tabelle 1.1 deutlich zu sehen ist, auf eine relativ kleine Materialauswahl. Bei PEDOT:PSS handelt es sich um einen einfach zu modifizierenden Ausgangsstoff, der aufgrund seiner Unbedenklichkeit als biokompatibel gilt [56]. Kohlenstoffbasierte Materialien eignen sich gut, um als Füllmaterial in verschiedenen Polymermatrizen eingesetzt zu werden. Dadurch können die elektrischen Eigenschaften des Materials präzise angepasst werden. Bei reinen Widerstandsthermometern oder Thermoelementen werden dagegen Metalle oder Metalllegierungen genutzt, wobei die Materialwahl meist auf Silber fällt. Aber auch Gold- und Kupfertinten werden häufig eingesetzt. Die bei der Herstellung erzielte Sensorpixelgröße und auch die damit zusammenhängende Sensordichte ist durch das Fertigungsverfahren limitiert oder wird durch das gewählte Layout vorgegeben. In der Übersicht wird deutlich, dass das in dieser Arbeit entwickelte Temperatursensor-Array die im Vergleich veröffentlichten Sensorarrays in nahezu allen Kenngrößen übertrifft.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung eines vollständig gedruckten Temperatursensor-Arrays in neun Kapiteln beschrieben. Im Anschluss an die Einleitung folgt in Kapitel 2 eine Einführung in die Grundlagen rund um das Thema Temperatur. Dazu wird zunächst die Frage geklärt, was unter Temperatur verstanden und wie diese definiert wird. Zur Bestimmung der Temperatur wurden im Laufe der Zeit viele Messmethoden für verschiedene Anwendungsfälle entwickelt. Eine kleine Übersicht über etablierte Messverfahren soll einen Einblick in die Temperatursensorik geben. Ein besonderer Schwerpunkt wird auf flüssigprozessierte Sensoren gelegt, sowie Konzepte für die Herstellung von zweidimensionalen Temperatursensor-Arrays näher beleuchtet. Das Kapitel legt außerdem die physikalischen Grundlagen zum Wärmetransport und der elektrischen Leitfähigkeit. Da das Arbeitsprinzip des hier vorgestellten Sensors auf der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit beruht, wird dieser Zusammenhang speziell behandelt. Hierzu zählt auch die Einführung der mathematischen Modelle zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit von Thermistoren, welche die Basis für die Kalibrierung des entwickelten Sensors bilden.

Kapitel 3 erläutert die Herstellungsmethoden die zur Realisierung des Sensorarrays erforderlich sind. Für die Druckverfahren werden zunächst Siebdruck und Aerosol-Jet-Druck vorgestellt. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Aerosol-Jet geschenkt, da dieser die entscheidende Komponente für die Herstellung des Sensorarrays ist. Da zur Vorbehandlung der Substrate ein Rotationsbeschichtungsschritt erforderlich ist, erfolgt eine kurze Einführung in dessen Funktionskonzept. In der Regel schließen sich an jede Flüssigprozessierung ein oder mehrere Nachbehandlungsschritte an. Die relevanten Begrifflichkeiten werden daher erklärt, wobei photonisches Sintern aufgrund seiner zentraler Bedeutung für diese Arbeit ausführlich dargestellt wird.

Zur Charakterisierung des Sensors werden einige Analysemethoden verwendet, die Anfang Kapitel 4 erklärt werden. Zur Kontrolle und Einordnung des Druckergebnisses ist vor allem die Kenntnis zur Oberflächenbeschaffenheit wichtig, weshalb das taktile Profilometer während des Druckens und das Weißlichtinterferometer nach dem Druck eingesetzt werden. Der Schichtquerschnitt wird mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops dargestellt. Das Kapitel beinhaltet weiterhin eine kurze Beschreibung der verwendeten Substrate und Drucktinten.

Um den Sensor zur Temperaturmessung verwenden zu können, muss außerdem eine Ausleseelektronik entwickelt und eine Kalibrierung implementiert werden. Kapitel 5 beschäftigt sich mit dieser Thematik und

stellt die zwei im Rahmen dieser Arbeit konstruierten Ausleseelektroniken vor. Bei der ersten Version ist vor allem ein großer Messbereich von Interesse, während der Schwerpunkt bei der zweiten Version auf die Auslesegeschwindigkeit und Fehlerkompensation gelegt wird. Zur Interpretation der Messergebnisse ist außerdem eine Kalibrierung des Sensors erforderlich. Neben der individuellen Kalibrierung jedes einzelnen Sensorpixels, steht außerdem ein zeitoptimierter Kalibriervorgang zur Verfügung.

In Kapitel 6 wird die Entwicklung des Temperatursensor-Arrays ausführlich beschrieben und die einzelnen Evolutionsstufen bis zur endgültigen Version dargestellt. Zur Charakterisierung des Temperatursensor-Arrays wird ein spezieller Messplatz aufgebaut. Dieser erlaubt das automatische Abfahren von Temperaturprofilen, während das Sensorarray ausgelesen wird. Die dabei gewonnen Messdaten werden daraufhin zur Kalibrierung des Sensors verwendet. Umgekehrt dienen im späteren Verlauf die ermittelten Kalibrierfunktionen zur Interpretation der Messungen. Als Anwendung und Demonstration wird der folienbasierte Sensor zur Nachverfolgung und Analyse eines Laserstrahl verwendet. In einer Simulation wird die Messung anschließend nachgebildet und die Resultate verglichen.

Zur Messung der Wärmeentwicklung eines Prozessors wird das Temperatursensor-Array an die Außenmaße einer CPU angepasst und diese direkt auf einen Prozessorkühler gedruckt. Für die Integration in das Computersystem sind nur minimale Änderungen am System erforderlich, sodass die Temperaturverteilung des Computerprozessors unter realitätsnahen Bedingungen gemessen werden kann. Diese Einsatzmöglichkeit für das Temperatursensor-Array wird in Kapitel 7 dargestellt. Zunächst werden einige Anwendungsszenarien vorgestellt und die Realisierung der Messumgebung erläutert. Die durch Änderungen am Sensordesign bedingten Anpassung am Herstellungsprozess werden dazu genauer erläutert. Im Gegensatz zur Messung mit der Sensorfolie musste die Kalibrierung des Sensors im Computersystem erfolgen. Dazu wird eine vereinfachte Kalibrierung implementiert und auf die Messung angewendet. Schließlich kann mit dem Sensor die zeitliche Temperaturentwicklung mitverfolgt und aus dem Temperaturprofil die Position der Prozessorkerne identifiziert werden.

Kapitel 8 bietet einen Überblick über die erlangten Erkenntnisse und gibt einen Ausblick für Vorschläge für mögliche zukünftige Untersuchungen oder Anwendungen.



## 2 Grundlagen

*Zum Verständnis dieser Arbeit werden in diesem Kapitel einige relevante Grundlagen eingeführt. Dies umfasst zunächst eine Definition und Beschreibung der physikalischen Größe Temperatur. Die Messung der Temperatur ist eine der am häufigsten erfassten technisch-physikalischen Messgrößen. Entsprechend sind die Möglichkeiten zur Bestimmung der Temperatur vielfältig. Im Folgenden ist eine Übersicht und kurze Beschreibung gängiger Verfahren aufgelistet. Die Realisierung von digitalen Temperatursensoren ist nicht nur auf klassische Herstellungsmethoden beschränkt, sondern wird aufgrund der fortschreitenden Entwicklung von gedruckter Elektronik zunehmend auch durch solche hergestellt. Im Rahmen der gedruckten Temperatursensorik sind drei Messprinzipien am häufigsten anzutreffen, weshalb diese gesondert dargestellt werden. Besonderen Wert wird auf Thermistoren gelegt, da der in dieser Arbeit entwickelte Temperatursensor auf diesem Messkonzept beruht. Aus historischer und technischer Sicht wurden im Laufe der Zeit verschiedene mathematische Modelle zur Beschreibung des Thermistorverhaltens verwendet. Da ein solches Modell zur Auswertung der Messwerte angewendet wird, werden diese Modelle eingeführt und eingeordnet. Eine Besonderheit im Vergleich mit anderen gedruckten Temperatursensoren, ist die Möglichkeit zur Detektion einer zweidimensionalen Temperaturverteilung. Im diesem Zusammenhang spielen vor allem zwei prominente Matrixstrukturen eine wichtige Rolle. Diese werden im Detail erklärt und die jeweiligen Vor- und Nachteile dargestellt. Zum Abschluss des Kapitels werden die mathematische Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge vorgestellt. Durch diese Funktionen werden schließlich die gedruckten Temperatursensoren charakterisiert. Die Erklärungen orientieren sich an folgender Fachliteratur [57, 58, 59, 60, 61, 62], falls nicht anders vermerkt.*

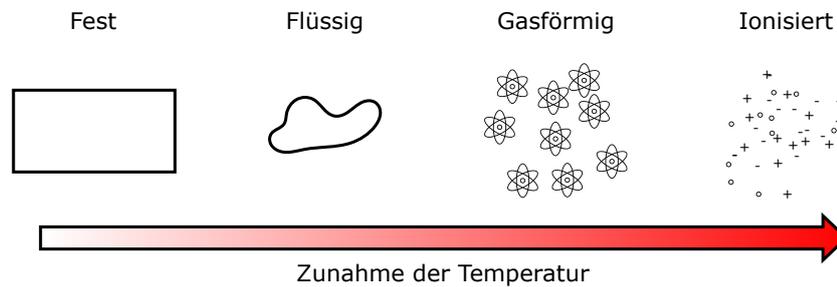
### 2.1 Die Temperatur

Die Messung der Temperatur ist ein fundamentaler Vorgang im alltäglichen Leben und der Wissenschaft. Temperatur definiert ein Maß dafür, ob etwas beispielsweise heiß oder kalt ist. In diesem Kapitel wird zunächst die Frage geklärt, was unter Temperatur zu verstehen ist und wie diese durch eine empirische Temperaturskala festgelegt wird. Im zweiten Schritt werden verschiedene Möglichkeiten zur Messung vorgestellt. Die Messmethoden sind dabei stark auf das jeweilige Anwendungsgebiet und den Temperaturmessbereich zugeschnitten. Heute kommen im Zuge der gedruckten Elektronik neue Möglichkeiten und Anwendungsfelder hinzu, was letztendlich auch zu dieser Arbeit führt. Da die Temperatur nur über indirekte Wege gemessen werden kann, muss die Beziehung zur Messgröße zumeist durch einen mathematischer Zusammenhang ausgedrückt werden. Dieser wird explizit für Thermistoren, das hier verwendete Messprinzip des gedruckten Temperatursensor-Arrays, vorgestellt und erläutert.

#### 2.1.1 Das Verständnis von Temperatur

Die Temperatur ist zunächst eine physikalische Zustandsgröße, die ein Verhältnis von einem kalten zu einem heißen Wärmereservoir beschreibt. Sie ist eng mit dem Begriff Wärme verknüpft, welche die durchschnittliche kinetische bzw. thermische Energie in einem Teilchensystem beschreibt. Gleichzeitig ist die Temperatur

fest mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften einer Substanz verknüpft. Dies ist schematisch in



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung der Auswirkung einer Temperaturzunahme auf den Aggregatzustand einer Substanz. Mit der Temperatur nimmt die kinetische Energie im Teilchensystem zu, sodass die Ordnung der Atome zunehmend aufgelöst wird und letztendlich ein Plasma - Gemisch aus Ionen (geladene, freie Atome) und Elektronen - entsteht.

Abbildung 2.1 dargestellt und zeigt die Umwandlung des Aggregatzustands einer Substanz mit zunehmender Temperatur. Die Ursache liegt in der Zunahme der kinetischen Energie mit der Temperatur. In einem Feststoff sind die Atome zunächst an ihren Gitterplätzen verankert und führen lediglich lokal begrenzte Bewegungen aus. Steigt die Temperatur bricht die Ordnung zusammen und die Atome können sich im Verbund zu einander verschieben. Die Substanz wechselt in einen flüssigen Zustand. Steigt die Temperatur und somit die Energie im Material weiter an, bricht die Bindung der Atome untereinander auf. Es entsteht ein ungeordnetes Gas. Erreicht die Temperatur schließlich eine kritische Marke, steigt die kinetische Energie auf ein Maß, sodass es zu Kollisionen zwischen den Atomen kommt. Durch die Stoßionisation werden die Elektronen von den Atomen getrennt. Mit dem Verlust von Elektronen trägt das Atom selbst eine Ladung und wird als Ion bezeichnet. Das Gemisch aus Ionen und Elektronen wiederum ergibt ein Plasma. Somit ist Wärme ein Maß für die im Teilchensystem gespeicherte innere Energie im Form von kinetischer Energie, wobei der Grad der Bewegung je nach Zustand variieren kann. Werden nun zwei verschiedene Aggregatzustände eines Stoffes miteinander verglichen, beschreibt die Temperatur eine relative Beziehung der Energien zwischen den Zuständen zueinander. Bei der Temperaturmessung wird ein Bezugspunkt als fest definiert angenommen, während der Messpunkt relative dazu betrachtet wird. Dies ist die Grundlage für die Definition einer Temperaturskala, wie dies später erklärt wird. Außerdem stellt diese Betrachtung klar, dass die Temperatur auch ein Maß für die innere Energie eines Teilchensystems ist.

Die Beschreibung der Temperatur ist über verschiedene physikalische Wege möglich. Grundlage für die Herleitung und Definition ist die Thermodynamik, die hier in kurzer Form eingeführt werden soll. Als Grundprinzip gelten vier Hauptsätze:

- **0. Hauptsatz:** Dieser beschreibt das thermodynamische Gleichgewicht von gekoppelten Systemen und besagt, dass sich Temperatur, Druck und Volumen untereinander angleichen.
- **1. Hauptsatz:** Dieses Gesetz impliziert, dass die Energie in einem geschlossenen System immer konstant sein muss. Deshalb ist hierbei vom Energieerhaltungssatz die Rede. Die vorhandene Energie lässt sich zwar in verschiedene Formen umwandeln, bleibt in Summe jedoch immer erhalten. Dies wird durch  $\Delta E = \Delta W + \Delta Q$  ausgedrückt, wobei  $\Delta E$  der inneren Energie des Systems,  $\Delta W$  der verrichteten Arbeit und  $\Delta Q$  der Wärme entspricht.
- **2. Hauptsatz:** Dieser ergänzt letztendlich den 1. Hauptsatz. Zunächst wird die sogenannte Entropie definiert als  $\Delta S = \Delta Q/T$ , wobei diese ein Maß für die Unordnung in einem System ist. Die Entropie  $S$  kann in einem geschlossenen System entweder gleich bleiben ( $\Delta S = 0$ ), dann wird von einem reversiblen Prozess gesprochen oder bei einem irreversiblen Prozess zunehmen ( $\Delta S > 0$ ). Aus diesem Zusammenhang folgt, dass der Energieübertrag immer vom warmen zum kalten Objekt

verläuft. Die zweite Kernaussage ist, dass Wärme niemals vollständig in Arbeit umgewandelt werden kann. Weshalb der Wirkungsgrad einer Wärme-Kraft-Maschine immer  $< 100\%$  ist.

- **3. Hauptsatz:** Dieser besagt, dass ein System niemals den absoluten Nullpunkt erreichen kann. Es kann sich diesem lediglich annähern.

Die Hauptsätze der Thermodynamik beschreiben somit die physikalischen Regeln, die bei Energieumwandlung zum Tragen kommen und definieren den mathematischen Rahmen. In einem geschlossenen System lässt sich daher aus dem 1. und 2. Hauptsatz der Grundsatz der Temperatur herleiten, wobei die Arbeit  $W$  durch den Druck  $p$  und die Volumenänderung  $\Delta V$  definiert und durch  $\Delta W = p \cdot \Delta V$  ausgedrückt wird:

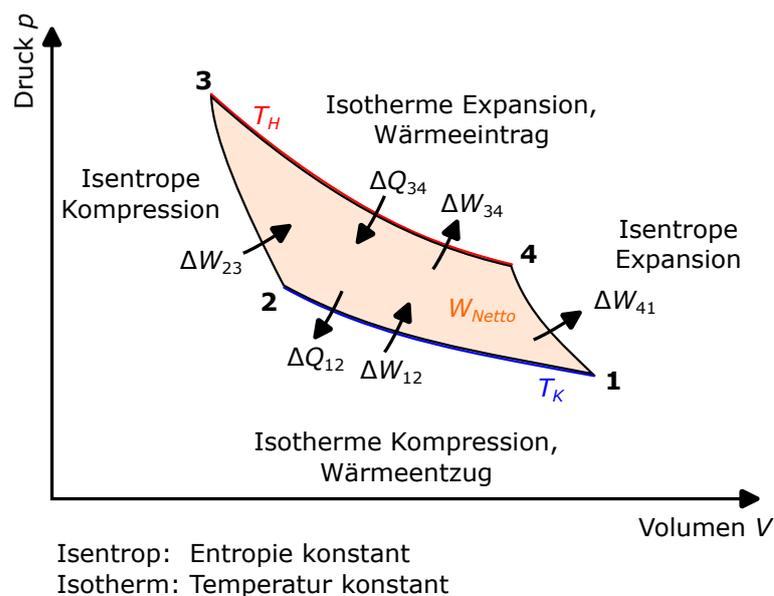
$$\Delta E = \Delta W + \Delta Q \quad (2.1)$$

$$= p \cdot \Delta V + T \cdot \Delta S. \quad (2.2)$$

Somit stellt die Temperatur letztendlich eine Beziehung zwischen den beiden Zustandsgrößen der Inneren Energie  $E$  und der Entropie  $S$  her. Für die Gültigkeit dieser Aussage müssen allerdings die externen Faktoren konstant bleiben, wie in diesem Fall das Volumen  $V$ :

$$T = \left( \frac{\Delta E}{\Delta S} \right)_{V=\text{konst}}. \quad (2.3)$$

Neben den Hauptsätzen der Thermodynamik ist das Verständnis des Carnot-Prozesses für die Definition einer Temperaturskalen relevant. Der Carnot-Prozess repräsentiert ein idealisiertes Gedankenexperiment, bei dem in einem reversiblen Prozess ( $\Delta S = 0$ ) Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann. Es wird dabei häufig von einer Wärme-Kraft-Maschine gesprochen. Grundlage ist ein ideales Gas, das diesen Prozess durchläuft. Ein ideales Gas stellt ein vereinfachtes, idealisiertes Modell dar, demzufolge sich die Gasteilchen vollständig frei und unabhängig bewegen können. Außerdem weisen die Teilchen selbst kein Volumen auf und die Energie ist ausschließlich in Form von Bewegungsenergie (translatorisch) gespeichert. Der Carnot-



**Abbildung 2.2:** Darstellung des Carnot-Prozesses, der als idealisiertes Gedankenexperiment mit Hilfe einer Wärme-Kraft-Maschine in einem reversiblen Prozess Wärme in Arbeit umwandelt. Dazu wird von einem Wärmereservoir mit der Temperatur  $T_H$  Energie in Form von Wärme  $Q$  zu einem Kältereservoir mit der Temperatur  $T_K$  transferiert und dabei Arbeit  $W$  verrichtet. Der Flächeninhalt entspricht letztendlich der effektiv verrichteten Arbeit  $W_{\text{Netto}}$  unter dem Einsatz von Wärme  $Q$ .

Prozess ist in Abbildung 2.2 visualisiert, wobei der Druck  $p$  über das Volumen  $V$  aufgetragen wird. Der Kreisprozess besteht aus vier Stufen, das heißt nach einem Durchlauf befindet sich der Prozess wieder am Ausgangspunkt. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte kurz beschrieben:

- **1-2:** Es handelt hierbei um einen isothermen (Temperatur  $T = \text{konstant}$ ) Prozessschritt. Während Arbeit verrichtet und das Gas komprimiert wird, muss dem System Wärme entzogen werden, da es andernfalls zu einem Temperaturanstieg kommen würde. Bei der Kompression verringert sich das Volumen  $V$  und der Druck  $p$  nimmt zu.
- **2-3:** Hier wird das Gas unter Verrichtung von Arbeit weiter komprimiert, wobei das Volumen  $V$  abnimmt und der Druck  $p$  weiter zunimmt. Es wird von isentroper (Entropie  $S = \text{konstant}$ ) oder adiabatischer Kompression gesprochen. Adiabatisch bedeutet, dass es zu keinem Wärmeaustausch mit der Umgebung kommen kann, weshalb infolgedessen die Temperatur  $T$  zunimmt.
- **3-4:** Hierbei kommt es unter der Aufnahme von Wärme zu einer Expansion des Gases. Durch die Expansion wird Arbeit verrichtet. Unter isothermen Bedingungen nimmt das Volumen  $V$  zu und der Druck  $p$  ab.
- **4-1:** Im letzten Schritt und der Rückkehr zum Ausgangspunkt, kommt es zu einer isentropen/adiabatischen Expansion des Gases. Auch hierbei nimmt das Volumen  $V$  weiter zu und der Druck  $p$  reduziert sich. Durch eine Expansion wird Arbeit verrichtet. Außerdem nimmt währenddessen die Temperatur  $T$  ab.

In diesem idealisierten Modell kann Wärme verlustfrei in Arbeit umgewandelt werden, weshalb der Prozess als reversibel bezeichnet wird. Auch umgekehrt ist der Prozess möglich, wodurch unter dem Einsatz von Arbeit Wärme von einer kalten Seite zur warmen Seite gepumpt werden kann. Man muss allerdings berücksichtigen, dass dies ein Modell ist und in der Realität jede Maschine verlustbehaftet ist. Aus der Thermodynamik lässt sich der sogenannte Carnot-Wirkungsgrad für den Prozess herleiten. Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik gilt

$$\Delta E = \Delta W + \Delta Q. \quad (2.4)$$

Da es sich um einen Kreisprozess handelt und der Ausgangspunkt wieder erreicht wird, entspricht die innere Energie beim Integrieren über den gesamten Prozess  $\Delta E = 0$ . Daraus folgt, dass bei Betrachtung eines Zyklus des Carnot-Prozesses  $\Delta W = -\Delta Q$  gelten muss. Das bedeutet, dass die eingesetzte Wärme vollständig in Arbeit umgesetzt wird und umgekehrt. Im Schaubild 2.2 entspricht die verrichtete Arbeit  $W_{Netto}$  dem Flächenintegral der von der Kurve umschlossenen Fläche. Somit ergibt sich für den Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses  $\eta_c$ , der durch das Verhältnis der nutzbaren Arbeit  $W_{Netto}$  und der zugeführten Wärme  $Q_{34}$  definiert wird:

$$\eta_c = \frac{|W_{Netto}|}{Q_{34}}. \quad (2.5)$$

Nimmt man darüber hinaus an, dass die eingesetzte Wärme in Arbeit umgesetzt wird, kann dies durch  $W_{Netto} = Q_{Netto}$  ausgedrückt werden. Zusätzlich ist aus dem 2. Hauptsatz die Beziehung  $\Delta Q = T \cdot \Delta S$  bekannt, womit sich schließlich die Gleichung 2.5 des Carnot-Wirkungsgrads  $\eta_c$  umschreiben lässt zu:

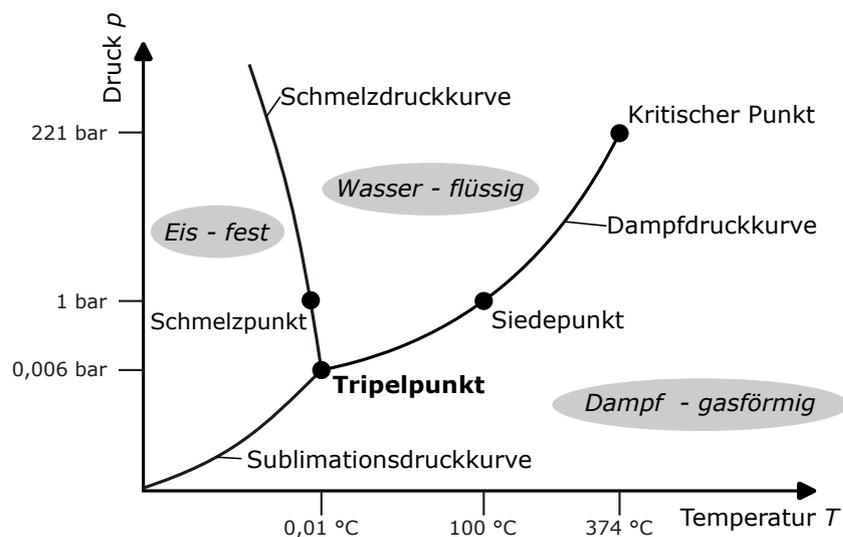
$$\eta_c = \frac{Q_{Netto}}{Q_{34}} = \frac{Q_{34} - Q_{12}}{Q_{34}} = \frac{T_H - T_K}{T_H}. \quad (2.6)$$

Bei Betrachtung dieser Gleichung wird deutlich, dass der Wirkungsgrad immer kleiner 100 % sein muss. Die Ursache liegt in der Begrenzung der erreichbaren Temperaturen. So kann weder eine unendlich hohe

Temperatur, noch der absolute Nullpunkt erreicht werden (3. Hauptsatz). Aus dem Carnot-Wirkungsgrad (Gleichung 2.6) lässt sich schließlich die Beziehung zwischen Temperatur und Wärme ableiten:

$$\frac{Q_{34} - Q_{12}}{Q_{34}} = \frac{T_H - T_K}{T_H} \Leftrightarrow \frac{Q_{12}}{Q_{34}} = \frac{T_K}{T_H}. \quad (2.7)$$

Aus diesem Zusammenhang lässt sich durch die Festlegung von Temperaturfixpunkten eine Temperaturskala definieren. Dazu sind zwei Fixpunkte im System nötig, wobei die untere Begrenzung durch den Nullpunkt aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik folgt. Der obere Fixpunkt wird durch den Tripelpunkt von Wasser festgelegt, der laut der 13. Generalkonferenz von 1967 bei  $T_{TP} = 273,16 \text{ K}$  liegt. Die internationale Maßeinheit der Temperatur ist das Kelvin (K). Durch die beiden Fixpunkte ist die Größe eines Kelvins exakt definiert. Bei einem Tripelpunkt handelt es sich um einen Gleichgewichtszustand eines einzigen Stoffes bei



**Abbildung 2.3:** Darstellung des Phasendiagramms von Wasser. Abhängig von Druck  $p$  und Temperatur  $T$  durchläuft Wasser verschiedene Zustände. Die Übergänge werden durch Phasengrenzlinien dargestellt. Die Definition der Temperatur ist an den Tripelpunkt von Wasser geknüpft.

einem definierten Druck  $p$  und definierter Temperatur  $T$ . Die Zustandsänderungen eines Materials werden in einem Phasendiagramm dargestellt, welches für Wasser in Abbildung 2.3 gezeigt ist. Wasser kann drei Zustände in Form von Eis (fest), Wasser (flüssig) und Wasserdampf (gasförmig) einnehmen. Abhängig vom betrachteten Stoff können auch noch weitere Zustände auftreten. Unter Voraussetzung einer passenden Temperatur und eines passenden Drucks, können am Tripelpunkt alle drei Phasen koexistieren. Im Fall von Wasser liegt der Tripelpunkt bei  $T_{TP} = 273,16 \text{ K}$  und einem Druck  $p = 6,12 \text{ mbar}$ . Im Phasendiagramm sind die Zustände durch Phasengrenzlinien abgetrennt, sodass es beim Überschreiten einer solchen Grenze zu einer Zustandsänderung kommt. Beim kritischen Punkt handelt es sich um einen Extremwert, der durch einen kritischen Druck und eine kritische Temperatur definiert ist. Jenseits dieses Punktes koexistiert die Flüssig- und Gasphase.

Der Zahlenwert hinter dem Tripelpunkt von Wasser ( $T_{TP} = 273,16 \text{ K}$ ) geht auf eine Definition von 1954 zurück, wobei die Temperatureinheit Kelvin auf 1/100 vom Abstand zwischen dem Schmelzpunkt ( $T = 273,15 \text{ K}$ ) und dem Siedepunkt ( $T = 373,15 \text{ K}$ ) von Wasser bei Normaldruck ( $p = 1,01 \text{ bar}$ ) festgelegt wurde. Neben der reinen Definition des Kelvin haben sich im Laufe der Zeit weitere Temperaturskalen entwickelt. Das prominenteste Beispiel ist die Celsiusskala, die sich gemäß  $T_C = T_K - 273,15$  von der Kelvinskala ableitet.

Zur Kalibrierung der Temperaturskala wurde 1990 die Internationale Temperaturskala ITS-90 erlassen.

Diese definiert eindeutig welche Messverfahren für welchen Temperaturbereich verwendet werden müssen und legt zur Kalibrierung Temperaturreferenzwerte mithilfe von Materialfixpunkten fest. Dazu existiert eine Liste mit Materialien und dazugehörigen Temperaturwerten bei denen ein Gleichgewichtspunkt im Phasendiagramm erreicht wird. Es werden Materialien gewählt, deren Phasenzustandspunkte gleichmäßig über einen Temperaturbereich von 0,65 K bis 1357,77 K verteilt sind [63]. Dazu wird ein stark verkürzter Auszug von festgelegten Materialfixpunkten gemäß ITS-90 in Tabelle 2.1 aufgelistet. Außerdem enthält die ITS-90

**Tabelle 2.1:** Verkürzte Liste der Fixpunkte nach ITS-90 mit Temperaturreferenzwerten. [63]

Phasenzustand	$T$ [K]
Dampfdruck Helium	3 – 5
Tripelpunkt Neon	24,56
Tripelpunkt Wasser	273,16
Erstarrungspunkt Zinn	505,07
Erstarrungspunkt Aluminium	933,47
Erstarrungspunkt Kupfer	1357,77

klare Regeln wie über die Temperaturreferenzwerte interpoliert werden kann, um das gesamte messbare Temperaturspektrum abzudecken.

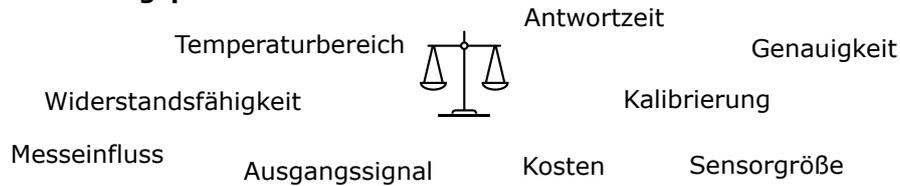
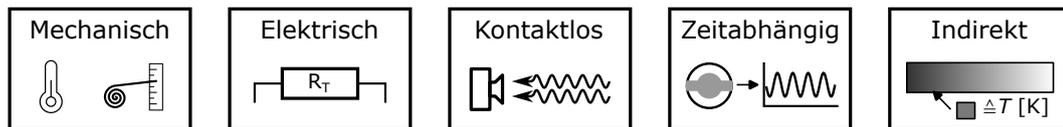
Anders als man im Alltag bei der Verwendung der Temperatur zunächst vermutet, steckt hinter der Definition der Temperaturskala erheblich mehr Aufwand. Auch historisch erwies sich die Festlegung auf eine Konvention als schwierig, sodass es erst 1927 zu einer international anerkannten Definition kam. Heute hat in Deutschland die Physikalisch-Technische Bundesanstalt den Auftrag Temperaturmessgeräte zu eichen und zu kalibrieren.

## 2.1.2 Standard-Temperaturmessverfahren

Die Messung der Temperatur kann nur in einer indirekten Art und Weise erfolgen. Dazu wird zunächst ein alternativer temperaturabhängiger Kennwert gemessen und dieser anschließend über einen bekannten physikalischen Zusammenhang in den Temperaturwert umgewandelt. Die gemessenen Kennwerte können durch verschiedene Messgrößen repräsentiert werden und sind abhängig vom Messverfahren. Allen ist gemein, dass sie sich unter Temperatureinfluss verändern, wie zum Beispiel:

- Längenänderung aufgrund von Wärmeausdehnung
- Volumenänderung einer Flüssigkeit oder eines Gases
- Widerstandsänderung eines elektrischen Leiters
- Änderung der Thermospannung bei Materialkompositionen
- Änderung der spektralen Emission verschiedener Substanzen.

Auf dieser Grundlage basieren eine Vielzahl verschiedener Messverfahren. Abhängig von der Art der Messung lassen sich drei Gruppen erstellen: 1) Bei der invasiven Messtechnik wird der Messfühler in das zu messende System eingeführt. Dies kann zum Beispiel ein Stabthermometer sein, das in kochendes Wasser gehalten wird. Das gemessene System wird allerdings dabei selbst mit verändert. 2) Halb-invasive Verfahren wiederum stehen auch im unmittelbaren Kontakt mit dem System, allerdings wird nur die Oberfläche zur

**Anforderungsprofil:****Messverfahren:**

**Abbildung 2.4:** Bei der Wahl des passenden Temperaturmessverfahrens spielen verschiedene Kriterien eine wichtige Rolle. Diese müssen für den jeweiligen Fall abgewogen werden, wodurch sich meist die Auswahl der möglichen Verfahren einschränkt. Grundsätzlich lassen sich die Messverfahren je nach technischem Funktionsprinzip kategorisieren.

Messung modifiziert/kontaktiert. Dies könnte zum Beispiel ein Anstrich mit einer thermochromen Farbe sein, die ihre Farbe mit der Temperatur verändert. 3) Bei nicht-invasiven Messverfahren, wird die Temperatur über die externe Beobachtung des Systems bestimmt. Dies kann beispielsweise durch die Erfassung von Wärmestrahlung mit der einer Wärmebildkamera geschehen.

Bei den invasiven Messmethoden spielt auch die Kopplung des Messfühlers an des System eine wichtige Rolle. Dazu muss Wärmeenergie vom System zum Messsystem überführt werden und eine Temperaturangleichung stattfinden. Die gegenseitigen Beeinflussung der beiden System muss als Fehlerquelle bei Messung mitberücksichtigt werden.

Für die Wahl des adäquaten Messverfahrens müssen verschiedene Anforderungen erfüllt und teilweise die Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden. Dazu sind in Abbildung 2.4 mögliche Kriterien für die Entscheidungsfindung aufgeführt. Da sich gegebenenfalls einige der Anforderungen im konkreten Fall widersprechen, muss ein passender Kompromiss gefunden werden. Bei der Vorauswahl ist vor allem die Anwendungstemperatur und der erforderliche Messbereich relevant. Des Weiteren stellt sich die Frage, mit welcher Genauigkeit die Temperatur erfasst werden muss und ob es sich um eine zeitkritische Messung handelt. Im Bezug auf die Handhabung müssen die Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit des Sensors gegen Umweltbedingungen am Einsatzorts, die Sensorgröße und die Voraussetzungen für eine Kalibrierung definiert werden. Auch die Weiterverarbeitung des Ausgangssignals muss gewährleistet sein. In Abbildung 2.4 ist eine Auswahl möglicher Entscheidungskriterien aufgelistet. Die verschiedenen Messprinzipien lassen sich zudem in fünf Kategorien unterteilen, abhängig von dem physikalischen Prinzip, das als Grundlage dient. Im Folgenden werden für jede Gruppe einige Messverfahren genannt und diese kurz erläutert:

- **Mechanische Arbeitsweise:** Zu dieser Kategorie zählt das klassische Gas- / Flüssigkeitsthermometer, wobei es bei einer Temperaturänderung zu einer Volumenänderung eines Gases oder einer Flüssigkeit kommt, was sich auf den Füllstand im Messrohr auswirkt. Anhand einer Skala repräsentiert der Füllstand die gemessene Temperatur. Unter diese Kategorie fallen außerdem Bimetall- und Stab-Ausdehnungsthermometer. Hierbei wird die Wärmeausdehnung des jeweiligen Materials ausgenutzt. Beim Stab-Ausdehnungsthermometer wird die Größenänderung unmittelbar durch eine Skala in eine Temperatur übersetzt. Das Bimetallthermometer nutzt hingegen zwei verschiedene fest miteinander verbundene Materialstreifen. Durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten kommt es zu einer Verbiegung, wobei das Ausmaß der Verformung temperaturabhängig ist.
- **Temperaturabhängige Materialeigenschaft:** Bei diesem Verfahren wird eine temperaturabhängige Materialeigenschaft, wie beispielsweise Form und Farbe, zur Bestimmung der Temperatur ausgenutzt.

Der Segerkegel ist ein Prüfkörper, der zum Nachweis von sehr hohen Temperaturen zwischen 560 °C und < 2000 °C zum Einsatz kommt. Dieser ist in verschiedenen Temperaturklassen erhältlich und wird beispielsweise in Brennöfen verwendet. Beim Erhitzen verformt sich der Kegel und neigt sich zur Seite. Sobald die Spitze den Boden berührt, hat die Brennkammer die Referenztemperatur erreicht. Bei Temperaturmessfarben, sogenannten thermochrome Farben, werden durch Temperaturveränderung Farbumschläge verursacht. Bei den meisten dieser Farben ist der Prozess irreversibel, sodass der Messwert nach dem Abkühlen erhalten bleibt. Teilweise kennt man solche Temperaturmessstreifen vom Versandhandel, die dort eingesetzt werden, um die Einhaltung Kühlkette von Lebensmitteln zu kontrollieren.

- **Änderung einer elektrischen Größe:** Bei dieser Kategorie wird beispielsweise der elektrische Widerstand oder die Spannung eines Sensors ausgelesen. Aufgrund der Möglichkeit das Signal digital weiterzuverarbeiten, eignen sich diese Art von Sensoren besonders für den industriellen Einsatz. Das Widerstandsthermometer und das Thermoelement sind die bekanntesten Vertreter und am meisten verbreitet. Beim Widerstandsthermometer verursacht eine Temperaturänderung die Veränderung der Leitfähigkeit des Leitermaterials. Aus physikalischer Sicht sind hierfür Leiter und Halbleiter als Material geeignet. Beruht der Sensor auf der Verwendung von Halbleitern, wird von Thermistoren gesprochen, auch wenn die Messmethode die gleiche ist. Hierbei wird außerdem zwischen Heißeiter, bei dem der Widerstand mit der Temperatur abnimmt und Kaltleiter bei denen mit zunehmender Temperatur der Widerstand zunimmt, unterschieden.

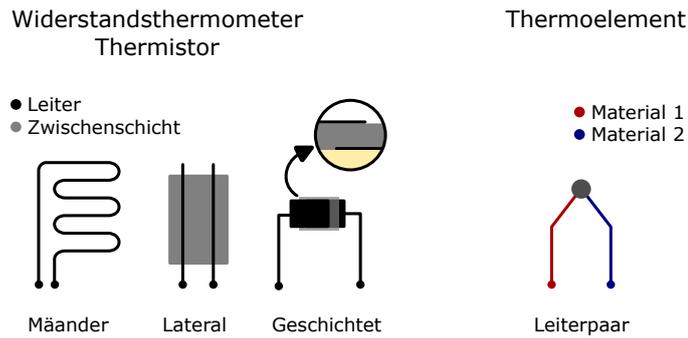
Das Thermoelement besteht aus einem Leiterpaar mit zwei unterschiedlichen Materialien, die an einem Ende fest verbunden sind. Durch eine Temperaturdifferenz entlang des Leiters entsteht eine elektrische Spannung, auch Thermospannung genannt. Die Spannung ist äquivalent zu der Temperaturdifferenz zwischen dem offenen und verbundenen Leiterpaarende. Damit ein Thermoelement als Temperatursensor eingesetzt werden kann, muss die Referenztemperatur auf der Gegenseite des Leiterpaars bekannt sein. Diesen Nachteil machen die Sensoren dadurch wett, dass sie sehr günstig und robust sind, sowie einen großen Temperaturmessbereich aufweisen. Entsprechend häufig werden diese eingesetzt.

Beide Messprinzipien werden im nachfolgenden Kapitel 2.1.3 im Zusammenhang mit der Herstellung im Druckverfahren nochmals detailliert erläutert.

- **Frequenzänderungen:** Die Resonanzfrequenz eines piezoelektrischen Schwingquarzes weist eine Temperaturabhängigkeit auf, die zur Temperaturbestimmung verwendet werden kann. Dabei weist das Schwingverhalten ein starkes nichtlineares Verhalten auf, das eine entsprechende Auswertelektronik erfordert. Quarzthermometer sind inzwischen als preiswerte, langzeitstabile und digitale Temperaturmessmethode etabliert.

Für Spezialanwendung unter extremen Umgebungsbedingungen, bei stark lokalisierten Messungen und der Anforderung nach extrem kurzen Latenzzeiten, stellt die faseroptische Temperaturmessung eine Möglichkeit dar. Der eigentliche Sensor ist eine spezielle Glasfaser, deren Eigenschaft (z.B. Absorption, Reflexion, Polarisation, uvm.) temperaturabhängig ist. Durch Auswertung der in der Glasfaser geführten Strahlung, kann schließlich eine Aussage über die einwirkende Temperatur getroffen werden.

- **Strahlungsmessung:** Eine kontaktlose Art die Temperatur zu bestimmen, besteht über die Messung der Wärmestrahlung. Ein solches Strahlungsthermometer wird gewöhnlich als Pyrometer bezeichnet. Hinter dem Messprinzip steckt das Stefan-Boltzmann-Gesetz, das die Strahlungsleistung  $P$  mit der Temperatur gemäß  $P \propto T^4$  in Beziehung setzt. Die emittierte Strahlung wird mit einem geeigneten Empfänger detektiert, wie beispielsweise einer Wärmebildkamera. Je nach emittiertem Wellenlängenbereich sind noch weitere Detektionsmethoden üblich.



**Abbildung 2.5:** Im Bereich der gedruckten Elektronik werden hauptsächlich Widerstandsthermometer/Thermistoren oder Thermoelemente verwendet. Die Abbildung gibt einige Beispiele, wie diese im Druckverfahren realisiert werden können.

Neben den vorgestellten Messmethoden sind noch eine Vielzahl weiterer Verfahren für die Temperaturbestimmung möglich. Besonders für Spezialanwendungen sind teilweise komplexe und kostenintensive Lösungen erforderlich. Außerdem ist die Messgenauigkeit eines Sensors ein wichtiger Faktor, der nicht nur durch das Messprinzip begrenzt, sondern auch physikalische Grenzen und Messbeeinflussungen bestimmt wird.

### 2.1.3 Gedruckte Temperatursensoren

Zur Realisierung der vorgestellten Messmethoden stehen verschiedenste Herstellungsmethoden zur Auswahl. Neben etablierten Verfahren der Halbleiterindustrie, ist die Herstellung von Temperatursensoren durch Druckverfahren von großem Interesse. Fortschritte im Bereich der gedruckten Elektronik, führten auch zu der Entwicklung von komplexeren und teilweise mehrschichtigen Temperatursensoren. Die Druckverfahren werden häufig auch als additive Herstellungsverfahren bezeichnet, da diese die Integration von komplexen Schaltung in/auf bestehende Strukturen erlauben. Gerade im Bereich der gedruckten Elektronik, wozu auch die Arbeit zählt, bieten sich vor allem digitale Temperaturmessverfahren an. Widerstandsmessungen/Thermistoren und Thermoelemente haben sich im Bezug auf Realisierbarkeit mit Druckverfahren im wissenschaftlichen Umfeld etabliert [64, 33]. Die gewählten Sensorstrukturen werden für die Herstellung möglichst einfach gestaltet. In Abbildung 2.5 ist eine Übersicht über die häufigsten Sensorstrukturen für gedruckte Widerstandsthermometer und Thermoelemente gegeben.

Die simpelste Form eines Widerstandsthermometers ist eine Mäanderstruktur (Abbildung 2.5), die aus einer einzigen Materialschicht hergestellt wird. Durch die Verwendung einer längeren Leiterschleife fällt die absolute Widerstandsänderung unter Temperatureinfluss größer aus und vereinfacht die Messung. In der Regel werden dafür nanopartikuläre Metalltinten verwendet. Bei diesen Materialien nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur zu [65, 66, 44]. Durch die Verwendung eines zweiten Materials, lässt sich aufgrund der größeren Materialauswahl die Temperaturabhängigkeit des Sensors stärker beeinflussen. Bei Verwendung eines zweiten Materials wird in der Regel von einem Thermistor gesprochen. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise zwei Sensorstrukturen denkbar. Entweder wird das Zwischenmaterial/Thermistormaterial lateral zwischen zwei Elektroden aufgebracht oder man schichtet es zwischen zwei Elektrodenlagen (Abbildung 2.5). Das Konzept unterscheidet sich hauptsächlich darin, dass der Elektrodenabstand bei der lateralen Bauweise weiter gewählt werden kann. Bei der Temperaturmessung bestimmt maßgeblich das zwischen den Elektroden eingebettete Material die Sensoreigenschaften, da es für den Ladungsträgertransport zwischen den Elektroden sorgt. Dadurch können Sensoren entwickelt werden, die entweder als Heiß- oder Kaltleiter (Negativer Temperatur Koeffizient (NTC) / Positiver Temperatur Koeffizient (PTC)) fungieren. Teilweise kann es auch zu einem Wechsel der Eigenschaften kommen, wenn es mit steigender Temperatur zu einer kritischen Zustandsänderung im Thermistormaterial kommt. Thermistoren können im Vergleich zu

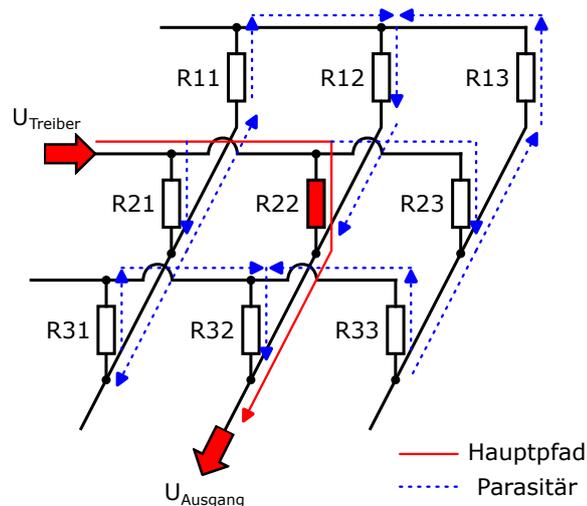
klassischen Widerstandsthermometern eine erheblich stärkere Temperaturabhängigkeit aufweisen. Um diese Eigenschaft weiter zu verbessern, beschäftigt sich die Forschung vor allem mit der Entwicklung neuer Materialien [29, 67, 68, 45, 69]. Je nach Sensor und verwendetem Material muss gegebenenfalls eine Schutzschicht aufgebracht werden, um eine übermäßige Alterung oder Fehlmessungen zu verhindern.

Ein Thermoelement (Abbildung 2.5) ist aus einem Leiterpaar aufgebaut, wobei für jeden Leiter ein anderes Material verwendet wird. In der Regel sind dies Metalle oder Legierungen, wobei inzwischen auch organische Materialien und Halbleiter eingesetzt werden. Für den Druck werden die Materialien in Tintenform überführt. Dazu werden Feststoffe zu einem Pulver vermahlen und in einer Lösung dispergiert. Das Leiterpaar ist an einem Ende verbunden, was gleichzeitig der Messstelle entspricht. Im Gegensatz zu Widerstandsthermometern, wird beim Thermoelement eine Spannung gemessen. Diese Potentialdifferenz wird zwischen den beiden Leiterenden abgegriffen und wird als Thermospannung bezeichnet. Diese ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der Messspitze und den getrennten Leiterenden, wobei die Proportionalitätskonstante abhängig von der Materialpaarung ist. Da lediglich eine Temperaturdifferenz bei der Messung bestimmt werden kann, muss zusätzlich eine Referenztemperatur am getrennten Leiterende gemessen werden. Somit lässt sich erst über die Referenztemperatur und die ermittelte Temperaturdifferenz auf die an der Messspitze vorherrschende Temperatur schließen. Klassisch hergestellte Thermoelemente sind je nach Einsatzzweck und Temperaturmessbereich mit verschiedenen Materialpaarungen erhältlich und sind durch Typenbezeichnungen standardisiert. Ursache für die Ausbildung einer Thermospannung ist der Seebeck-Effekt. Die Stärke und die Wirkungsrichtung des thermoelektrischen Effekts dieser Materialien ist durch den Seebeck-Koeffizienten  $S_{Mat}$  klassifiziert. Es gibt sowohl Materialien mit positiven oder negativen Seebeck-Koeffizienten. Bei einem Thermoelement wird je ein Leiterarm aus einem Material mit einem positiven und je einem mit negativem Seebeck-Koeffizienten hergestellt. Je größer die Differenz zwischen den Seebeck-Koeffizienten ausfällt, desto größer ist die messbare Thermospannung. Diese Spannung entsteht aufgrund des Temperaturgradienten entlang des Leiters. Dieser bewirkt einen Diffusionsstrom der Ladungsträger im Leitermaterial von der heißen zur kalten Seite. Durch die Ladungsverschiebung bildet sich ein entgegengesetztes elektromagnetisches Feld aus, das sich an den Leiterenden als Spannungsdifferenz darstellt. Würden beide Leiterarme aus dem gleichen Material bestehen, würde sich der Effekt zwischen den beiden Temperaturmessstellen aufheben. Da aber zwei verschiedene Materialien mit gegensätzlichen Seebeck-Koeffizienten verwendet werden, entsteht eine deutlich messbare Thermospannung. Aufgrund der verfügbaren Materialauswahl und der verhältnismäßig einfachen Herstellung, lassen sich Thermoelemente gut durch Druckverfahren herstellen [48, 70, 47].

## 2.1.4 Zweidimensionale Temperatursensoren

Die Erfassung einer lokalen Temperatur mit einem einzigen Temperatursensor ist allgegenwärtig. Soll hingegen die Temperaturverteilung auf einer Oberfläche dargestellt werden, steigt die dafür erforderliche Anzahl an Sensoren und die Komplexität erheblich. Eine naheliegende Lösung ist die Verwendung eines optischen Kamerasystems zur Detektion von Wärmestrahlung. Diese Technik ist bereits etabliert und wird auf vielfältige Art eingesetzt. Allerdings benötigt diese Messmethode ein freies Sichtfeld zur Probenoberfläche, was meist eine hohe Platzanforderung mit sich bringt und die Anwendungsfälle einschränkt. Je nach detektiertem Spektralbereich werden Wärmebildkameras im Bezug auf Material, Kühlung und Ausleselektronik schnell herausfordernd. Diese teils speziellen Anforderungen schlagen sich entsprechend im Anschaffungspreis nieder.

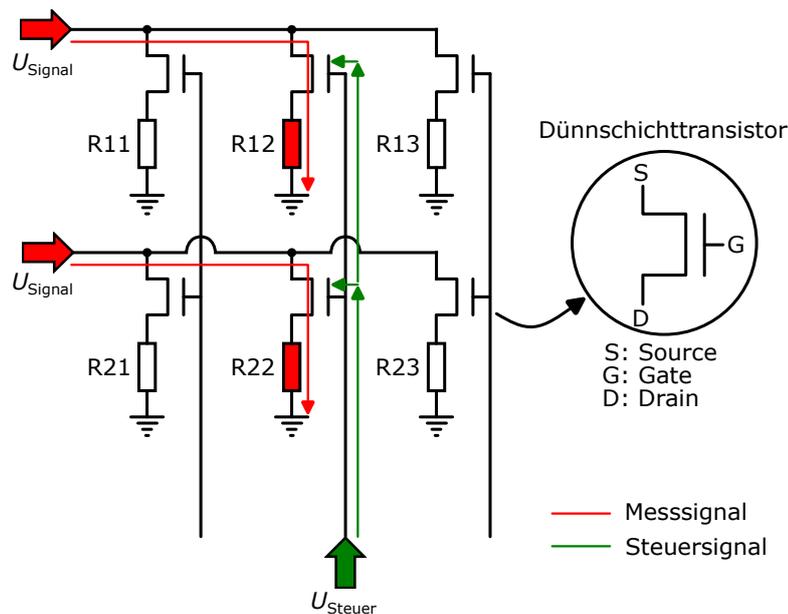
Als alternative Messmethode ist die Idee naheliegend einzelne Temperatursensoren in einem Verbund zur digitalen Erfassung einer Temperaturverteilung anzuordnen. Auch in einer Wärmebildkamera sind letztendlich viele einzelne Fotodioden dicht gepackt in einem Kamerasensor vereint. Nach diesem Prinzip wurde in dieser



**Abbildung 2.6:** Darstellung einer Passiv-Matrix-Struktur bei der Verwendung einer widerstandsbasierten Temperaturmessung. Dabei werden die einzelnen Sensoren, hier als Widerstand dargestellt, in einem Netzwerk angeordnet und jeweils durch zwei Leiterbahnen angebunden. Der auszulesende Sensor wird durch die Auswahl einer Spalte und Reihe definiert. Bei dieser Methode kann es allerdings zu parasitären Strömen über die übrigen Netzwerkknoten kommen, was zu einer Verfälschung des Messwerts führen kann. Angelehnt an [71]; CC-BY 4.0

Arbeit ein vollständig gedrucktes Temperatursensor-Array entwickelt, das viele einzelne Thermistoren in einem Sensornetzwerk kombiniert.

Zur Realisierung werden einzelne Thermistoren strukturiert nebeneinander angeordnet und diese bei der Messung konsekutiv ausgelesen. Ohne weitere Vereinfachungen am System besitzt jeder Sensor mindestens ein Elektrodenpaar, weshalb die Kontaktierung mit einer steigenden Zahl an Sensoren zunehmend zum Problem wird. Der individuelle Platzbedarf für jeden einzelnen Sensor limitiert somit die Sensordichte. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, ist die Implementierung einer Passiv-Matrix-Struktur, wie diese in Abbildung 2.6 dargestellt ist. Das Konzept beruht auf der Anordnung einzelner Sensorpixel in einem Netzwerk, wodurch die Leiterbahnen von den Sensorpixeln gemeinsam genutzt werden. Die Leiterbahnen bilden ein Gitter, wobei die Sensoren durch die Kreuzungspunkte repräsentiert werden. Durch die Verwendung einer solchen Matrix kann die Komplexität erheblich reduziert und die Anzahl an Leiterbahnen verringert werden. Zum Vergleich wären bei 100 einzelnen Sensoren mindestens 200 Leitungen notwendig. Hingegen reduziert sich der Bedarf bei der gleichen Anzahl an Sensorpixeln in einer Passiv-Matrix-Struktur auf jeweils zehn Reihen und Spalten, also 20 Leitungen. Zum Ansteuern eines Sensorpixels wird die entsprechende Reihe und Spalte angewählt und der Widerstand  $R$  des Sensorpixels gemäß  $R = U/I$  berechnet. Dazu wird beispielsweise eine fest vorgegebene Spannung  $U$  angelegt und der Stromfluss  $I$  gemessen. Durch die Vereinfachung und Reduktion der erforderlichen Leiterstrukturen lassen sich sehr hohe Sensordichten erreichen. Ein Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass immer nur ein Sensorpixel zur gleichen Zeit ausgelesen werden kann, weshalb die Auslesezeit bei großen Sensoranordnungen stark zunimmt. Dies wird um so problematischer, wenn die Anwendung auf geringe Latenzzeiten angewiesen ist und/oder es zu einem schnellen Temperaturwechsel während der Messung kommt. Hinzukommt, dass sich, wie in Abbildung 2.6 angedeutet, ein parasitärer Strom (*Crosstalk*) über die Nebenpfade und die umliegenden Sensorpixel/Widerstände ausbildet. Diese parasitären Ströme fließen bei der Messung mit ein und führen zu einer Verfälschung der Messergebnisse. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn der Sensorverbund einzelne „Ausreißer“ besitzt, also die Pixel zueinander starke Unterschiede im Widerstand aufweisen. Dieses Problem ist bei der Herstellung im Druckverfahren ein durchaus relevantes Thema und nicht vollständig vermeidbar. Die Problematik kann teilweise durch die Ausleseelektronik kompensiert werden, was sich allerdings bei diesem Bauteil in einer



**Abbildung 2.7:** Aufbau einer Aktiv-Matrix-Struktur. Dazu wird jedem Sensor ein Transistor vorgeschaltet, der mithilfe eines Steuersignals am *Gate* den zu messenden Sensorpixel aktiv schaltet. Auf diese Weise können mehrere Sensorpixel gleichzeitig ausgelesen und parasitäre Ströme, die bei einer Passivmatrix auftreten, können unterbunden werden (siehe Abbildung 2.6).

gesteigerten Komplexität niederschlägt. Mit der Entwicklung einer optimierten Ausleseelektronik beschäftigt sich das Kapitel 5.1.2. [49, 72, 73, 74]

Falls es die Rahmenbedingungen zulassen, wird eine Aktiv-Matrix-Struktur bevorzugt. Die Vorteile liegen in einer besseren Signalqualität und einer höheren Auslesegeschwindigkeit. Das Prinzip beruht darauf, dass jeder einzelne Sensorpixel mithilfe eines Transistors aktiv angesteuert werden kann. Ein schematischer Aufbau ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Genauer gesagt wird jedem Sensorpixel ein eigener Transistor vorgeschaltet. Ein Steuersignal, das am *Gate* des Transistors anliegt, schaltet diesen durch und ermöglicht anschließend das Auslesen des Sensorpixels. Im Bereich der Displayherstellung, wohl das prominenteste Beispiel für die Nutzung von Aktiv-Matrix-Strukturen, werden sogenannte Dünnschichttransistoren verwendet. In einem Abscheideprozess werden hierbei metallische Kontakte, eine Dielektrikumschicht und eine Halbleiterschicht nacheinander auf dem Substrat aufgebracht. Auch im Druckverfahren lassen sich heute Transistoren herstellen, die allerdings bislang keine vergleichbare Leistungsfähigkeit erreichen. Die zusätzlich verbauten Transistoren und benötigten Steuerleitungen steigern bei der Aktiv-Matrix-Struktur die Komplexität erheblich und der damit einhergehende Platzbedarf nimmt zu. Eine Miniaturisierung der Strukturen ist bei den Druckverfahren begrenzt, sodass durch das Hinzufügen weiterer Komponenten die maximal erreichbare Sensordichte sinkt. Gedruckte Transistoren benötigen neue Tinten und erfordern die Deposition weiterer Materialschichten. Damit steigt der Optimierungsbedarf und die Fehleranfälligkeit während der Herstellung an. Im Bezug auf die Temperaturmessung stellt die intrinsische Temperaturabhängigkeit der Transistoren ein weiteres Problem dar, welches sich negativ auf die Messgenauigkeit auswirken würde. Trotzdem bietet die Aktiv-Matrix einige Vorteile gegenüber der Passiv-Matrix. Durch die Schaltwirkung der Transistoren werden immer nur einzelne Sensoren in einer Reihe angesprochen und so effektiv parasitäre Ströme verhindert. Somit lässt sich die Signalqualität steigern ohne dabei die Ausleseelektronik speziell anpassen zu müssen. Hinzukommt, dass sich die Auslesegeschwindigkeit mit der Aktiv-Matrix deutlich erhöht. Da mehrere Sensorpixel an einer Steuerleitung sitzen, werden diese alle gleichzeitig angesprochen. Diese könnten somit

auch alle zeitgleich ausgelesen werden und das ohne gegenseitige Beeinflussung. In Abbildung 2.7 wird dies am Schaltungsaufbau nochmals deutlich. [75, 76, 77]

In dieser Arbeit wurde ein Temperatursensor-Array auf Basis einer Passiv-Matrix-Struktur entwickelt. Dies ist hauptsächlich der Tatsache geschuldet, dass die angestrebte Sensordichte mit der Integration weiterer Bauteile nicht erzielt werden kann. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass im Verbundprojekt zur Entwicklung der Temperatursensoren auch eine gedruckte Aktiv-Matrix-Entwicklungsumgebung hergestellt wurde. Die darauf enthaltenen Transistoren zeigten allerdings eine sehr starke Temperaturabhängigkeit, sodass diese für die Temperaturmessung ungeeignet war.

## 2.2 Sensorspezifische physikalische Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich der Einführung einiger physikalischer Grundlagen, die für das Verständnis der Temperaturmessung relevant sind. Dies beinhaltet sowohl die Beschreibung von Vorgängen im Sensormaterial, aber auch messtechnische Überlegungen im Zusammenhang mit der Kalibrierung. Zunächst werden verschiedene Mechanismen zum Wärmetransport erklärt, der vielfältigen Einfluss auf die Temperaturmessung hat. Im Anschluss werden die elektrischen Eigenschaften von Leitern, Halbleiter und Isolatoren behandelt. Die verwendeten Tinten gehören ebenfalls diesen Gruppen an und sind Ursache für beobachteten Sensoreigenschaften. Da die in dieser Arbeit vorgestellten Temperatursensoren den Thermistoren zugeordnet werden, werden hierfür spezielle mathematische Beschreibungen eingeführt und erklärt.

### 2.2.1 Wärmetransport

Unter Wärmetransport oder -übertragung versteht man den Transport von thermischer Energie in Form von Wärme von einem System zum anderen. Gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik (siehe Kapitel 2.1.1) fließt die Wärme immer vom warmen zum kalten System. Dabei spielt der Wärmetransport eine entscheidende Rolle bei der Temperaturmessung. Bei Messmethoden, die im direkten Kontakt mit dem zu messenden System stehen, wird thermische Energie zwischen Temperatursensor und System ausgetauscht. Damit wird klar, dass es zwischen Sensor und System auch zu einer gegenseitigen Beeinflussung (Rückwirkung) kommt und es so zu einer Verfälschung der Temperaturmessung kommen kann. Der Wärmetransport auch innerhalb des Systems bzw. des Sensors spielt eine Rolle.

Kommt es beispielsweise lokal in einem System zu einer Temperaturänderung, führt der Wärmetransport im System selbst zu einem Ausgleich der Temperaturvariation. Ähnliches trifft auch auf einen Temperatursensor zu, wenn dieser mit dem System in Kontakt gebracht wird. In diesem Zusammenhang muss außerdem die Wärmekapazität eines Stoffs bzw. Systems eine berücksichtigt werden. Die Wärmekapazität  $C$  ist definiert als:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}. \quad (2.8)$$

Damit ist die Wärmekapazität  $C$  ein Ausdruck dafür, wie stark sich die Temperatur  $T$  in einem System beim Austausch von Wärme  $Q$  ändert. Die Wärmekapazität des Sensors sollte immer sehr viel kleiner sein als

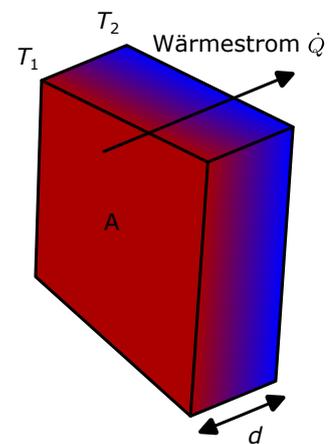


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Wärmeleitung durch einen Körper. Angelehnt an [78]; CC BY-SA 4.0

**Tabelle 2.2:** Übersichtstabelle über die Wärmeleitfähigkeit von Materialien. [57, 60]

Stoff	$\lambda$ [W/m·K]
Silber	410
Kupfer	395
Gold	310
Platin	67
Fensterglas	1,16
Wasser (25 °C)	0,60
Luft	0,025

die Wärmekapazität des zu messenden Systems, da sonst der Effekt des Sensor auf das System nicht mehr vernachlässigt werden kann.

Wärmetransport kann entweder durch Wärmeleitung, Konvektion und/oder Wärmestrahlung stattfinden. In der Regel sind jedoch mehrere Prozesse gleichzeitig beteiligt. Unter dem Begriff Wärmeleitung wird der Energietransport bei einer Temperaturdifferenz innerhalb eines Teilchensystem bezeichnet. Bei Konvektion kommt es zum Energietransport aufgrund einer Teilchenbewegung. Wärmestrahlung ist elektromagnetische Strahlung, die durch innere Energie im Körper erzeugt und abgestrahlt wird. Im Folgenden werden nun die einzelnen Begrifflichkeiten detailliert erklärt:

**Wärmeleitung:** Unter Wärmeleitung wird der Energietransport in einem Teilchensystem verstanden, ohne dass es zu einer makroskopischen Teilchenbewegung kommt. Wie bereits zuvor beschrieben wurde, wird die innere Energie in einer mikroskopischen Bewegungsform (Schwingung, Rotation,...) im System gespeichert. Mit zunehmender Temperatur nimmt auch das Maß der Bewegung zu. Bei einer inhomogenen Temperaturverteilung kommt es hierbei zu einer Wechselwirkung bzw. Energieübertrag durch Stöße mit den benachbarten Atomen. Diese Gitterschwingungen im Atomgefüge, die physikalisch wie fiktive Teilchen behandelt werden, werden als Phononen bezeichnet. In elektrisch leitfähigen Materialien tragen vor allem frei bewegliche Elektronen zur Wärmeleitung bei, weshalb in der Regel elektrisch leitfähige Materialien auch gute Wärmeleiter sind. Die Wärmeleitung beruht auf dem Fourierschen Gesetz, das den Wärmetransport innerhalb eines festen Körpers beim Vorhandensein einer Temperaturdifferenz an den Stirnflächen beschreibt. In Abbildung 2.8 ist die beschriebene Situation schematisch dargestellt. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  bezeichnet dabei die Wärmemenge  $Q$ , die in einem Zeitabschnitt  $t$  transportiert wird:

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.9)$$

Wird zusätzlich das entsprechende Flächenelement  $A$  mitberücksichtigt, wird von der Wärmestromdichte  $\dot{q}$  gesprochen. Das Fouriersche Gesetz besagt, dass die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  von einem materialabhängigen Wärmeleitkoeffizienten  $\lambda$  und der Temperaturdifferenz über eine gegebene Schichtdicke  $d$  abhängt

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{d}. \quad (2.10)$$

Mit der Betrachtung im Grenzübergang für eine infinitesimal dünne Materialschicht ergibt sich schließlich das Fouriersche Gesetz:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.11)$$

Um einen Eindruck über die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  verschiedener Materialien zu erhalten, findet sich eine Übersicht in Tabelle 2.2. Die Wärmeleitfähigkeit kann je nach Material eine Temperaturabhängigkeit auf-

weisen. Bei Betrachtung eines beschränkten Temperaturintervalls kann in den meisten Fällen mit einem konstanten Wert gerechnet werden. Bei Fluiden und Gasen, kann die Energieübertragung im statischen Fall lediglich durch Stöße erfolgen, weshalb diese schlechte Wärmeleiter sind.

**Konvektion:** Da Gase und Flüssigkeiten nicht an einen festen Ort gebunden sind, kann es neben einer statischen Wärmeleitung auch zu einem Wärmetransport durch freie Bewegung der Teilchen im Raum kommen. Der Wärmetransport wird möglich, da die Teilchen eine Wärmekapazität aufweisen und so thermische Energie aufnehmen und fortragen können. Die Konvektion entsteht mithilfe einer Strömung. Je nach Ursache der Strömung wird in freie oder erzwungene Konvektion unterschieden. Die freie Konvektion kann beispielsweise durch eine Dichteviation aufgrund eines Temperaturgradienten hervorgerufen werden. Unter dem Einfluss der Gravitation bildet sich dann eine Strömung aus. Bei der erzwungenen Konvektion wird die Strömung zum Beispiel durch eine Pumpe hervorgerufen.

Konvektion kann durch das Newtonsche Abkühlungsgesetz beschrieben werden. Die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  ist dabei abhängig von der vorliegenden Temperaturdifferenz zwischen Wand und Fluid, sowie einem dazugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten  $h$ :

$$\dot{q} = h(T_2 - T_1). \quad (2.12)$$

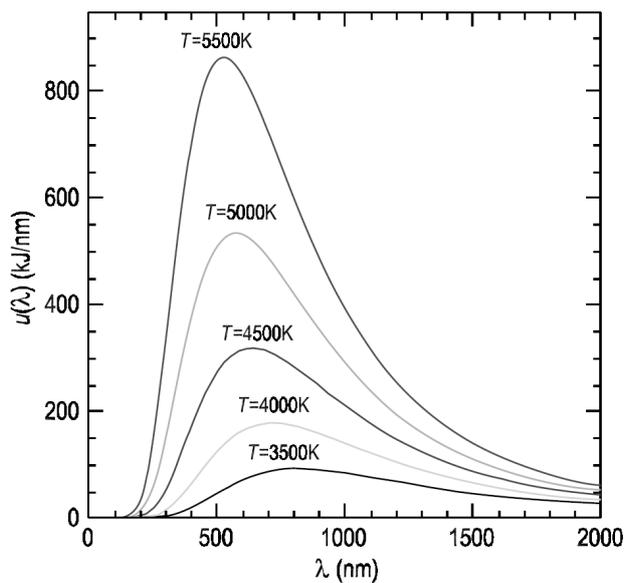
Der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  wird stark von den Randbedingungen am Übergang zwischen Wand und Fluid bestimmt. Dazu zählen wichtige Parameter, wie involvierte Materialien, Oberflächenbeschaffenheit und Strömungsverhalten.

**Wärmestrahlung:** Jeder Stoff mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts emittiert Wärmestrahlung in Form eines elektromagnetischen Spektrums. Schwingungen in der Materie ist ein Form innere Energie zu speichern. Durch die Ladungsträger in der Materie kommt zur Erzeugung elektromagnetischer Wechselfelder, die in den Raum abgestrahlt werden. Da die Wärmeübertragung nicht auf Materie basiert, kann diese auch im Vakuum erfolgen. Als Referenz bei Betrachtung der Wärmestrahlung dient ein sogenannter Schwarzer Körper. Dieser stellt eine idealisierte thermische Strahlungsquelle dar, deren Emissionsspektrum rein von der Temperatur des Schwarzen Körpers abhängt. Gleichzeitig absorbiert dieser Strahlung jeglicher Wellenlänge vollständig, was mit dem Namensursprung einhergeht. Somit ist eine Schwarzer Körpers sowohl ein perfekter Emittent, als auch ein perfekter Absorber. In Abbildung 2.9 ist Emissionsspektrum eines Schwarzen Körpers dargestellt, das vom ultravioletten über das sichtbare ins infrarote Spektrum erstreckt. Dabei ist die Energiedichte  $u(\lambda)$  über die Wellenlänge  $\lambda$  aufgetragen. Es ist erkennbar, dass sich das Strahlungsmaximum bei steigender Temperatur hin zu einer kürzeren Wellenlängen verschiebt. Daneben nimmt die Energiedichte immer weiter zu, während sich das Spektrum zu kleineren Wellenlängen verschiebt. Der Verlauf zeigt außerdem, dass bei alltagsüblichen Temperaturen vor allem das Infrarotspektrum für die Betrachtung der Wärmestrahlung relevant ist.

Die Berechnung der emittierten Wärmestrahlung geht auf das Stefan-Boltzmann-Gesetz zurück. Für einen nicht-idealen Schwarzen Körper muss der Emissionsgrad  $\varepsilon$  der Oberfläche beachtet werden. Dieser liegt zwischen 0 für einen perfekten Spiegel und 1 für einen idealen Schwarzen Körper. Damit gilt für die Wärmestromdichte  $\dot{q}$ :

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (2.13)$$

Diese ist somit abhängig vom Emissionsgrad  $\varepsilon$  der Oberfläche und der Temperatur  $T$ . In der Gleichung geht außerdem die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  ein. Das für den Wärmetransport relevante Spektrum, ist gleichzeitig das Spektrum bei dem die Materie auch absorbiert. Um den tatsächlichen Wärmetransport eines Körpers in seinem Umfeld zu beschreiben, muss allerdings die Umgebungstemperatur



**Abbildung 2.9:** Emissionsspektrum eines Schwarzkörpers in Abhängigkeit der Temperatur. Aufgetragen ist die Energie pro Einheitsvolumen (Energiedichte) über die Wellenlänge. Entnommen aus [79]. - *Black-body radiation* by G. S. Ranganath Copyright 2008 von Springer Nature. Vervielfältigung mit Genehmigung von Springer Nature im Format Thesis/Dissertation über das Copyright Clearance Center. (Lizenz: 5644971389502)

beachtet werden. Ein Körper emittiert nicht nur Wärmestrahlung, sondern absorbiert auch gleichzeitig Wärmestrahlung aus seiner Umgebung. Somit steht der Körper permanent im gegenseitigen Energieaustausch. Bei der Gleichung muss daher die Temperaturdifferenz beachtet werden:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{Körper}}^4 - T_{\text{Umgebung}}^4). \quad (2.14)$$

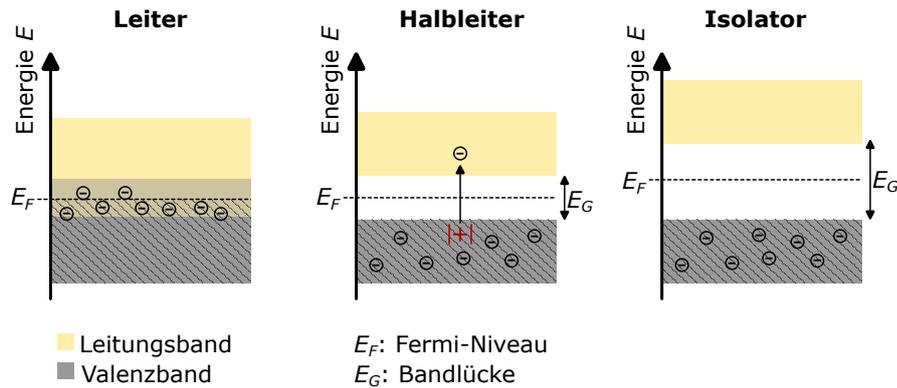
Die Modellierung der Wärmeleitung stellt in der Realität eine große Herausforderung dar, da eine Vielzahl an Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten und Größen in einem System bestehen. Dank der gestiegenen Rechenleistungen bei Computern können heutzutage jedoch selbst komplexe Systeme modelliert und dargestellt werden.

Als Grundlage für diesen Abschnitt diene folgende Literatur [60, 80, 57, 58, 79].

## 2.2.2 Leiter, Halbleiter, Isolatoren und Dioden

Um die elektrischen und thermischen Eigenschaften in den verwendeten Materialien besser zu verstehen, werden in diesem Abschnitt die physikalischen Eigenschaften von Leitern, Halbleitern und Isolatoren besprochen. Da es sich bei den hergestellten Temperatursensoren um ein Schichtsystem aus verschiedenen Materialien handelt, wird aufgrund der Relevanz für diese Arbeit noch der Aufbau einer Diode mitbehandelt.

Die Beschreibung der Leitfähigkeiten von Festkörpern lässt sich am Bändermodell erklären. Dazu muss zunächst die Entstehung der Bänder betrachtet werden. Bei einem einzelnen Atomen existieren sogenannte diskrete Energieniveaus. Werden hingegen mehrere Atome an einander angenähert, kommt es zu einer elektrostatischen Wechselwirkung. Dabei kommt zu einer Verschiebung der jeweils beteiligten Energieniveaus. Die Zustände können schließlich nicht mehr konkret einem Atom zugeordnet werden. Betrachtet man eine große Anzahl an Atomen, wie dies in einem Kristallgitter der Fall ist, nimmt die Dichte an möglichen Zuständen so weit zu, dass dies als Kontinuum betrachtet werden kann. Aus diesem Grund wird von Bändern gesprochen, womit auch die beteiligten Elektronen in das Kollektiv der Gitterstruktur übergehen. Das beim



**Abbildung 2.10:** Darstellung von Leitern, Halbleitern und Isolatoren im Bändermodell. Elektronen im Leitungsband und Löcher im Valenzband können sich relativ frei durch die Kristallstruktur bewegen und bewirken so die Leitfähigkeit. Das Fermi-Niveau  $E_F$  zeigt die maximale Besetzungshöhe bei  $T = 0$  K.

absoluten Nullpunkt höchste voll besetzten Energieband wird als Valenzband bezeichnet. Die dem Valenzband zugeordneten Elektronen werden als Valenzelektronen bezeichnet und sind für die chemische Bindung verantwortlich. Die Valenzelektronen sind zwar einem einzelnen Atom zugeordnet, weisen allerdings den größten Kernabstand auf. Die am absoluten Nullpunkt unbesetzten darüber liegenden Energieniveaus bilden das Leitungsband.

Zur Visualisierung wird das Bändermodell genutzt, wie dieses in Abbildung 2.10 dargestellt ist. Der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband, die sogenannten Bandlücke, bewirkt die Unterschiede in der Leitfähigkeit zwischen Leitern, Halbleitern und Isolatoren. In der Bandlücke sind keine energetischen Zustände vorhanden und entspricht physikalisch einer verbotenen Zone. Die elektrische Leitfähigkeit beruht auf dem Vorhandensein von freien Ladungsträgern (Elektronen oder Löcher), die sich im Material frei bewegen können. Das bedeutet im Gegenzug, dass weder ein vollständig gefülltes noch leeres Band zur Leitfähigkeit beitragen kann. Durch Anregung von außen, wie beispielsweise mit thermischer Energie, können Elektronen die Bandlücke überwinden und ins Leitungsband gelangen. Als Folge davon stehen sowohl freie Elektronen im Leitungsband und Löcher im Valenzband zur Verfügung um zur Leitfähigkeit im Material beizutragen. Der Energiebetrag  $E_G$ , der benötigt wird um die Bandlücke zu überwinden, variiert bei Leitern, Halbleitern und Isolatoren stark. Dies ist die Ursache für die unterschiedlichen Leitfähigkeiten der Materialien. Abhängig von der Temperatur gibt die Fermi-Verteilung an mit welcher Wahrscheinlichkeit welche Energiezustände bei welcher Temperatur besetzt sind. Sie definierten somit eine Besetzungsgrenze. Ganz allgemein gilt für die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $f(E)$  bei der Energie  $E$ :

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{k_B T}\right]} \xrightarrow{E - E_F \gg k_B T} f(E) = \exp\left[-\frac{E - E_F}{k_B T}\right]. \quad (2.15)$$

Diese ist abhängig von der Fermi-Energie  $E_F$  des Materials, der vorherrschenden Temperatur  $T$  und der Stefan-Boltzmann-Konstanten  $k_B$  abhängig.  $E_F$  entspricht dabei der Energie bei der die Besetzungswahrscheinlichkeit bei 50 % liegt. Beim absoluten Nullpunkt geht die Wahrscheinlichkeitsverteilung in eine Stufenfunktion über.

Im Folgenden werden Leiter, Isolatoren, Halbleiter und Dioden genauer betrachtet:

**Leiter:** Beim Leiter kommt es zu einer Überlappung von Valenz- und Leitungsband. Dadurch kommt es zu einer Teilbesetzung der Bänder. Damit steht im Grundzustand eine hohe Anzahl an freien Zuständen und Ladungsträgern zur Verfügung, was sich in der hohen Leitfähigkeit äußert. Die Abhängigkeit des Widerstands lässt sich so erklären, dass es bei einer höheren Temperatur zu stärkeren Gitterschwingungen (Phononen)

kommt. Mit der Temperatur steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung zwischen den Elektronen und Phononen an. Die Elektronen-Phononen-Wechselwirkung bewirkt eine Erwärmung des Materials und ist auch für die Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur verantwortlich, indem die Beweglichkeit der Ladungsträger eingeschränkt wird. Wird bei Metallen ein begrenzter Temperaturbereich betrachtet, kann von näherungsweise von einem linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand gesprochen werden. Die Abhängigkeit des Widerstands  $R$  von der Temperatur  $T$  kann daher folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T). \quad (2.16)$$

Die Leitfähigkeit von Metallen wird daher anhand des Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  definiert. Dieser wird bestimmt, indem der Widerstand bei beispielsweise zwei Temperaturwerten (z.B. 0 °C und 100 °C) gemessen wird. Zur Wahrung eines linearen Zusammenhangs sollte der Temperaturbereich  $\Delta T$  nicht zu groß gewählt werden:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{\Delta T} \quad (2.17)$$

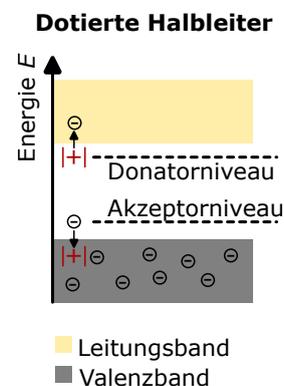
Da Platin eine sehr geringe Abweichung vom linearen Verlauf aufweist, wird dieses Material bei klassischen Widerstandsthermometern am meisten verwendet.

**Isolatoren:** Im Gegensatz zum Leiter befindet sich zwischen Valenz- und Leitungsband eine große Bandlücke  $E_G > 3$  eV. Hinzu kommt, dass das Fermi-Niveau unterhalb des Leitungsband befindet und somit in einem Bereich liegt, in dem keine Zustände erlaubt sind. Das Valenzband ist beim Isolator vollständig besetzt, während gleichzeitig die Bandlücke so groß ist, dass die Elektronen nicht ohne weiteres in das Leitungsband springen können. Erst bei einem sehr hohen Energieeintrag kann die Bandlücke überwunden werden, was bei Isolatoren häufig mit der Zerstörung einhergeht.

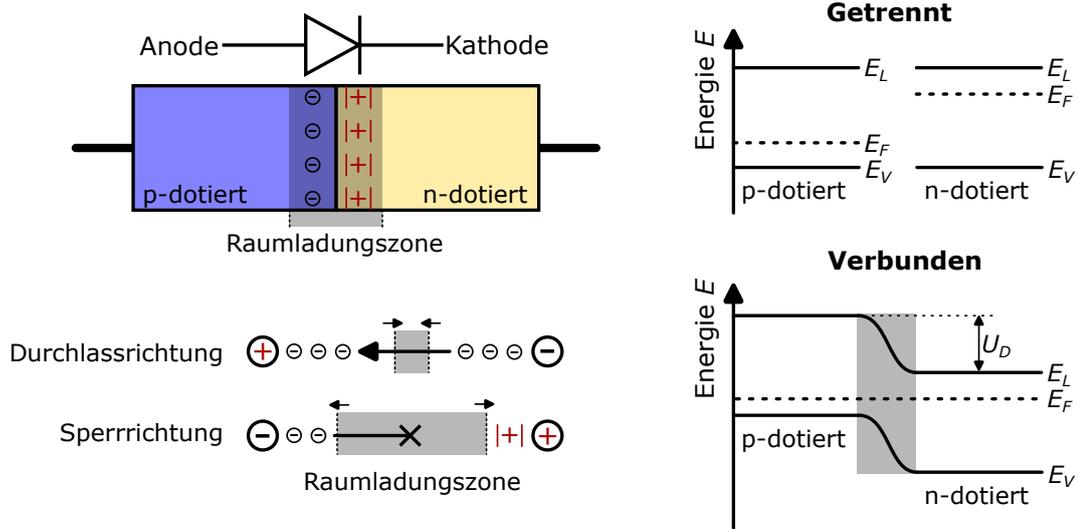
**Halbleiter:** Ähnlich zum Isolator weist ein Halbleiter ebenfalls ein Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband auf, allerdings ist diese kleiner. Die Fermienergie liegt ebenfalls im Bereich der Bandlücke. Beim Halbleiter lassen sich hingegen bereits bei mäßiger thermischer Energiezufuhr Elektronen ins Leitungsband anheben. Die dabei entstandenen Löcher tragen anschließend im Valenzband ebenfalls zu Leitfähigkeit bei, indem sich auch Elektronen über diese Löcher im Valenzband fortbewegen können. Von außen betrachtet, erscheint dies als würde sich das Loch durch das Material bewegen. In einem reinen Halbleiter entstehen somit immer gleich viele Elektronen wie Löcher. Im Gegensatz zu Leitern bewirkt eine Erhöhung der Temperatur beim Halbleiter also eine Zunahme der Leitfähigkeit. Allerdings nehmen leitungshemmenden Effekte im Gitter mit steigender Temperatur zu, die wiederum eine Widerstandserhöhung zur Folge haben.

Die Leitfähigkeit des Halbleiters kann jedoch durch gezieltes „Verunreinigen“, das sogenannte Dotieren, modifiziert und eingestellt werden. Dazu können Atome mit Elektronenüberschuss oder -mangel in das Halbleitermaterial eingepflanzt werden.

Bei der n-Dotierung werden Atome mit einem zusätzlichen Elektron, verglichen mit den Atomen des Halbleiters, verwendet. Diese Elektronen können bereits bei geringer thermischer Anregung ins Leitungsband angehoben werden und stehen dort als freie Ladungsträger zu Verfügung. Aus diesem Grund werden Atome dieser Kategorie als Donatoren („Geber“) bezeichnet. Wird der Halbleiter p-dotiert, werden Atome



**Abbildung 2.11:** Durch das dotieren von Halbleitern, werden zusätzliche Zustände im Bändermodell möglich. Bei n-Dotierung (Donator) werden weitere Elektronen im Leitungsband frei. Im Gegenzug werden bei der p-Dotierung (Akzeptor) Löcher im Valenzband hinzugefügt.



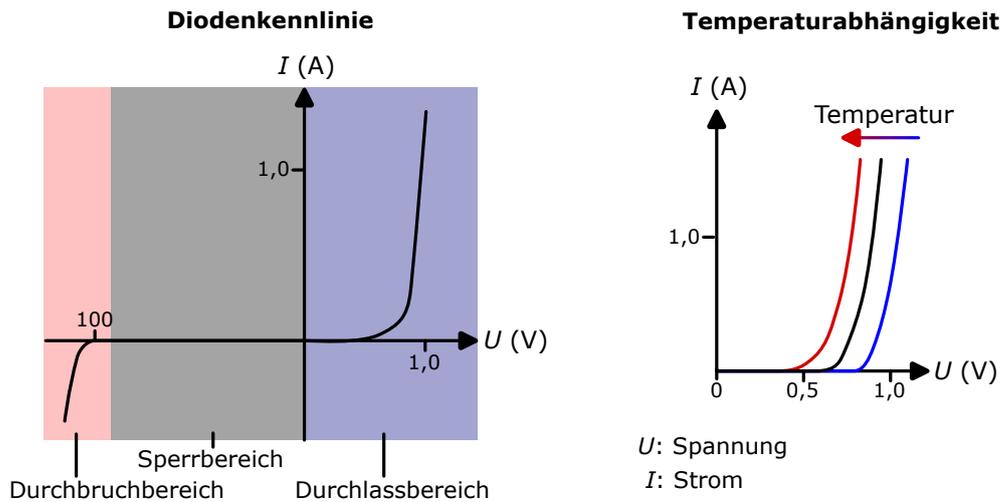
**Abbildung 2.12:** Darstellung des p-n-Übergangs in einer Halbleiterdiode. Durch die unterschiedliche Dotierung zweier Halbleiterschichten, kommt es zu einem Diffusionsfluss von Ladungsträgern in die jeweils andere Schicht. Damit entsteht in der Diode eine Raumladungszone. Abhängig von der Richtung der angelegten Spannung ist Stromfluss möglich oder die Diode sperrt.

Werden die Halbleiterschichten in Kontakt gebracht, kommt es zu einer Angleichung der Fermi-Niveaus  $E_F$ , was eine Verbiegung von Valenzband  $E_V$  und Leitungsband  $E_L$  zur Folge hat und sich in der Diffusionsspannung  $U_D$  widerspiegelt.

eingbracht denen ein Elektron fehlt. Dadurch werden Löcher in der Gitterstruktur geschaffen, die den Elektronen im Valenzband als Sprungplatz dienen und gewissermaßen das Loch im Halbleiter weiterwandert. Da die Löcher Elektronen aufnehmen können, werden diese Atome als Akzeptoren („Nehmer“) bezeichnet. In Abbildung 2.11 ist die Dotierung von Halbleitern im Bändermodell dargestellt. Die Dotierung bewirkt, dass zusätzliche Energiezustände in der Bandlücke hinzukommen. Dotierung ist vor allem bei Dioden von besonderem Interesse, da die Schalteigenschaften damit gezielt eingestellt werden können.

Grundsätzlich spielt der Halbleiter auch bei der Temperaturmessung eine wichtige Rolle. Basiert ein Temperatursensor auf einem Halbleitermaterial, wird er als Thermistor bezeichnet. Da Thermistoren Gegenstand dieser Arbeit sind, wird der mathematische Zusammenhang von Widerstand und Temperatur gesondert im nachfolgenden Kapitel 2.2.3 behandelt.

**Dioden:** Bei Dioden handelt es sich um eine Kombination aus Leiter- und/oder Halbleitermaterialien die in einem Schichtsystem aufgebaut werden. Dieses Schichtsystem besitzt eine gleichrichtende Eigenschaft bei Stromfluss. Das bedeutet, dass Dioden nur in eine Richtung Strom passieren lassen (Durchlassrichtung), während diese in die Gegenrichtung sperren (Sperrrichtung). Klassische Dioden bestehen aus jeweils einer n- und p-dotierten Halbleiterschicht, wobei das Ausgangsmaterial meist Silizium ist. An der Kontaktstelle kommt es zu einem p-n-Übergang, der in Abbildung 2.12 dargestellt ist. Die gegensätzliche Dotierung der beiden Schichten bewirkt bei Kontakt einen Ladungsträgerfluss zwischen der p- und n-Schicht, welcher auch als Diffusionsfluss bezeichnet wird. Vom n-dotierten Halbleitermaterial fließen die überschüssigen Elektronen in die verfügbaren Löcher der p-dotierten Schicht. Gleichzeitig hinterlassen die Elektronen Löcher in der n-dotierten Schicht. Durch die Umverteilung der Ladungsträger entsteht wiederum ein elektromagnetisches Feld und eine Diffusionsspannung  $U_D$ . Der Vorgang endet und erreicht einen stationären Zustand, sobald im p-n-Übergang das elektromagnetische Feld den Diffusionsdruck zwischen den Schichten kompensiert. Da in dem Bereich keine freien Ladungsträger mehr vorhanden sind, wird diese als Verarmungszone oder auch Raumladungszone bezeichnet. Wird von außen in Durchlassrichtung eine Spannung angelegt, werden Elektronen in die n-dotierte Schicht gepumpt und auf der p-dotierten Seite Elektronen abgesaugt. Die Raumladungszone schrumpft und es bildet sich ein Strom in der Übergangszone aus. Damit kommt es zu



**Abbildung 2.13:** Skizze einer Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode sowie Einteilung in die jeweiligen Betriebszustände. Wie skizziert, weist die Diodenkennlinie außerdem eine Temperaturabhängigkeit auf. Die Skizze ist an eine Silizium Diode angelehnt.

Stromfluss durch die Diode. Wird die Polung vertauscht, wird der Effekt im p-n-Übergang verstärkt und die Raumladungszone verbreitert sich. Der Stromfluss wird somit effektiv unterbunden. Wird die Spannung allerdings bis zu einer kritischen Schwelle, der sogenannten Durchbruchspannung erhöht, kommt es selbst in Sperrrichtung zum Stromfluss. Je nach Diode nimmt diese irreversible Schäden.

Wird der p-n-Übergang einer Diode im Bändermodell betrachtet, wie diese in Abbildung 2.12 abgebildet ist, kommt es beim Kontakt der Schichten zu einem Angleichen des Fermi-Niveaus auf beiden Seiten des Halbleiters. Dies bewirkt wiederum eine Verbiegen des Valenz- und Leitungsbandes im Bereich der Raumladungszone. Die Stärke der Bandverbiegung äußert sich in der Diffusionsspannung  $U_D$ . Wird eine Spannung in Durchflussrichtung angelegt, wird die Differenz zwischen den Bändern in dotierten Halbleiterschichten kleiner und somit die Diffusionsspannung  $U_D$  um die angelegte Spannung reduziert. Im umgekehrten Fall wird die Differenz durch ein weiteres Verbiegen der Bänder noch verstärkt.

Eine Diode weist eine charakteristische Strom-Spannungs-Kennlinie auf. Diese ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Im Durchlassrichtung steigt der Strom ab der Schwellenspannung stark an, die etwa mit der Diffusionsspannung  $U_D$  übereinstimmt. In Sperrrichtung wird der Stromfluss, von einem minimalen Sperrstrom abgesehen, vollständig unterbunden. Wird allerdings die Durchbruchspannung überschritten, steigt der Strom schlagartig an. Eine solche Diodenkennlinie wird mit der Shockley-Gleichung beschrieben, welche hier in leicht vereinfachter Version dargestellt wird [61, 81]:

$$I = I_S(T) \cdot \left[ \exp \left[ \frac{eU}{k_B T} \right] - 1 \right]. \quad (2.18)$$

Der Strom  $I$ , der durch die Diode fließt, weist ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit auf.  $I_S(T)$  entspricht dem Strom der selbst in Sperrrichtung fließt. In die Exponentialfunktion geht sowohl die angelegte Spannung  $U$  und die Temperatur  $T$  ein.  $k_B$  entspricht der Boltzmannkonstanten und  $e$  der Elementarladung. Die Abhängigkeit der Diode in Durchlassrichtung ist in Abbildung 2.13 skizziert. Man erkennt, dass der Stromfluss mit steigender Temperatur zunimmt.

Neben reinen Halbleiterdioden können auch Dioden auf Basis einer Metall-Halbleiter-Kombination realisiert werden, welche als Schottky-Dioden bezeichnet werden. Diese haben gegenüber klassischen Halbleiterdioden den Vorteil, dass sie eine geringere Durchlassschwellenspannung benötigen und bei hochfrequenter Wechselspannung schneller schalten. Es können Kombinationen sowohl mit n- oder p-dotierten Halbleitern realisiert werden, wobei die Paarung mit n-dotierten Halbleitern häufiger anzutreffen ist. Bei Betrachtung

eines Metall-Halbleiter-Übergangs mit n-dotiertem Halbleiter, kommt es aufgrund der Überschussladungen im Halbleiter zu einem Überlaufen der Elektronen zum Metall. Zu der bereits großen Anzahl an freien Elektronen im Metall, ziehen diese zusätzlichen Elektronen keinen Effekt nach sich. Im Halbleiter, verbleiben dagegen positiv geladene Löcher und es bildet sich dort eine Raumladungszone, wie diese auch beim p-n-Übergang der Fall ist. Während beim Halbleiter (auch im dotierten Fall) das Fermi-Niveau in der Bandlücke liegt, reichen im Metall (siehe Abschnitt zu Leitern) die besetzten Zustände bis ans Fermi-Niveau. Im direkten Kontakt gleichen sich nun das Fermi-Niveaus beider Materialien an. Auf Halbleiterseite kommt es zur Verbiegung der Bandstruktur und es entsteht eine Potentialbarriere. Es kommt somit zu einem vergleichbaren Effekte wie bei einer klassischen Halbleiterdiode, allerdings bietet diese in der Schaltungstechnik aufgrund der geringeren Durchlassschwellenspannung und Schaltzeiten einige Vorteile. Als Grundlage für diesen Abschnitt diene die folgende Literatur [61, 82, 83, 57].

### 2.2.3 Mathematische Beschreibung von Thermistoren

Dieser Abschnitt behandelt die mathematische Beschreibung von thermistorbasierten Temperatursensoren, wie diese im Rahmen der Arbeit entwickelt wurden. Abhängig von der Materialauswahl existieren bei Thermistoren sowohl Heiß- als auch Kaltleiter (siehe Kapitel 2.1.3). In diesem Zusammenhang werden häufig die Begriffe NTC für Heißleiter und PTC für Kaltleiter verwendet. Gemäß des Verhaltens eines Sensors bezieht sich NTC oder PTC auf das Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten  $\alpha$ :

$$\Delta R = R_0 \alpha \cdot \Delta T. \quad (2.19)$$

$R_0$  beschreibt dabei den Widerstand bei einer Bezugstemperatur, die in der Regel auf  $0^\circ\text{C}$  festgelegt ist. Da Thermistoren in der Regel keinen linearen Verlauf aufweisen, ist eine hinreichend genaue Beschreibung mit Gleichung 2.19 nicht möglich. Übergreifende mathematische Modelle sind nur für NTC-Thermistoren vorhanden. Im Allgemeinen werden Thermistoren durch folgende Gleichung beschrieben, die den nicht-linearen Verlauf deutlich besser repräsentiert:

$$R_1(T_1) = R_2(T_2) \exp \left[ B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]. \quad (2.20)$$

Die Parameter der Gleichung beziehen sich auf eine Referenzmessung bei einem Widerstandswert  $R_2$  und der dazugehörigen Temperatur  $T_2$ . Der Faktor  $B$  ist individuell für jeden Sensor bzw. jedes Thermistormaterial und wird für kommerzielle Sensoren im Datenblatt angegeben. Mit diesen Angaben lässt sich schließlich für den Sensor die Kennlinie berechnen. Durch Umformen der Gleichung 2.20 lässt sich mit folgendem Zusammenhang der  $B$ -Faktor bestimmen:

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{R_1(T_1)}{R_2(T_2)}. \quad (2.21)$$

Da der  $B$ -Faktor selbst vom verwendeten Temperaturintervall abhängt, sollte dieses immer mit angegeben werden. Standardmäßig wird hierfür  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  und  $T_2 = 85^\circ\text{C}$  gewählt.

Neben der Angabe des  $B$ -Faktors wird in der Literatur häufig der Temperaturkoeffizient des Widerstands ( $TCR$ ) angegeben und Materialien anhand dessen verglichen. Dieser Wert gibt die relative Änderung des Widerstands bei einem Temperaturwert an und bezieht sich auf eine Temperaturdifferenz  $\Delta T = 1\text{ K}$ . Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang in folgendermaßen ausdrücken:

$$TCR = \frac{1}{R(T)} \frac{\partial R}{\partial T} = -\frac{B}{T^2}. \quad (2.22)$$

Außerdem lässt sich der  $TCR$ -Wert mit dem  $B$ -Faktor in Relation setzen, wie dies in der Gleichung angegeben ist.

Es muss trotzdem beachtet werden, dass Gleichung 2.20 nur für einen sehr beschränkten Temperaturbereich eine ausreichend gute Approximation der Kennlinie eines NTC-Thermistors darstellt. Dazu kann Gleichung 2.20 umgestellt und die Formulierung vereinfacht werden. Diese Form der Gleichung kann anschließend zu einem Polynom erweitert werden, was eine erheblich bessere Repräsentation der Kennlinie eines Thermistors über einen größeren Temperaturbereich erlaubt:

$$\ln \frac{R}{R_{\text{Ref}}} = \frac{B}{T} - \frac{B}{T_{\text{Ref}}} \quad (2.23)$$

$$\ln R = \ln R_{\text{Ref}} - \frac{B}{T_{\text{Ref}}} + \frac{B}{T} \quad (2.24)$$

$$\ln R = b_0 + \frac{B_1}{T} \quad (2.25)$$

$$\rightsquigarrow \ln R = b_0 + \frac{b_1}{T} + \frac{b_2}{T^2} + \frac{b_3}{T^3}. \quad (2.26)$$

Diese Gleichung kann auch entsprechend für das Inverse der Temperatur angegeben werden mit:

$$\frac{1}{T} = a_0 + a_1 \ln R_1 + a_2 (\ln R_2)^2 + a_3 (\ln R_3)^3. \quad (2.27)$$

Durch die Bestimmung des Widerstands bei vier verschiedenen Temperaturen können die Parameter  $a_{0..4}$  in einem Gleichungssystem bestimmt werden. Auf diese Weise kann eine hohe Übereinstimmung mit der Thermistorkennlinie erzielt werden. Zur Vereinfachung kann auf das zweite Glied  $a_2 (\ln R_2)^2$  verzichtet werden, ohne dass eine nennenswerte Verschlechterung der Übereinstimmung in Kauf genommen werden muss. Die Gleichung ist als Steinhart-Hart-Gleichung bekannt:

$$\frac{1}{T} = a_0 + a_1 \ln R_1 + a_3 (\ln R_3)^3. \quad (2.28)$$

Somit sind zur Kalibrierung eines Thermistors nur noch drei Temperaturen erforderlich. Dies war insbesondere vor der Verwendung von Computern ein großer Vorteil, da der Rechenaufwand reduziert wird. Alternativen zu den vorgestellten mathematischen Zusammenhängen zur Beschreibung des Thermistorverhaltens und Kalibrierung, kann auch eine einfache Umsetzungstabelle (*Look-up-Table (LUT)*) verwendet werden. Für ein nichtlineares Verhalten sind allerdings eine große Anzahl an Vergleichswerten nötig. Um den Zusammenhang zwischen einzelnen Messpunkten besser abzubilden, kann eine Regressionsanalyse angewendet werden. Mithilfe von Polynomen höherer Ordnung lassen sich sehr gute Übereinstimmungen erzielen:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots). \quad (2.29)$$

In dieser Arbeit kam ein Polynom vierter Ordnung bei der Kalibrierung der Messkurven zum Einsatz. Im direkten Vergleich konnte mit dieser Approximation die höchste Übereinstimmung mit den Messwerten erreicht werden. Aufgrund der großen Anzahl an zu kalibrierenden Sensorpixeln, werden einige Vereinfachungen bei der Kalibrierung implementiert. Die Kalibrierverfahren werden gesondert in Kapitel 5.2 erklärt.

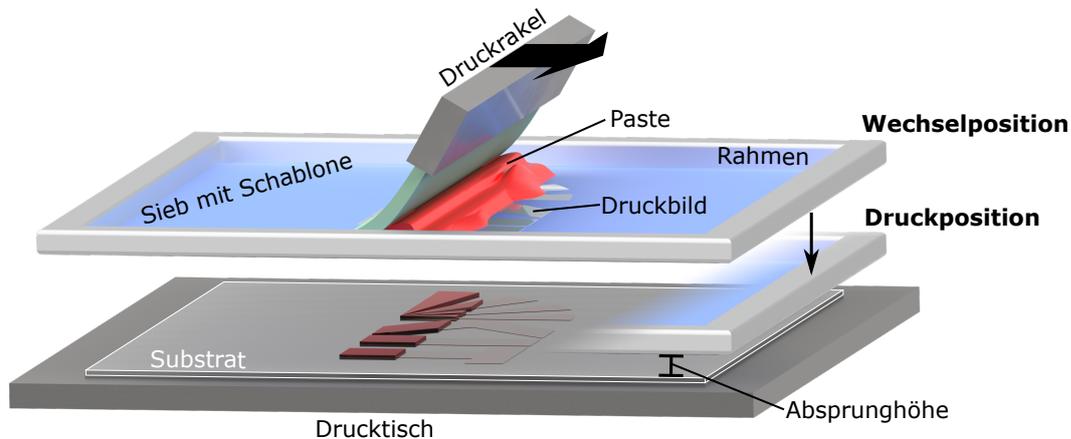
## 3 Druck- und Herstellungsverfahren

*Mit der fortschreitenden Entwicklung neuer Druckverfahren, wurde eine Tür mit neuen Möglichkeiten im Bereich der Elektronik aufgestoßen. Bereits in den 1950 wurden Leiterbahnen zur Verschaltung von Elektronik gedruckt. Die Technologie setzte sich letztendlich jedoch nicht gegen die lithographisch hergestellten Platinen durch. Der Durchbruch gelang schließlich im Bereich der Displays und Beleuchtungstechnik. Durch weitere Fortschritte in der Drucktechnologie in Kombination mit einer stetig wachsenden Auswahl an kompatiblen Materialien, rücken inzwischen Anwendungsbereiche in den Fokus, die bislang traditionellen IC-Herstellungsverfahren (Lithographie, Ätztechniken, Epitaxie...) vorbehalten waren. Hierzu zählen aktuell beispielsweise die Photovoltaik, die Entwicklung passiver und aktiver elektronische Komponenten und Sensorsysteme. Letzterer Punkt beschäftigt sich mit der Detektion einer physikalischen oder chemischen Zustandsänderung. Zu diesem Bereich zählt auch das Forschungsthema dieser Arbeit. [84, 22, 85]*

*Mit dem Einzug von gedruckter Elektronik werden nicht nur bestehende Anwendungsfelder revolutioniert, sondern die einzigartigen Eigenschaften der Drucktechnik ermöglichen die Entwicklung von flexiblen, tragbaren, kostengünstigen und umweltfreundlicher Produkte. Dies geht einher mit der Entwicklung von geeigneten Tinten/Pasten, wobei nicht nur die für den Anwendungsfall erforderlichen physikalischen Eigenschaften erfüllt werden müssen, sondern diese ebenfalls eine ausreichende Langzeitstabilität und die Kompatibilität der verwendeten Materialien zueinander gewährleisten muss. Im Rahmen der additiven Fertigung lassen sich sowohl starre und flexible Substrate mit dreidimensionalen Oberflächen als auch Bauteile direkt bedrucken. In diesem Kapitel werden alle zur Herstellung des Temperatursensor-Arrays verwendeten Verfahren vorgestellt. Zunächst wird Siebdruck und Aerosol-Jet-Druck vorgestellt, die bei der Fertigung der Sensoren eingesetzt werden. Aerosol-Jet-Druck weist eine Vielzahl an Einstellparametern und Besonderheiten auf, die hier im Detail dargestellt werden. Darauf folgt die Vorstellung des Rotationsbeschichtungsverfahrens, welches zur Aufbringung einer Isolationsschicht benötigt wird. Die durch flüssigprozessierung hergestellten Schichten benötigen in der Regel einen Nachbehandlungsschritt. Je nach Material erfolgt dabei entweder ein Aushärten oder Sintern der Schicht. Diese zwei Begrifflichkeiten werden dazu eingeführt und mögliche Verfahren dafür vorgestellt. Ein besonderes Augenmerk wird auf das sogenannte photonische Sintern gelegt. Dieses erlaubt das gezielte induzieren hoher Temperaturen in eine gedruckte Materialschicht ohne temperaturempfindliche Substrat zu schädigen.*

### 3.1 Eingesetzte Druckverfahren

In diesem Kapitel werden die verwendeten Druckverfahren zum Aufbringen der Sensorstrukturen vorgestellt. Für die Herstellung des Temperatursensor-Arrays werden Siebdruck und Aerosol-Jet-Druck kombiniert, um die Vorteile beider Verfahren auszunutzen. Siebdruck bietet vor allem den Vorteil in kurzer Zeit große Flächen mit gleichbleibender Qualität bedrucken zu können. Beim Aerosol-Jet handelt es sich hingegen um einen digitalen Herstellungsprozess, wodurch Designs flexibel angepasst werden können. Gleichzeitig liegt die Druckauflösung über der von Siebdruck.

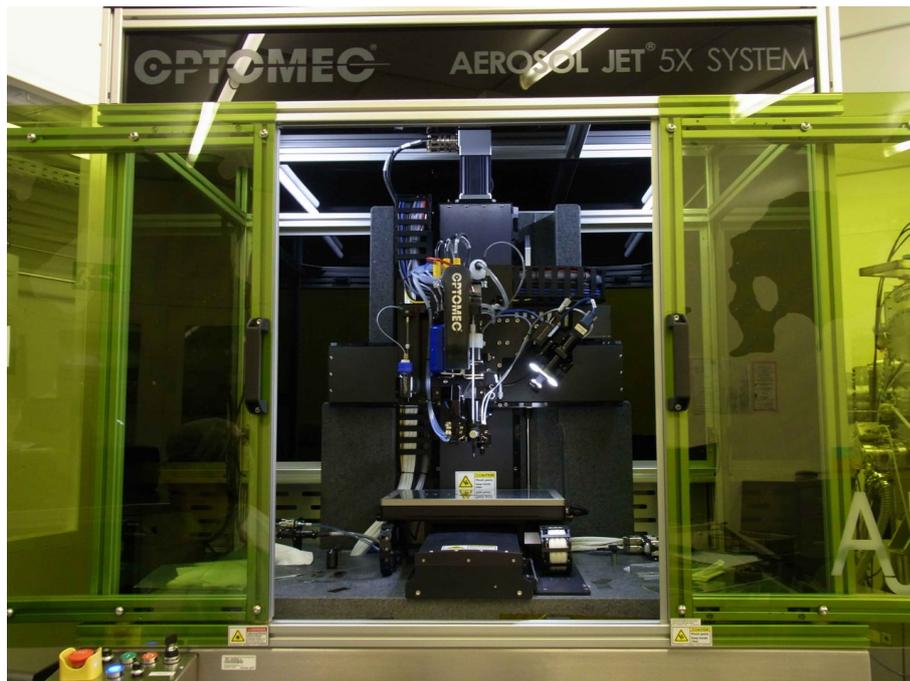


**Abbildung 3.1:** In der Abbildung sind die wichtigsten Begrifflichkeiten und der schematische Aufbau des Siebdrucks dargestellt. Die abgebildete Rahmenposition entspricht der Wechselposition. Die tiefere Position des Rahmens entspricht der Druckposition, welche ebenfalls angedeutet ist.

### 3.1.1 Siebdruck

Während Siebdruck im Kunsthandwerk bereits eine jahrhundertalte Geschichte aufzuweisen hat, ist die Verwendung in der Elektronik verhältnismäßig jung [86]. Bei Siebdruck wird eine Schablone mit der eingelassenen Druckstruktur verwendet, um auf die Probe einen Abdruck der Struktur aufzudrucken. Die Schablone besteht aus einem Rahmen, welcher mit einem feinem Gewebe bespannt wird. Die Wahl der Gewebedichte und die verwendete Fadengröße bestimmen maßgeblich die Eigenschaften des Drucks, wie beispielsweise die Schichtdicke, das Auflösungsvermögen und die grundsätzliche Qualität des Abdrucks. Bei der Herstellung der Schablone wird das Gewebe des bespannten Rahmens mit einer Fotoemulsion beschichtet. Mithilfe von UV-Licht und einer Belichtungsmaske, die das gewünschte Druckbild enthält, wird die zuvor aufgebraute Fotoemulsion belichtet. Dabei härten die belichteten Stellen aus, während in einem zweiten Schritt die abgedeckten Bereiche freigespült werden. [87, 88] Damit ist der Rahmen für den eigentlichen Siebdruckvorgang vorbereitet.

Für den Druckvorgang wird das Sieb zunächst in die Siebdruckmaschine eingebaut und alle Druckparameter eingestellt. Anschließend wird die Drucktinte/Paste vorsichtig auf das Gewebe im Rahmen aufgebracht. In Abbildung 3.1 ist der Siebdruckvorgang schematisch dargestellt. Neben dem Rahmen wird das sogenannte Druckraker benötigt, welches aus einem elastischem Gummi besteht und beim Druckvorgang in einem definiertem Winkel über das Sieb gezogen wird. Bei Siebdruckmaschinen ist häufig zusätzlich das sogenannte Flutraker zu finden. Dieses dient nach dem Druck dazu das Gewebe/Sieb wieder mit Drucktinte zu fluten und diese gleichmäßig über die Schablone zu verteilen. Der Vorgang verläuft dabei nach einem festen Muster. Der Ausgangspunkt beim Druck ist in der Abbildung 3.1 gezeigt. Zunächst befindet sich der Rahmen in der Wechselposition. Durch den großen Abstand zwischen Drucktisch und Rahmen ist das Substrat gut zugänglich und kann ausgetauscht werden. Dieses darf während des Druckvorgangs nicht verrutschen und wird beispielsweise durch den verbauten Vakuumtisch fixiert. Nachdem ein frisches Substrat eingelegt wurde, fährt der Rahmen in die Druckposition. Der Abstand zwischen Substrat und Rahmen nennt sich Absprunghöhe, welcher zuvor gezielt eingestellt wird und Einfluss auf das Druckergebnis hat. Sobald die Druckposition erreicht wurde, wird das Druckraker abgesenkt und über das Sieb gezogen. Dabei wird das Gewebe/Sieb durch das Raker bis auf das Substrat heruntergedrückt, dass sich somit im unmittelbaren Kontakt zueinander befindet. Gemäß der Schablone wird an den offenporigen Gewebestellen, die Drucktinte



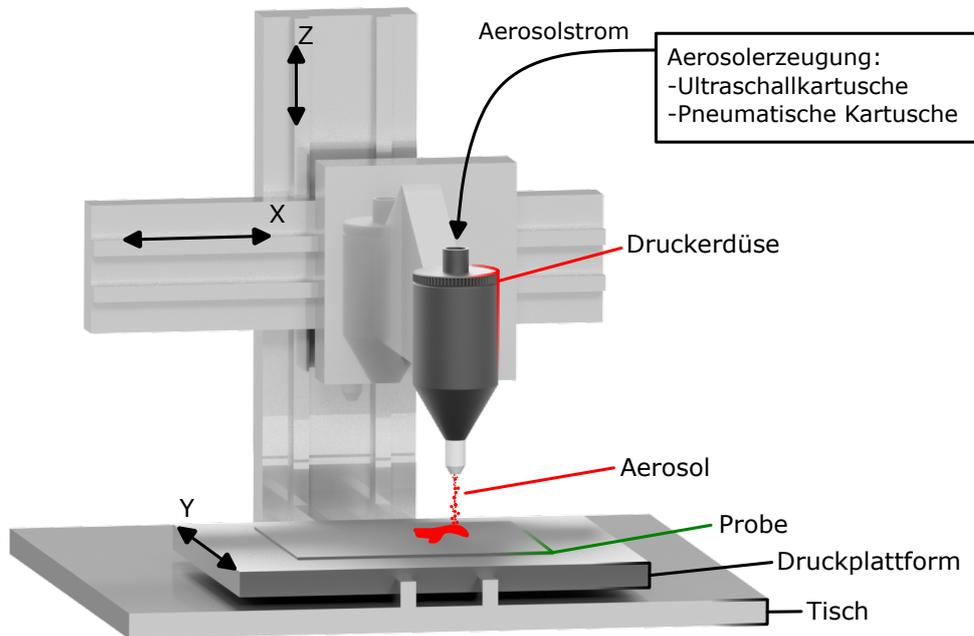
**Abbildung 3.2:** Fotoaufnahme des Aerosol-Jet-Druckers (Aerosol Jet 5X System, Optomec, Inc.) im LTI Reinraum. Im Mittelpunkt befindet sich die Druckerdüse, die mit der oberhalb befindlichen Druckerkartuschen zur Aerosolzerzeugung verbunden ist. Die gesamte Druckeinheit ist auf einer Positioniereinheit montiert. Unterhalb der Druckerdüse befindet sich die Druckplattform, die zur Aufnahme der Probe dient.

auf das Substrat gedrückt. Da das Sieb unter Spannung steht, federt dieses direkt hinter dem Druckrakel wieder zurück in Ausgangslage (Absprunghöhe). Dabei verbleibt ein Teil der Drucktinte auf dem Substrat zurück und bildet so die Schablone ab. Nachdem das Druckrakel die Schablone vollständig abgefahren hat, wird dieses angehoben und der gesamte Rahmen in die Wechsellage gefahren. Der Druckvorgang wird beendet indem sich das Flutrakel auf das Sieb absetzt und die Drucktinte zurück in die Ausgangsposition schiebt und dabei das Sieb mit frischer Drucktinte auffüllt (geflutet). Danach kann das bedruckte Substrat entfernt und nachbehandelt (z.B. getrocknet) werden. Sollen mehrere Schichten aufgebracht werden, erfolgt nach jedem Druckvorgang ein eigener Nachbehandlungsschritt, da die Tinten andernfalls auf dem Substrat vermischt werden. Für weitere Schichten muss daher die Probe wieder in die Siebdruckmaschine eingelegt und gegebenenfalls die Ausrichtung der Schichten zueinander beachtet werden. Dazu kann beispielsweise eine spezielle Ausrichtmarkierung im Druckbild vorgesehen werden. [89, 86, 87, 88]

Für die Herstellung des Temperatursensor-Arrays auf Folie wird eine semi-automatische Siebdruckmaschine vom Typ SD 05 der Marke RokuPrint GmbH verwendet. Für die Arbeit bietet diese Herstellungsmethode den Vorteil, dass in kurzer Zeit großflächige Strukturen mit hoher Leitfähigkeit und guter Qualität hergestellt werden können. Die siebgedruckten Zuleitungen zur Kontaktierung des Sensors werden im nächsten Schritt mithilfe von Aerosol-Jet-Druck um die eigentliche Sensorstruktur ergänzt.

### 3.1.2 Aerosol-Jet-Druck

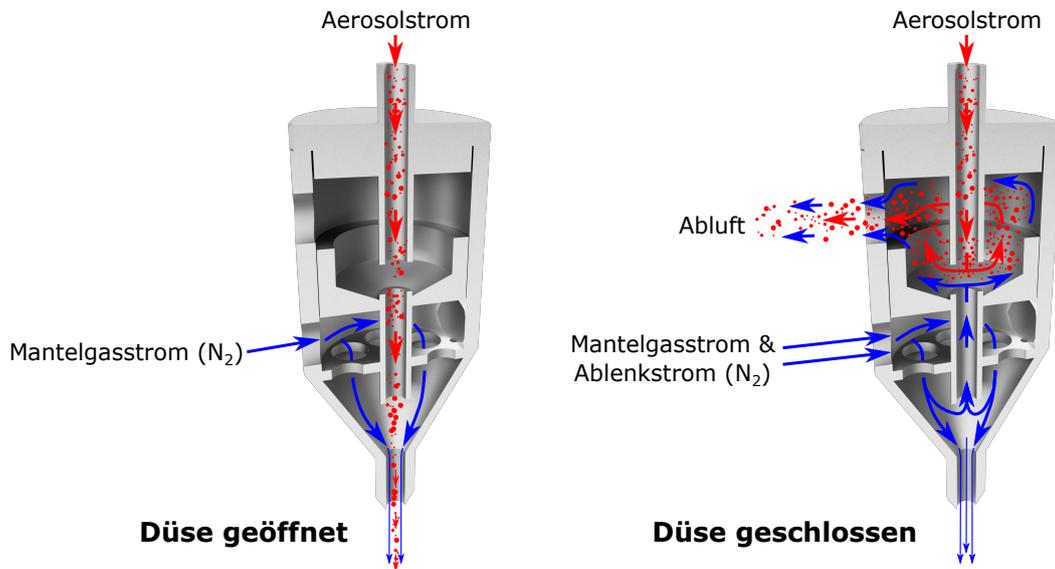
Der im LTI verfügbare und verwendete Aerosol-Jet ist in Abbildung 3.2 gezeigt. Der Aerosol-Jet-Druck ermöglicht durch die Zerstäubung von Drucktinte in ein Aerosol und eine anschließende aerodynamische Fokussierung, das Aufbringen feinsten Strukturen. Das Verfahren ist eine kontaktlose und digitale Druckmethode, die das Drucken auf zwei- und dreidimensionalen Oberflächen erlaubt. Das Verfahren ist mit einer Vielzahl an Tinten kompatibel, weshalb es im Bereich der gedruckten Elektronik unter der Verwendung



**Abbildung 3.3:** Das Schaubild zeigt die grundlegende Funktion des Aerosol-Jet-Druckprinzips. Mithilfe eines hochpräzisen Verfahrensystems kann die Druckerdüse über die Probe gefahren werden. In der Druckerdüse wird ein zuvor erzeugtes Aerosol verdichtet und stark fokussiert auf das Substrat gesprüht.

von metallischen, nanopartikulären Tinten eine sehr beliebte Herstellungsmethode geworden ist. Allerdings erfordern stabile und reproduzierbare Herstellungsprozesse meist langwierige Druck- und Parameteroptimierungen, wodurch Aerosol-Jet bislang vor allem im wissenschaftlichen Umfeld zu finden ist [90]. Für die Herstellung der Temperatursensoren wurde ein Aerosol-Jet-Drucker vom Modell AJ 5X der Marke Optomec, Inc. in der Decathlon 1.0 Version verwendet. Zwei Hauptaspekte sind wesentlich für dieses Herstellungsverfahren: 1) Die Steuerung und das präzise Verfahren der Druckerdüse. 2) Die Erzeugung des Aerosols aus der Drucktinte, sowie die Wahl der Druckparameter.

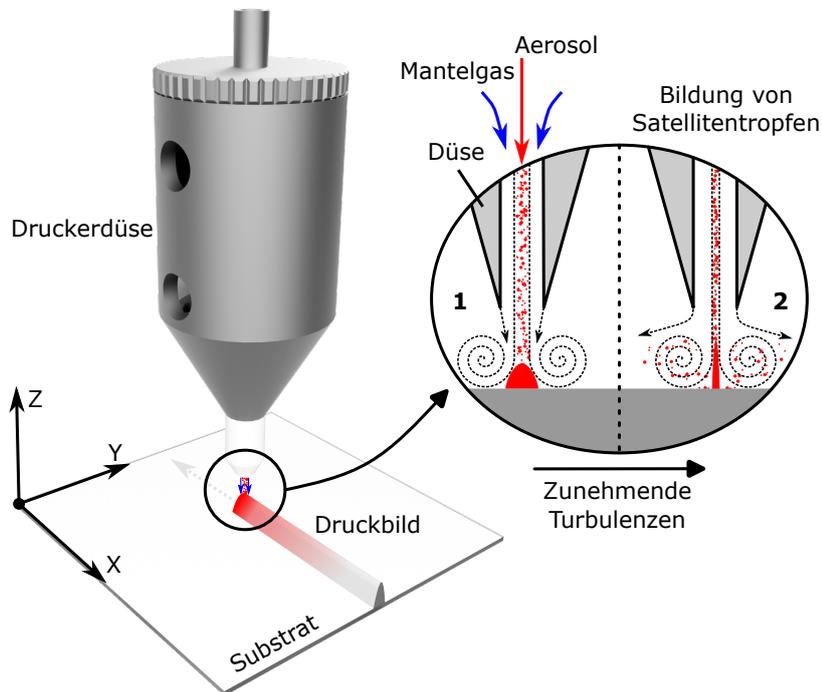
Das Grundprinzip des Aerosol-Jet-Druckverfahrens ist in Abbildung 3.3 stark vereinfacht dargestellt. Dazu wird eine Druckerdüse präzise über ein Substrat/Probe verfahren und gleichzeitig die Deposition von Material gesteuert. Die Tinte wird der Druckerdüse in Form eines Aerosols bestehend aus Tröpfchen mit einer Größe von  $1 - 5 \mu\text{m}$  zugeführt. Das Verfahren zur Aerosolerzeugung ist für sich gesehen ein komplexer Prozess, weshalb darauf detailliert im späteren Verlauf des Abschnitts eingegangen wird. Die Druckerdüse lässt sich mithilfe einer linearen Präzisionspositioniereinheit (*Stage*) verfahren und erreicht eine Anfahrnauigkeit von  $< 10 \mu\text{m}$ . [91] Das Substrat/Probe wird unterhalb der Druckerdüse auf die Druckplattform gelegt. Die Plattform besitzt Bohrungen, um das Substrat per Vakuum auf dem Tisch zu fixieren. Gleichzeitig lässt sich die Plattformoberfläche auf bis zu  $120^\circ\text{C}$  hochheizen, womit sich die deponierte Drucktinte gegebenenfalls bereits Trocknen lässt. Die Druckerdüse befindet sich etwa  $1 - 5 \text{ mm}$  oberhalb des Substrats, weshalb das Druckverfahren sehr tolerant gegenüber Oberflächenunebenheiten ist. Falls gewünscht, kann die Druckplattform gegen eine 3-Achsenhalterung getauscht werden, sodass schließlich fünf Verfahrrichtungen zur Verfügung stehen und selbst dreidimensionale Strukturen bedruckt werden können. Die gesamte Ansteuerung des Aerosol-Jet-Druckers erfolgt über einen Computer mit eigenständiger Bedienoberfläche. Die Druckstruktur wird mithilfe von Druckpfaden definiert. Diese können entweder händisch in Maschinencode programmiert oder aus einem CAD-Programm (AutoCAD, Autodesk) exportiert werden. Flächen werden durch das aneinanderreihen von Linien erzeugt, sodass die Füllung meist mit einer Mäander- oder



**Abbildung 3.4:** Querschnitt durch die Druckerdüse beim Aerosol-Jet-Drucker. In der Druckerdüse erfolgt die Fokussierung des Aerosolstroms mithilfe eines außen liegenden Mantelgasstroms. In der Druckerdüse ist ein aerodynamisches Ventil (*Shutter*) implementiert. Das linke Bild zeigt die Düse im geöffneten und druckenden Zustand. Im rechten Bild wird der Aerosolstrom durch zusätzliche Gasströme abgelenkt und abgesaugt. Dies wirkt wie ein geschlossenes Ventil. [92]

Kreisstruktur realisiert wird. Da es sich um ein digitales Druckverfahren handelt lassen sich selbst komplexe Formen und Strukturen schnell realisieren und können bei Bedarf modifiziert werden.

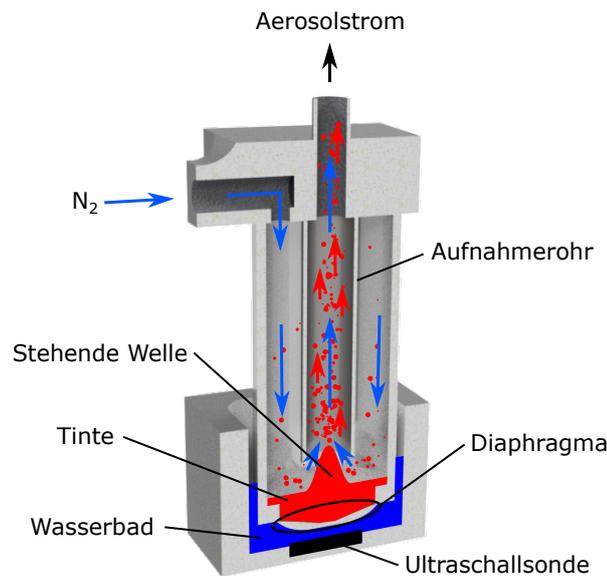
Das Druckprinzip beruht maßgeblich auf einem aerodynamische Fokussierverfahren in der Druckerdüse. Das Konzept ist in Abbildung 3.4 veranschaulicht, wobei das linke Bild den druckenden Zustand während des Drucks darstellt und rechts den geschlossenen Zustand. Für den Drucker sind Druckerdüsen mit unterschiedlichen Innendurchmessern von 100  $\mu\text{m}$  bis 1 mm verfügbar. Damit lassen sich etwa Linien zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 600  $\mu\text{m}$  drucken, wobei die erzielte Linienbreite stark von der Tinte und den gewählten Parametern abhängt. Dazu wird der Aerosolstrom, bestehend aus Tintentröpfchen und dem Trägergas (meist Stickstoff), senkrecht in die Druckerdüse geleitet. Durch eine zweite Öffnung in der Druckerdüse wird ein zweiter Stickstoffstrom, der sogenannte Mantelgasstrom, zugeführt, wodurch der Aerosolstrom umhüllt wird. Durch das Mantelgas und die Bauform der Druckerdüse kommt es zu einer Komprimierung des Aerosolstroms in der Mitte. Die Gasflussraten beider Gasströme lassen sich präzise einstellen, wodurch das Kompressionsverhältnis und die damit erzielte Fokussierung eingestellt werden kann. Die Druckerdüse sorgt nicht nur für die Fokussierung und Ausrichtung des Aerosolstrom, sondern beinhaltet in der verwendeten Bauform außerdem ein aerodynamisches Ventil (*Shutter*). Dadurch lässt sich der Druckvorgang gezielt unterbrechen, wenn beispielsweise die Düse zwischen Strukturpunkten verfahren werden muss. Das Funktionsprinzip [92] ist in der rechten Abbildung 3.4 dargestellt. Dazu wird neben dem Mantelgasstrom zusätzlich ein weiterer Ablenkstrom eingeleitet. Die Bauform der Düse sorgt dafür, dass der senkrecht einströmende Aerosolstrom in einer ersten Stufe durch den Ablenkenstrom zur Seite abgelenkt wird. Durch eine zweite seitliche Öffnung wird das Aerosol schließlich abgesaugt, sodass am Düsenausgang lediglich Stickstoff austritt. Somit können durch das Umschalten der Gasströme zwei Zustände in Form einer geöffneten oder geschlossenen Düse realisiert werden. Da dieses Verfahren beim Öffnen und Schließen verhältnismäßig langsam ist, kann zusätzlich unterhalb der Düsenöffnung ein mechanisches Ventil platziert werden. Dieses besteht letztendlich aus einem beweglichen Löffel, der das austretende Aerosol im geschlossenen Zustand auffängt. Allerdings



**Abbildung 3.5:** Detaillierte Darstellung des Druckprinzips beim Aerosol-Jet-Druckverfahren. Mithilfe eines äußeren Mantelgasstroms wird der innen liegende Materialstrom aerodynamisch fokussiert und auf die Probe gelenkt.

kommt es über die Zeit zu einer Ansammlung der Tinte im Löffelkopf, welche beim Verfahren des Löffels zu Tintenspritzern auf der Probe führen kann. Das mechanische Ventil ermöglicht Umschaltzeiten von wenigen Millisekunden.

Beim eigentlichen Druck, das heißt bei der Deposition des Aerosolstroms auf der Probe, spielen verschiedene Faktoren eine wichtige Rolle. Ein idealisierter Druckvorgang ist in Abbildung 3.5 veranschaulicht. Wie bereits zuvor beschrieben wurde, kommt es in der Druckerdüse mithilfe eines Mantelgases zu einer Fokussierung des Aerosolstroms. Beide Gasströme treten am Ausgang der Düse möglichst gleichmäßig und laminar aus. Dieses Verhalten wird vor allem durch die Tröpfchengröße und den Gasstrom beeinflusst, was sich durch die Stokes Zahl ausdrücken lässt. Diese ist eine dimensionslose Kennzahl, das das Verhalten von Teilchen in einem bewegtem Fluid beschreibt. Die physikalische Beschreibung kann im Detail in wissenschaftlicher Fachliteratur nachgelesen werden [93, 94]. Die Form der gedruckten Linie lässt sich maßgeblich durch die Druckgeschwindigkeit, die gewählte Materialflussrate und die Fokussierung bestimmen. Je nach Material lassen sich so in einem Zug Schichtdicken im Bereich von 100 nm bis hin zu mehreren  $\mu\text{m}$  erzielen und somit große Aspektverhältnisse erreichen. Ein häufig auftretendes Phänomen ist die Bildung von sogenannten Satellitentropfen (*Overspray*). Dabei handelt es sich um Sprühnebel der sich neben der eigentlichen Drucklinie auf dem Substrat ablegt und gegebenenfalls das Endergebnis negativ beeinflusst. Dies kann beispielsweise bei einer starken Fokussierung durch einen hohen Mantelgasanteil, wie im Bild 3.5 (2) dargestellt ist, auftreten. Dabei entstehen verstärkt Turbulenzen, die zu einer großflächigeren Verteilung der Tröpfchen führt. Alternativ können zu kleine Aerosoltröpfchen einen ähnlichen Effekt verursachen. Diese entstehen beispielsweise durch den Verlust von Lösungsmittelvolumen durch Verdampfen während der Flugzeit von Aerosolerzeugung hin zur Druckdüse. Eine optimale Linie weist einen gleichmäßigen Rand mit einem symmetrischen Schichtverlauf auf. Sollten die Ränder verlaufen, ist die Tinte entweder zu feucht oder zu viel Material wird deponiert. Im Gegenzug kommt es bei zu wenig und zu trockener Tinte, zu einer

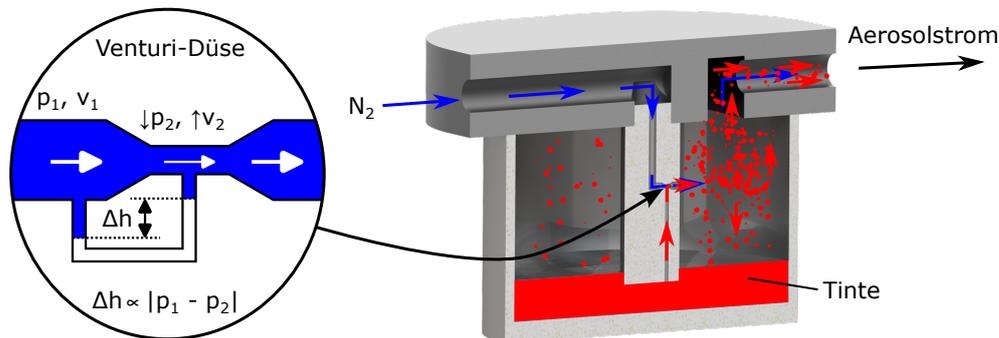


**Abbildung 3.6:** Das Bild zeigt die beim Aerosol-Jet-Druck verwendete Ultraschallkartusche. Mithilfe von Ultraschall wird die Drucktinte in der Kartusche zerstäubt und durch ein Trägergas zur Druckerdüse weitertransportiert.

regelmäßig ausgefranzten Linie, die im Zentrum nicht voll ausgeprägt ist. Gleichzeitig nimmt die Anzahl an Satellitentropfchen aufgrund vieler sehr kleiner Tropfchen auf der Probe zu [95, 94].

Zuletzt soll noch die Aerosolerzeugung erläutert werden. Dem verwendeten Drucker stehen mit einer Ultraschallkartusche und einer pneumatischen Kartusche zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung. Die Ultraschallkartusche ermöglicht das Vernebeln von Drucktinten mit einer Viskosität von 1 – 15 cP. Der Querschnitt der verwendeten Ultraschallkartusche ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Zunächst werden 2 – 3 ml der Drucktinte in den Tintentank gefüllt. Der Tintentank ist von der Unterseite mit einem flexiblen Diaphragma verschlossen. Der untere Teil des Tanks befindet sich in einem Wasserbad, wobei das Wasser als Transfermedium für den induzierten Ultraschall dient. Die Ultraschallsonde wiederum sitzt direkt unter dem Tintentank und erzeugt im Tank in der Tinte eine stehende Welle. An der Spitze der stehenden Welle werden kleine Tröpfchen mit 1 – 5 µm Durchmesser emittiert, die in der Summe das Aerosol bilden. Mithilfe eines von außen zugeführten Trägergases (meist Stickstoff) wird das Aerosol abtransportiert und durch einen Schlauch zur Druckerdüse geleitet. Der gesamte Tintentank kann temperiert werden, um die Tinteneigenschaften zu verändern. [96, 97, 90]

Alternativ kann zur Aerosolerzeugung eine pneumatische Kartusche genutzt werden. Hauptvorteil dieser Erzeugungsart ist die Möglichkeit Tinten mit einer Viskosität bis etwa 1000 cP zu zerstäuben. Der Tankaufbau der pneumatischen Kartusche ist in Abbildung 3.7 im Querschnitt dargestellt. Für die Funktion sind 10 ml Drucktinte erforderlich. Um ein Absetzen oder Entmischen der Tinte zu verhindern, ist in der Kartusche ein Magnetrührer verbaut. Gleichzeitig kann der Tintenbehälter beheizt und damit die Tinteneigenschaften angepasst werden. Die Zerstäubung der Tinte erfolgt unter Ausnutzung des Venturi-Effekts. Das Prinzip ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Werden die Fließgeschwindigkeiten und Drücke in einem Rohr mit Engstelle betrachtet, kommt es vor der Engstelle zu einem erhöhtem Druck (Staudruck). Beim passieren der Engstelle nimmt der Druck dagegen ab, während die Fließgeschwindigkeit jeweils im Verhältnis der Rohrdurchmesser zunimmt. Dieser Zusammenhang erfüllt letztendlich das Kontinuitätsgesetz, da im gesamten Rohr immer die gleich Menge an Wasser fließen muss. Werden die Drücke zwischen den Abschnitten miteinander verglichen,



**Abbildung 3.7:** Darstellung und Aufbau der pneumatischen Druckkartusche beim Aerosol-Jet-Druck. Unter Ausnutzung des Venturi-Effekts wird Drucktinte angesaugt und unter Druck im Tintentank versprüht. Das dabei entstehende Tintenaerosol wird durch einen Trägergasstrom zur Druckerdüse weitertransportiert.

zeigt sich eine Druckdifferenz. Dieser Druckabfall kann genutzt werden, um beispielsweise Flüssigkeiten anzusaugen [98].

Genau dieses Prinzip der Venturi-Düse wird in der pneumatischen Kartusche angewendet. Die angesaugte Drucktinte wird gleichzeitig im Tank wieder ausgestoßen und dadurch zerstäubt. Ein Teil der gebildeten Tröpfchen wird mithilfe eines Gasstroms aus dem Tank transportiert und zur Druckerdüse geleitet. Der Rest setzt sich wieder im Tank ab und wird erneut zerstäubt. Der verwendete Drucker besitzt zusätzlich noch einen sogenannten virtuellen Impaktor, welcher zum Selektieren der Tröpfchengröße dient. Dies geschieht durch Ablenken oder Absaugen der Tröpfchen, die aber aufgrund der jeweils individuellen Masse im Gasstrom unterschiedlich stark beeinflusst werden (Massenträgheit). Nur der gewünschte Anteil an Tröpfchen kann den virtuellen Impaktor in Richtung Druckerdüse passieren [97]. Die pneumatische Kartusche bietet daher viel Kontrolle über die Aerosoleigenschaften und sie ist deshalb gegebenenfalls auch bei niederviskosen Tinten der Ultraschallkartusche vorzuziehen.

Damit erweist sich Aerosol-Jet-Druck als eine sehr flexible und vielseitige Druckmethode. Um ein optimales Druckergebnis zu erzielen, besitzt der Drucker viele Freiheitsgrade und Einstellparameter. Hierin liegt wiederum auch der Nachteil, da viel Optimierungsarbeit notwendig ist. Wie in der Beschreibung in Kapitel 6.1.2 zur Herstellung des Sensorarrays dargestellt wird, reagiert der Aerosol-Jet-Druck sehr empfindlich auf Druckvariationen oder Turbulenzen. Daher sollten am Drucker regelmäßig alle Dichtungen auf Leckagen kontrolliert werden, um ein reproduzierbares Verhalten zu ermöglichen. Entsprechend wichtig ist eine hohe Sorgfalt bei der Reinigung der Maschine. In Kapitel 4.3 werden schließlich noch einige Beispieldrucke gezeigt, die verschiedene Probleme beim Aerosol-Jet-Druck in Kombination mit photonischem Sintern zeigen.

## 3.2 Rotationsbeschichtung

Die Rotationsbeschichtung (*Spin coating*) ist wohl eines der meistgenutzten Verfahren um eine gleichmäßige homogene Schicht aus einer Flüssigphase abzuschneiden. Der Vorteil des Verfahrens liegt einerseits in der hohen Qualität der Schichten, aber auch in der Einfachheit der Prinzipien. Der Vorgang verläuft nach einem festen Muster. Zunächst wird das Substrat oder die Probe vorbereitet, indem es gereinigt wird um Verunreinigungen und Unebenheiten der finalen Schicht zu vermeiden. Je nach verwendeten Materialien muss gegebenenfalls noch ein Haftvermittler aufgebracht werden. Danach wird das Substrat auf einem Drehteller (*Chuck*) fixiert.

Meist geschieht dies mithilfe einer Vakuumsaugung. Als nächstes wird das eigentliche Material mittig auf das Substrat aufgebracht. Die Menge des Materials wird dosiert indem beispielsweise eine Pipette verwendet wird. Letztendlich kann jedes Material, das in Lösung vorliegt, bei der Rotationsbeschichtung aufgebracht werden. Neben den Materialeigenschaften selbst, bestimmt die Drehzahl, die Beschleunigung und die Dauer die finale Schichtdicke. Dabei können in der Regel eine Drehzahl von bis zu 10000 rpm erreicht werden. Nach dem Aufbringen wird die Probe mit dem Material auf dem Drehteller mit den gewählten Parametern rotiert. Die dabei wirkenden Fliehkräfte verteilen das Material gleichmäßig auf dem Substrat, wobei überschüssiges an den Rändern abgeschleudert wird. Manche Rotationsbeschichter erlauben das hintereinander Ausführen mehrerer Rotationsprofile mit verschiedenen Drehzahlen, womit die Qualität teilweise nochmal gesteigert werden kann. Nach dem Rotationsvorgang wird das Substrat entfernt und meist einem Trocknungs- oder Ausheizprozess zugeführt. Dadurch kann das Lösungsmittel aus der Schicht entfernt oder eine Materialumwandlung initiiert werden. [99, 100, 101]

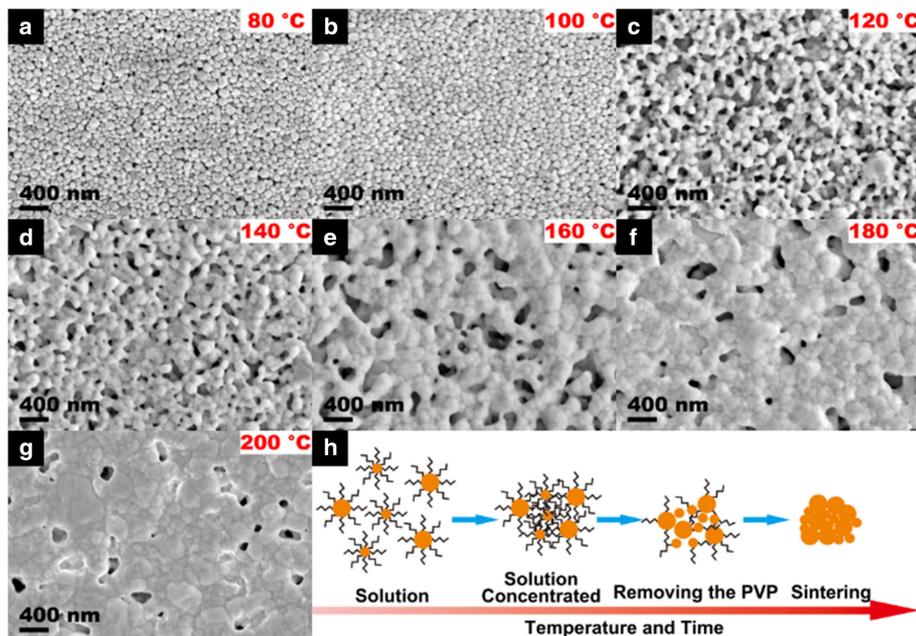
Bei dieser Arbeit wird das Verfahren eingesetzt, um eine etwa 5 µm elektrische Isolatorschicht aufzubringen. Gleichzeitig stellt die hergestellte Polymerschicht eine geeignete Grundlage für den anschließenden Druckprozess dar.

### 3.3 Schichtnachbehandlung

Bei Flüssigprozessierung folgt in aller Regel eine Schichtnachbehandlung. Insbesondere bei leitfähigen Tinten ist ein reines Trocknen der Schicht normalerweise nicht ausreichend um die Funktion herzustellen. Die Schichtnachbehandlung lässt sich in die Begriffe Aushärten, Trocknen und Sintern unterteilen. Die Vorgänge zielen in der Regel darauf ab in den gedruckten Materialien chemische und physikalische Reaktionen auszulösen und diese gegebenenfalls zu beschleunigen. Erst dadurch wird die Schicht funktionalisiert und die gewünschten elektrischen, mechanischen oder optischen Eigenschaften erreicht. [84, 102, 85]

**Aushärten & Trocknen:** Unter dem Begriff werden verschiedener Vorgänge zusammengefasst, wobei diese meist in einem chemischen Zusammenhang stehen. Trocknen ist wohl die offensichtlichste Form, wobei zum Beispiel durch Wärmezufuhr Lösungsmittel oder Additive aus der Schicht getrieben werden. Bei Polymeren oder Harzen ist dagegen meist ein Aushärten der Schichten erforderlich, um ein Vernetzen der chemischen Strukturen (Monomeren) zu ermöglichen. Je nach Material variieren die Verfahren um den Prozess anzustoßen, möglich sind beispielsweise UV-Strahlung, Wärmezufuhr oder chemische Behandlung.

**Sintern:** Besonders bei leitfähigen metallischen Materialien, aber auch bei Keramiken/Oxiden spielt Sintern eine wichtige Rolle. Die erzeugte Temperatur im Material erfüllt dabei zwei Funktionen: Erstens werden die in den Tinten verwendeten Nanopartikel meist mit organischen Zusätzen verkapselt, um die Druckbarkeit der Tinten zu gewährleisten. Dies verhindert ein Agglomerieren der Nanopartikel, ermöglicht das Dispergieren oder stellt die Kompatibilität zur Substratoberflächen sicher. Allerdings reduzieren diese Zusatzstoffe die Leitfähigkeit der Metalltinte [84]. Beim Sintern zersetzen sich und/oder verdampfen diese Zusatzstoffe. Zweitens kommt es beim Sintervorgang zu einem Verschmelzen der einzelnen Nanopartikel. Diese werden in ein thermisches Verfahren bei Temperaturen von meist deutlich über 100 °C, aber unterhalb der Schmelztemperatur des Vollmaterials, miteinander verbunden. Bei Nanopartikeln reduziert sich die Schmelztemperatur aufgrund der Oberflächenenergie nahezu linear mit der Inversen des Partikeldurchmessers [103, 104]. Beim Verschmelzen verdichtet sich die Nanopartikelstruktur und es formt sich eine poröse Schicht. Infolge der Vernetzung nimmt die Leitfähigkeit des Materials rapide zu. Abbildung 3.8 zeigt den Sintervorgang anhand von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen einer Silbernanopartikelschichten bei verschiedenen Temperaturen. Mit zunehmender Temperatur vernetzen sich die zunächst separierten Partikel. Die Partikelform bleibt

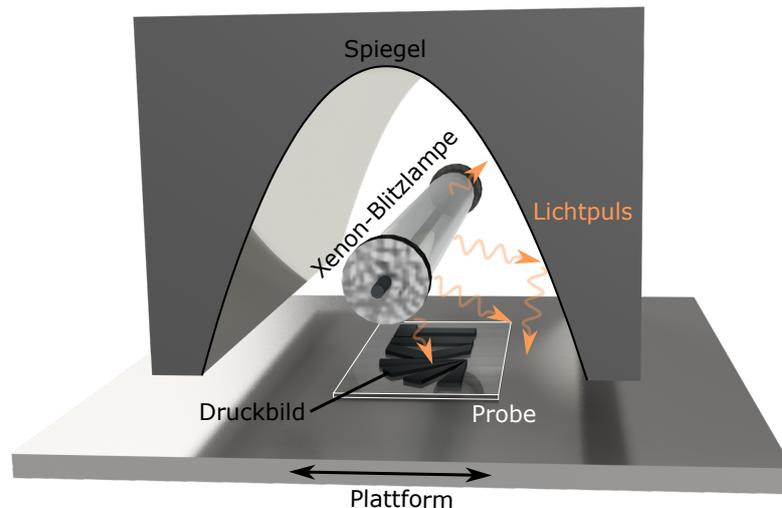


**Abbildung 3.8:** Die Abbildung zeigt Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Silbernanopartikelschichten, die bei unterschiedlichen Temperaturen (a-g) für 75 min gesintert wurden. Mit zunehmender Temperatur bildet sich aus den einzelnen Nanopartikeln ein Netzwerk, das schließlich regelrecht verschmelzen. (h) Schematische Darstellung des Sintervorgangs. Die Abbildung wurde von [105] entnommen; CC-BY 4.0.

zunächst noch erhalten. Steigt die Temperatur weiter, wächst die Struktur zusammen und die Dichte nimmt zu, während die Hohlräume im Material abnehmen. Die Leitfähigkeit der Schicht nimmt dabei stetig zu.

Eine Vielzahl an Sinterverfahren sind inzwischen entwickelt worden. Bei Verwendung einer thermischen Sintermethode bereitet der Einsatz von Kunststoffsubstraten mit einer limitierten Temperaturstabilität bei der gedruckten Elektronik jedoch Probleme. Im Folgenden findet sich eine Übersicht über die wichtigsten Sinterverfahren:

- **Thermisches Sintern:** Eine simple und meist kostengünstige Art ist, die Verwendung einer Heizplatte oder eines Ofens zum Sintern der Proben. Dabei kann es allerdings zu Problemen mit temperatursensitiven Substraten kommen. Teilweise sind die gedruckten Schichten anfällig für Rissbildung.
- **Lasersintern:** Erlaubt die Erzeugung einer stark lokalisierten Hitzeeinwirkung mit hoher Kontrolle über Leistung und Wirkdauer. Die Wellenlänge des Lasers kann auf die Absorptionswellenlänge des zu sinternen Materials abgestimmt werden, wodurch der Prozess selektiv wird. Beim Sintern von Flächen ist ein Abrastern nötig, was sich negativ auf die Bearbeitungsdauer und Homogenität der Schicht auswirkt. Da die Einwirkzeit sehr kurz sein kann, können auch Folien als Substrat verwendet werden.
- **Plasmasintern:** In geeigneten Tinten verursachen die in einem Plasma erzeugten Ionen eine Dekomposition der organischen Zusatzstoffe. Dadurch kommen die funktionalen Bestandteile in Kontakt und die Leitfähigkeit der Schicht wird gesteigert. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein chemisches Sinterverfahren.
- **Photonisches Sintern:** Dabei wird mithilfe eines Blitzlichts ein ultrakurzer, hochenergetischer Blitz generiert und auf das Substrat geleitet. Da diese Methode in dieser Arbeit zum Sintern eingesetzt wird, befindet sich eine ausführliche Erklärung im nachfolgenden Abschnitt 3.3.1.



**Abbildung 3.9:** Schematische Darstellung des Aufbaus einer photonischen Sinteranlage. Mithilfe einer Xenon Blitzlampe wird ein hochenergetischer Lichtblitz erzeugt. Dabei wird der Probenaufbau meist so gewählt, dass das Substrat möglichst wenig Energie absorbiert und so beispielsweise Kunststofffolien nur eine geringe thermische Belastung erfahren. Hingegen wird in der gedruckten Schicht viel Energie absorbiert und somit kurzzeitig eine hohe Sintertemperatur erreicht.

Die vorgestellten Methoden zum Aushärten, Trocknen und Sintern stellen nur eine kleine Auswahl der möglichen Prozesse dar. Teilweise werden Nachbehandlungsschritte entworfen die individuell auf das Material zugeschnitten sind.

### 3.3.1 Photonisches Sintern

In dieser Arbeit wird zum Sintern der Aerosol-Jet gedruckten Silberschichten ausschließlich eine photonische Sinteranlage vom Typ Pulseforge 1200 der Marke Novacentrix eingesetzt. Das Funktionsprinzip beruht auf der Verwendung eines hochenergetischen Lichtblitzes, der für eine sehr kurze Zeit in der Materialschicht ein hohe Temperatur erzeugt und den Sinterprozess induziert. Gleichzeitig eignet sich das Verfahren zum Sintern großer Flächen innerhalb weniger Sekunden und ist daher auch für die industrielle Anwendungen von Interesse. [106, 107, 108, 102, 109]

Der Aufbau einer photonischen Sinteranlage ist schematisch in Abbildung 3.9 dargestellt. Hauptbestandteil ist eine Xenon-Blitzlampe, die in einem Spektrum von 200 nm bis etwa 1000 nm abstrahlt. Diese ist gekoppelt an eine ausgeklügelte Steuerelektronik mit deren Hilfe die Blitzintensität, durch Wahl der Spannung und Blitzdauer, sowie die Anzahl der Blitze und Impulsform exakt gewählt werden können. Da die meisten transparenten Substrate in dem emittierten Spektralbereich nur geringfügig absorbieren, kommt es in diesen nur zu einer geringen thermischen Belastung. Durch die Implementierung von Lichtfiltern, können kritische Wellenlängen gegebenenfalls abgeschnitten werden. Werden sensible Substrate wie Kunststofffolien eingesetzt, die nur bis knapp über 100 °C temperaturstabil sind, bietet dieses Verfahren große Vorteile. Somit kann Verzug und Schädigung der Materialien vermieden werden. Wird beispielsweise eine metallische Nanopartikel-tinte verwendet, absorbiert die Schicht einen Teil der Energie und kann innerhalb weniger Mikrosekunden einige hundert Grad Celsius erreichen. Dabei kommt es zu einem sehr effektiven versintern der Partikel in der Tinte, weshalb mit diesem Verfahren meist eine deutlich bessere Leitfähigkeit als bei einer klassischen Wärmebehandlung erreicht werden kann. Darüber hinaus erlaubt das photonische Sintern

sogar die Prozessierung von leicht oxidierenden Materialien (z.B. Kupfer) ohne inerte Atmosphäre. Für sehr empfindliche Materialien können die Proben bei der eingesetzten photonischen Sinteranlage sogar unter Stickstoff Atmosphäre inert verarbeitet werden. Bei dieser Arbeit führt eine klassische Wärmebehandlung der Elektroden auf einer Heizplatte zu Rissbildung. Dieses Problem verstärkte sich wenn die Elektroden zusätzlich auf bereits gedruckte Schichten gedruckt und anschließend wärmebehandelt wurden. Funktionale Elektroden konnten letztendlich nur mithilfe des photonischen Sinterns erreicht werden. In Kapitel 4.3 werden verschiedene Beispiele präsentiert, die die Schwierigkeiten beim Verarbeiten von gedruckten Silberelektroden mithilfe des photonischen Sinterns verdeutlichen.

## 4 Charakterisierungsmethoden und Materialien

*Dieses Kapitel präsentiert die Charakterisierungsmethoden des Sensors und gibt einen Überblick über die verwendeten Materialien. Verschiedene für die Charakterisierung und Analyse angewandte Verfahren sind in Kapitel 4.1 zu finden. Da das Temperatursensor-Array aus vielen einzelnen Schichten zusammengesetzt ist, mussten während des Druckvorgangs die aufgetragenen Schichten und Strukturen ständig überprüft werden. In Kapitel 4.2 werden die eingesetzten Materialien und Substrate näher beleuchtet, welche die Eigenschaften des Temperatursensor-Arrays definieren. Zum Abschluss des Kapitels 4.3 werden einige Druckbeispiele für den Aerosol-Jet-Druck in Kombination mit photonischem Sintern gegeben. Die Druckergebnisse werden anhand von Beispielen beurteilt und mögliche Lösungsvorschläge für die erkennbaren Herausforderungen und Probleme diskutiert.*

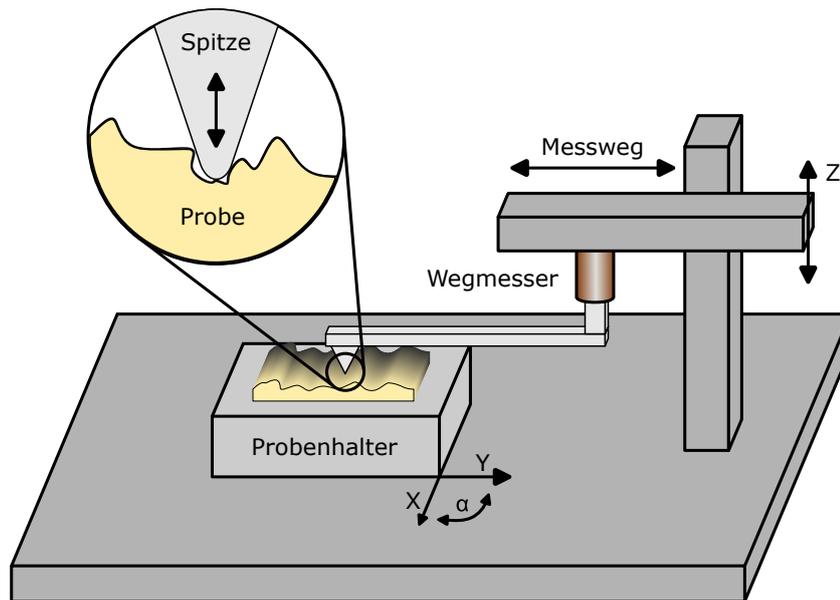
### 4.1 Verwendete Charakterisierungsmethoden

Zur Kontrolle der Oberfläche, Schichtdicke und Schichtstruktur werden bei dieser Arbeit verschiedene Charakterisierungsmethoden eingesetzt. Schon bei der Herstellung werden die frisch gedruckten Schichten begutachtet und gegebenenfalls die Druckparameter angepasst, um die gewünschte Strukturgröße und Qualität zu erzielen. Nach dem hochfahren des Druckvorgangs kommt es gerade zu Beginn regelmäßig zu einer Parameterdrift, die bei kleinen Strukturen umso mehr ins Gewicht fällt. Aber auch nach dem vollständigen Drucken des Temperatursensor-Arrays wird diese analysiert und das Schichtgefüge als Ganzes betrachtet. Damit können Fehler erkannt und Sensoren bereits vorab aussortiert werden. Im Folgenden wird die taktile Profilometrie, Weißlichtinterferometrie und das Funktionsprinzip eines Rasterelektronenmikroskop erklärt.

#### 4.1.1 Taktile Profilometrie

Bei der taktilen Profilometrie handelt es sich um eine Messmethode zur Bestimmung der Topologie einer Probe [110, 111]. Die Messung erfolgt durch das Abfahren der Oberfläche im direkten physikalischen Kontakt mit einer Messspitze. Der Topologie folgend schlägt sie Messspitze aus, was in ein Messsignal übersetzt wird. Im konkreten Fall wird ein Taststiftprofilometer vom Typ DektakXT der Firma Bruker eingesetzt.

In Abbildung 4.1 ist der schematische Aufbau zur taktilen Profilometrie nach dem Tastschnittverfahren dargestellt. Dabei wird eine Diamantspitze mit einer konstanten Geschwindigkeit über die Oberfläche einer Probe gefahren. Diese folgt der Topologie der Probe, indem sie in vertikaler Richtung ausschlägt. Der Ausschlag wird elektronisch erfasst und kann im Anschluss in der dazugehörigen Software ausgewertet werden. Letztendlich entspricht der gemessene Ausschlag der Topologie der Probe. Es gilt zu beachten, dass die Messspitze im direktem Kontakt und mit einem vordefiniertem Druck auf der Oberfläche aufliegt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass es bei der Messung nicht zu einem Verkratzen der Oberfläche und infolgedessen zu verfälschten Messergebnissen kommt. Wie in der Abbildung dargestellt ist, verfügt die Messspitze selbst über eine gewisse laterale Ausdehnung. Der Spitzenradius beträgt meist nur wenige Mikrometer. Wie dies in der Vergrößerung in Abbildung 4.1 durch kleine Hohlräume angedeutet ist, kann es



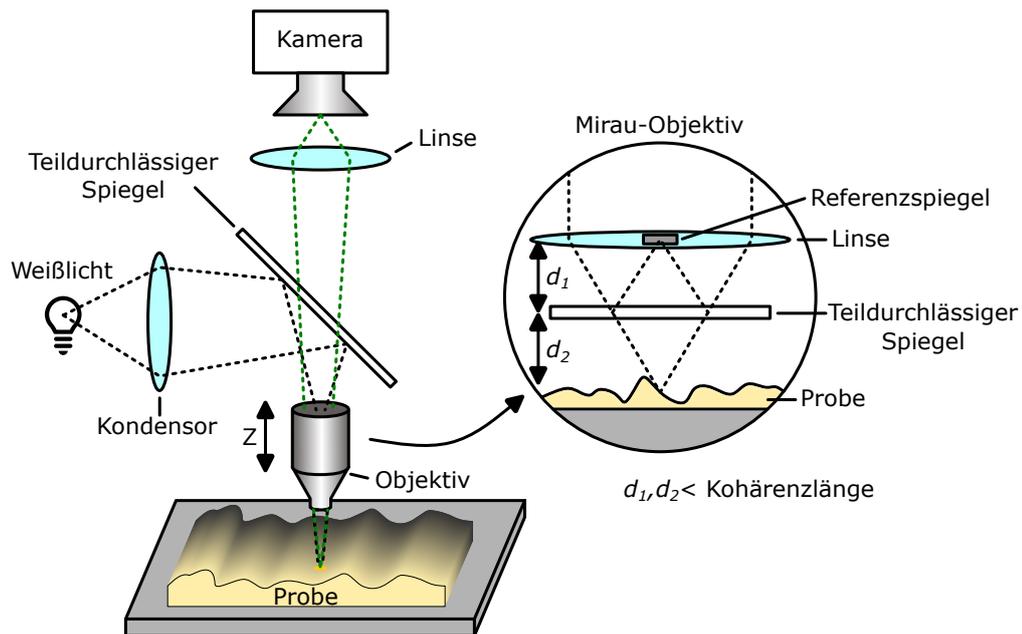
**Abbildung 4.1:** Die Abbildung zeigt das Grundprinzip bei der taktilen Profilometrie. Dabei wird die Probe mit einer aufliegenden Messspitze abgefahren. Die dabei initiierten Ausschläge in der Spitze werden mithilfe eines Kraftmessers detektiert und in das zugrundeliegende Höhenprofil umgerechnet.

bei sehr feinen Strukturen vorkommen, dass durch die Ausdehnung der Diamantspitze diese gegebenenfalls nicht vollständig aufgelöst werden [112]. Um die Dicke einer geschlossenen Schicht mit dem Profilometer zu messen, kann vorsichtig ein Teil der Schicht durch Verkratzen, beispielsweise mithilfe einer Nadel, entfernt werden. Dabei sollte das darunterliegende Substrat möglichst nicht verletzt werden. Die Schichtdicke kann somit direkt an der verursachten Rille ermittelt werden. Üblicherweise hat ein solches taktiles Profilometer ein minimales vertikales Auflösungsvermögen von bis zu 10 nm.

#### 4.1.2 Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie stellt eine kontaktlose Methode zur großflächigen Charakterisierung einer Topologie einer Oberfläche dar. Grundsätzlich basiert die Messmethode auf einem Michelson-Interferometer bei dem ein Lichtstrahl durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Strahlen aufgeteilt wird. Dabei wird ein Strahl auf einen Referenzspiegel geleitet und der zweite auf die Probenoberfläche. Kommt es im Anschluss zur Überlagerung der beiden Strahlen, kommt es zur Interferenz. Die Voraussetzung ist allerdings, dass die beiden Pfadlängen ungefähr gleich sind und der Längenunterschied weniger als die Hälfte der Kohärenzlänge beträgt [113]. Die maximale konstruktive Interferenz wird erreicht, wenn die beiden Pfadlängen exakt gleich lang sind.

Abbildung 4.2 zeigt den schematischen Aufbau eines Weißlichtinterferometers. Dabei ist die Verwendung von Weißlicht ein wichtiges Merkmal dieser Methode. Weißlicht bietet den Vorteil, dass die Interferenz aufgrund des breiten Spektrums nur bei nahezu identischen Pfadlängen klar ausgeprägt ist. Eine Verwechslung der Ordnung kann damit ausgeschlossen werden. Außerdem ist die Kohärenzlänge sehr kurz, sodass die Interferenz sehr sensitiv auf kleine Gangunterschiede reagiert und das Höhenprofil sehr präzise erfasst werden kann [113]. Die Komponenten eines Michelson-Interferometers sind hierbei im Mirau-Objektiv vereint, wobei das Funktionsprinzip das gleiche bleibt. Auch hier ist für Interferenz die Pfadlänge  $d_1$  zwischen dem Referenzspiegel in der Linse und dem Abstand zur Probe  $d_2$  entscheidend. Die kompakte Bauweise ist

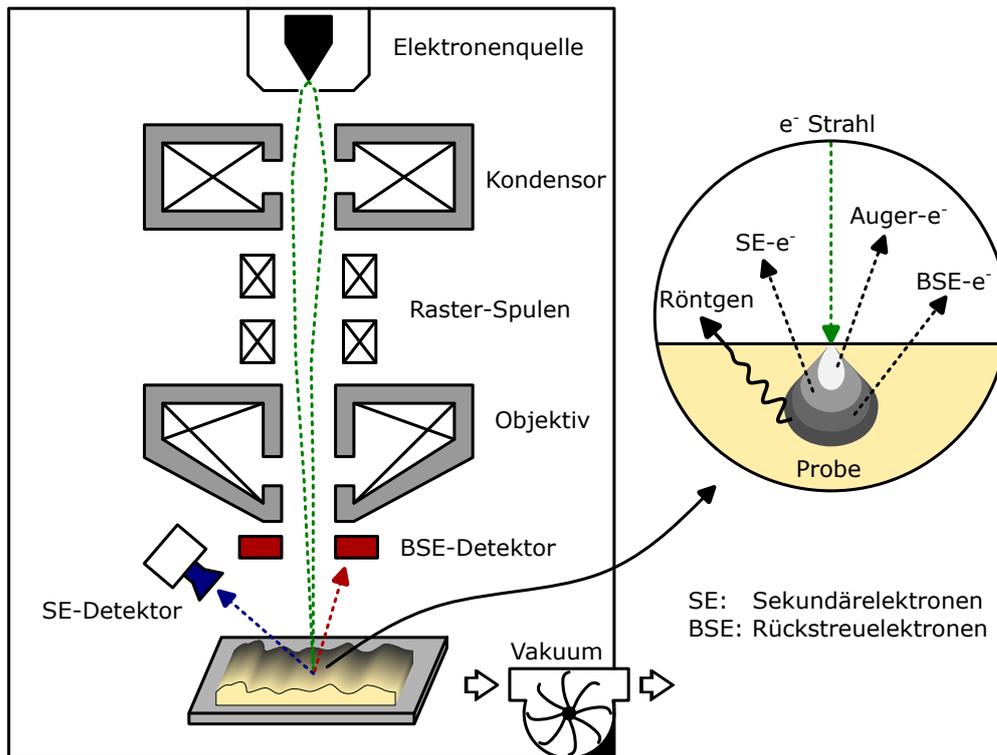


**Abbildung 4.2:** In der Abbildung ist das Grundkonzept der Weißlichtinterferometrie zu sehen. Das Funktionsprinzip erinnert an ein Michelson-Interferometer. Hauptbestandteile sind eine Weißlichtquelle, ein halbtransparenter Spiegel und eine Kamera. Wird der Abstand zwischen Probe und Objektiv richtig gewählt, kommt es zu Interferenzmustern. Durch ein Abtastern der Oberfläche kann die dreidimensionale Topologie dieser erfasst werden.

notwendig, um der sehr geringen Kohärenzlänge von Weißlicht zu entsprechen. Durch das Verfahren des Objektivs in z-Richtung kann der Abstand zur Probe variiert werden. Folglich variiert auch das Verhältnis der beiden Pfadlängen  $d_1$  zu  $d_2$ . Durch Beobachtung der Interferenz mit einer Kamera kann schließlich der Verfahrensweg des Objektivs mit der Topologie der Probe korreliert werden [114]. Jedem lateral angeordnetem Sensorpixel der Kamera ist eine laterale Position auf der Probe zugeordnet. Somit wird beim Verfahren des Objektivs in z-Richtung nicht nur eine Höhe an einer Position bestimmt, sondern gleichzeitig die Topologie einer ganzen Fläche auf der Probe analysiert. Sollen noch größere Flächen vermessen werden, wird die Probe in Segmente unterteilt. Die Segmente werden im Anschluss in mehreren Einzelschritten vollautomatisch abgetastet und die ermittelten Höhenprofile schließlich zu einer großen Topologiekarte zusammengefügt (*Stiching*). Mit dieser Messmethode kann eine vertikale Auflösung von etwa 1 nm erzielt werden [113]. Zur Untersuchung der hergestellten Temperatursensor-Arrays wird ein Weißlichtinterferometer der Firma Bruker vom Typ Contour GT-X verwendet.

### 4.1.3 Rasterelektronenmikroskop und Ionenfeinstrahlanlage

Beim Rasterelektronenmikroskop (REM) handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren von Oberfläche, wobei prinzipiell neben der Topologie auch Materialeigenschaften erfasst werden können. Für die Bildgebung der Oberfläche wird ein hochenergetischer Elektronenstrahl auf die Probe gelenkt. Dabei wechselwirkt der Elektronenstrahl mit dem Probenmaterial, wodurch dieses wiederum Elektronen und Röntgenstrahlung emittiert [115]. Durch die Detektion der Emission kann auf die Eigenschaften der Probe zurückgeschlossen werden. Zur Charakterisierung und Analyse der aufgetragenen Schichten wird mithilfe von Rasterelektronenmikroskopie eine Aufnahme des Querschnitts gemacht. Dazu wurde ein REM vom Typ SUPRA 55 der Marke Carl Zeiss verwendet.



**Abbildung 4.3:** Im Bild ist der schematische Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops zu sehen. Die Hauptbestandteile sind eine Elektronenquelle, verschiedene Komponenten zur Fokussierung und Ablenkung, sowie Detektoren zur Analyse und Messung der emittierten Elektronen und Strahlung. Diese entstehen durch die Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit dem Probenmaterial.

Zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips eines Rasterelektronenmikroskops sind die wichtigsten Komponenten in Abbildung 4.3 dargestellt. Ausgehend von einer Elektronenquelle, meist auf Basis einer Feldemissionskathode, werden mithilfe einer Beschleunigungsspannung hochenergetische Elektronen erzeugt. Zur Fokussierung durchläuft der Strahl im Anschluss mehrere Komponenten, sodass ein monochromatischer Elektronenstrahl entsteht. Durch nachgeschaltete Spulen kann der Strahl außerdem abgelenkt und damit die Probe vom Strahl abgerastert werden. Sobald der Strahl auf die Probe auftritt, kommt es zu einer Wechselwirkung mit dem Probenmaterial. Je nach Energie und Eindringtiefe kommen unterschiedliche Wechselwirkungsprozesse zum Tragen, die sich in der Art und Emission von Elektronen oder elektromagnetischer Strahlung äußern. Dieser Zusammenhang ist in der Vergrößerung in Bild 4.3 dargestellt. Durch die Detektion der Emission lässt sich nicht nur die Oberfläche auflösen, sondern sogar materialspezifische Eigenschaften bestimmen und abbilden. Die emittierten Elektronen unterscheiden sich in der Energie, wodurch sich diese dem zugrundeliegenden Entstehungsprozess zuordnen lassen und so zusätzliche Informationen zur Probe bereitstellen. Um die Probenoberfläche aufzulösen, werden maßgeblich die Sekundärelektronen (SE) und Rückstreuelektronen (BSE) betrachtet. Wobei jede Art spezielle Vorteile bei der Auflösung besitzt [115]. Die SE werden nur nahe der Oberfläche erzeugt und bilden deshalb gut die Topologie ab. Dabei handelt es sich um Elektronen, die bei einer Kollision mit den hochenergetischen Primärelektronen herausgeschlagen werden. Bei BSE handelt es sich um Primärelektronen die mit den Atomkernen kollidieren und zurückgeworfen werden. Da die Wahrscheinlichkeit von der Atomkerndichte abhängt, lässt sich damit eine Aussage über die Materialzusammensetzung treffen. Durch eine Anregung der Atome, kann es außerdem zur Aussendung von Auger-Elektronen kommen. Die Energie des emittierten Elektrons ist dabei Materialspezifisch und kann ebenfalls zur chemischen Materialanalyse genutzt werden [116]. Zur Detektion der unterschiedlichen Elektronentypen werden in der Regel separate Detektoren verbaut. Neben den emittierten

Elektronen kann es auch zur Emission von Röntgenstrahlung aufgrund von elastischer Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl kommen. Diese kann zur Identifizierung und Analyse der enthaltenen Elemente und deren Konzentrationen genutzt werden [116].

Die gesamte Messung erfolgt unter Vakuum, um eine Wechselwirkung der emittierten Teilchen und Strahlung mit der Atmosphäre zu verhindern. Entsprechend muss die Probe solchen Bedingungen standhalten können. Außerdem sollte zumindest die Probeoberfläche leitfähig sein und entsprechend geerdet werden, damit Aufladungseffekte während der Messung verhindert werden. Um eine solche Aufladung bei nicht-leitfähigen Proben zu verhindern, wird in der Regel eine sehr dünne Metallschicht aufgedampft. Mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie lassen sich sowohl kontrastreiche Aufnahmen der Topologie mit einer Auflösung von 1 nm [116] erzielen, aber auch Einblicke in die Zusammensetzung des untersuchten Probenmaterials erlangen.

Soll der Aufbau eines Schichtsystems betrachtet werden, wie dies beispielsweise bei dem gedruckten Temperatursensor der Fall ist, muss die Probe zunächst präpariert und der Querschnitt offengelegt werden. Der Schnitt durch das Material sollte möglichst schonungsvoll erfolgen, um den Zustand der Probe zu erhalten. Daher sollte mechanischer und thermischer Stress auf die Probe möglichst vermieden werden. Dies kann durch eine Ionenfeinstrahlanlage (*Focused Ion Beam*) erreicht werden, wobei das Arbeitsprinzip zur Rasterkraftmikroskopie sehr ähnlich ist [117, 118]. Der Unterschied liegt in der Verwendung von Gallium- oder Helium-Ionen anstelle von Elektronen. Durch die Ionen kommt es zu einer starken Wechselwirkung mit dem Probenmaterial, sodass bei ausreichend hohen Beschleunigungsspannungen zu einem Abtrag des Materials kommt. Dabei schlagen die hochenergetischen Ionen Atome und Teilchen aus der Materialschicht heraus. Heutige Anlagen erlauben so einen Materialabtrag mit einer Präzision im Nanometerbereich [119]. Grundsätzlich bietet dieses Verfahren auch Möglichkeiten zur Bildgebung oder Materialdeposition, was allerdings über den Rahmen dieser Arbeit hinaus geht.

## 4.2 Verwendete Substrate und Materialien

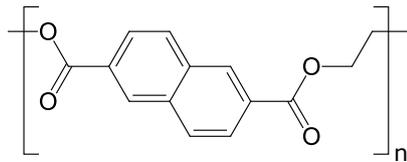
Das gedruckte Temperatursensor-Array besteht aus einer Kombination von verschiedenen Materialien. Als Basis zur Herstellung der Sensoren dient das Substrat. Im Fall des vorgestellten Temperatursensors wird auf das Substrat mehrere Lagen aus einem leitfähigem und dielektrischem Material gedruckt. Die Wahl und Zusammensetzung aus Substrat und Material entscheidet maßgeblich über die Funktion und das Anwendungsgebiet für die Sensoren. Beides wird im Folgenden ausführlich vorgestellt.

### 4.2.1 Substrate

Das Substrat dient als Trägermaterial für das später aufgebrachte Material. Durch die Materialeigenschaften des Substrats werden auch einige Eigenschaften des Sensors mitbestimmt, wie beispielsweise die Flexibilität, Temperatur- und Einsatzbereich. Da das Substrat im direkten Kontakt mit den aufgedruckten Materialien steht, müssen die Materialien zueinander kompatibel sein. Dies betrifft vor allem die Haftung aber auch Benetzungseigenschaften der Tinte. Für die Temperatursensoren sollte auf eine gute elektrische Isolierung der Substrate geachtet werden, um einen Kurzschluss zwischen den Elektroden zu verhindern. Gleichzeitig sollte sich das Substrat möglichst wenig auf die Temperaturmessung auswirken, weshalb eine geringe Wärmekapazität aber hohe Wärmeleitfähigkeit von Vorteil sind. Daher wurde eine möglichst dünne Folie verwendet. Allerdings sollten 25  $\mu\text{m}$  nicht unterschritten werden, da diese während der Herstellung andernfalls schwer zu handhaben ist.

#### 4.2.1.1 Polyethylenphthalat

Bei Polyethylenphthalat (PEN) handelt es sich um einen thermoplastischen Kunststoff, der in dieser Arbeit in Form einer transparenten Folie als Substrat eingesetzt wurde. PEN ist eine Weiterentwicklung des vielseitig eingesetzten Polyethylenterephthalat (PET) und gehört zur Gruppe der Polyester. Im direkten Bereich weist PEN in den meisten Belangen bessere Eigenschaften auf. Außerdem sind viele Tinten und Pasten, die im Bereich der gedruckten Elektronik eingesetzt werden, für die Verwendung mit PEN optimiert. In dieser Arbeit wurde PEN vom Typ Teonex Q51 der Marke DuPont eingesetzt [120].

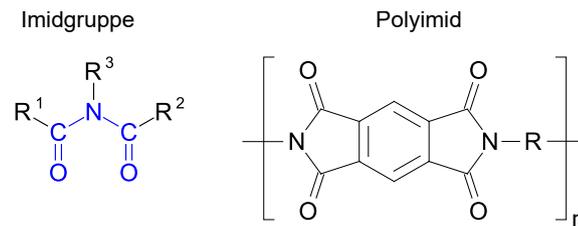


**Abbildung 4.4:** In der Abbildung ist die Strukturformel von Polyethylenphthalat (PEN) dargestellt. Dabei handelt es sich um eine transparente Kunststofffolie, die als Substrat für den Temperatursensor verwendet wurde.

Abbildung 4.4 zeigt die Grundstruktur von PEN, die in der Folie als vernetzte Struktur vorliegt. Die Folie ist biegsam, auch wenn diese Eigenschaft bei den später gezeigten Anwendungen nicht relevant ist. Eine gute Temperaturstabilität war entscheidend bei der Wahl dieses Materials. Bis etwa 150 °C weist PEN mit 0,4 % nahezu keinen Schrumpf auf, darüber hinaus kann Wellenbildung und Abplatzen der aufgedruckten Schichten beobachtet werden. Eine hohe Temperaturstabilität ist vor allem für die Nachbearbeitungsschritte nach dem Druck nötig, wie beispielsweise dem photonischen Sintern. Die verwendete Folie weist eine Dicke von 100 µm auf und besitzt eine Oberflächenrauigkeit von > 10 nm. Grundsätzlich zeichnete sich das Substrate bei der Verwendung durch eine sehr gute mechanische Stabilität aus. Das erleichterte die Handhabung während der Herstellung, verhinderte Kratzer in der Folie und vermied ungewollte Knicke. Gleichzeitig ist PEN robust gegenüber vielen Chemikalien, was die Tintenauswahl vereinfacht und bei der Anwendung von Vorteil ist. Die Wasseraufnahme und Permeabilität des Materials ist sehr gering, sodass prinzipiell auch feuchtigkeitsempfindliche Tinten mit einer Verkapselung auf PEN genutzt werden können. Verglichen mit der Verwendung von Silizium, Glas, Keramik oder Glasfasergeweben als Substrat, bietet der Einsatz von PEN oder allgemein Kunststofffolien ein enormes Kosteneinsparpotential.

#### 4.2.1.2 Polyimide

Polyimide sind bekannt als Hochleistungskunststoffe mit sehr hoher Temperaturfestigkeit und Robustheit. Das Material wird sowohl als Folie und in Form eines Präkursors verwendet. Obwohl PEN bereits eine hohe Temperaturstabilität aufweist, konnte es bei der Herstellung mit diesem Material trotzdem Verzug und Schrumpf bei der Folie beobachtet werden. Insbesondere bei sehr dünnen Folien fällt der Substratverzug noch stärker ins Gewicht. Aus diesem Grund wird im späteren Verlauf der Arbeit auf Polyimidfolie gewechselt, welche selbst Dauertemperaturen von > 230 °C toleriert. In der Arbeit wird Kapton® der Marke DuPont in der Stärke 25 µm und 76 µm verwendet. Für die Messung der Temperaturverteilung einer CPU, wird ein Polyimid-Präkursor vom Typ PI2611 der Marke HD MicroSystems GmbH auf einen Aluminium-Kühlkörper mittels Rotationsbeschichtung aufgebracht. Damit können gleichzeitig drei Probleme gelöst werden: 1) Da der Kühlkörper aus Aluminium gefertigt ist, wird eine elektrische Isolationsschicht benötigt. 2) Die Schicht kann sehr dünn hergestellt werden (5 µm) und die dadurch eingebrachte thermische Isolierung gering gehalten werden. 3) Es kann unmittelbar auf die Polyimidschicht gedruckt werden, sodass keine Tintenoptimierung oder -anpassung notwendig ist.



**Abbildung 4.5:** Das Ausgangsmaterial von Polyimiden bildet die Imidgruppe, welche in blau dargestellt ist. Zusätzlich ist ein vollständig vernetztes Polyimid abgebildet, wie es auch im Endprodukt vorliegt. Außerdem existieren mittlerweile eine Vielzahl an Derivaten mit unterschiedlichen Vorzügen und Eigenschaften.

Polyimidfolie hat meist ein bräunliches, transparentes Erscheinungsbild. In Abbildung 4.5 ist die chemische Struktur von Polyimid dargestellt. Polyimide bestehen aus einer Imidgruppe, die im Bild als blaue Struktur hervorgehoben ist. Auf Grundlage der Imidgruppen sind unterschiedlichste Polyimidvarianten herstellbar. Der Hauptvorteil, wie bereits Eingehens erwähnt wurde, liegt in der erheblich höheren Temperaturfestigkeit von weit über 200 °C. Dabei weist die Folie lediglich einen Schrumpfung von 0,1 % auf [121]. Einige Polyimidvarianten zersetzen sich sogar erst bei Temperaturen ab 450 °C. Das Material weist eine Widerstandsfähigkeit gegen nahezu alle Chemikalien auf und ist gleichzeitig bioinert [122]. Für die Anwendung als Isolator- und Trägerschicht auf dem Kühlkörper einer CPU muss außerdem die mechanische Stabilität gegen Verkratzen gewahrt sein. Selbst als sehr dünne Folie mit nur wenigen Mikrometern Dicke erweist sich die Folie als äußerst robust.

Für die Beschichtung des Kühlkörpers wird das Polyimid als Präkursor erworben. Die Polymerisation des Präkursors zu Polyimid findet anschließend in einem Ofen bei 300 °C statt und weist danach die typischen Eigenschaften einer Polyimidfolie auf [123].

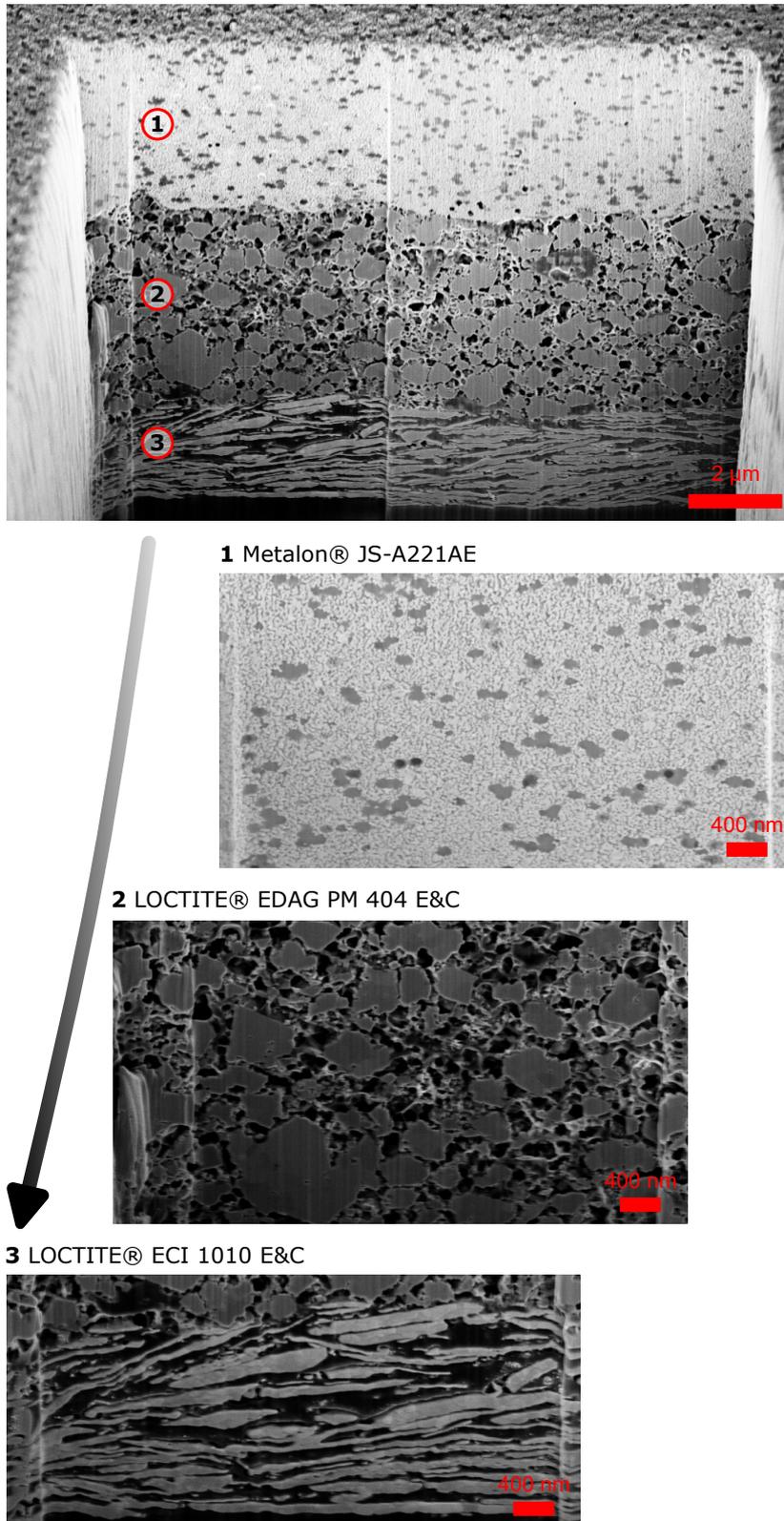
## 4.2.2 Materialien

Für die Herstellung der gedruckten Temperatursensoren wurden mehrere Tinten benötigt. Diese lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: 1) Leitfähige Tinten für Leiterbahnen und Elektroden 2) Das Thermistormaterial bzw. Dielektrikum als Sensormaterial.

In Abbildung 4.6 ist ein Querschnitt durch die Schichten des fertigen Temperatursensors dargestellt. Mithilfe einer Ionenfeinstrahlanlage (siehe Kapitel 4.1.3) wurde ein Schnitt durch alle Materialschichten der Probe durchgeführt. Im Anschluss wurde die Querschnittsoberfläche unter einem REM betrachtet. Im Bild heben sich die Schichten in Form, Farbe und Struktur klar von einander ab. Zusätzlich zu der Übersicht des Gesamtschichtsystems befinden sich noch Nahaufnahmen von jeder Materialschicht. Einige Eigenschaften der Materialien sind in den dazugehörigen Datenblättern angegeben oder lassen sich aus den Bildern ableiten. Die genaue Beschreibung findet sich in den nachfolgenden Unterkapiteln.

### 4.2.2.1 Silbertinten

Für die Herstellung der Temperatursensoren werden jeweils spezielle Silbertinten für den Einsatz im Siebdruck (siehe Kapitel 3.1.1) und Aerosol-Jet (siehe Kapitel 3.1.2) verwendet. Die Tinten sind jeweils auf das Druckverfahren optimiert. Somit müssen diese gleichzeitig sowohl das Anforderungsprofil für den Drucker erfüllen, aber auch die gewünschten funktionellen Eigenschaften für den Einsatz im Sensor aufweisen. Für den Siebdruck wird LOCTITE® ECI 1010 E&C der Marke Henkel AG & Co.KGaA eingesetzt [124]. Beim Aerosol-Jet-Druck sind erheblich kleinere Silberpartikel und eine geringere Viskosität erforderlich. Hier wird die Tinte Metalon® JS-A221AE der Marke Novacentrix benutzt [125]. Auch wenn es sich jeweils um



**Abbildung 4.6:** In der Abbildung ist das Schichtsystem des vollständig gedruckten Temperatursensors dargestellt. Die Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen zeigen alle drei verwendeten Materialien in der getrockneten/gesinterten Form. Jede Schicht ist separat in der Nahaufnahme abgebildet.

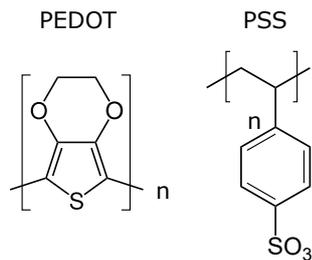
silberbasierte Tinten handelt, variieren die Eigenschaften der vollständig gesinterten Silberschichten etwas. Beide Tinten sind kompatibel mit PEN- oder Polyimidoberflächen, wobei diese aufgrund des Schichtsystems teilweise aufeinander haften mussten. Um als Elektroden fungieren zu können, sollten beide Silbertinten eine möglichst hohe Leitfähigkeit aufweisen, wobei hierbei die Siebdruck-Tinte etwas besser abschneidet. Ähnliches gilt auch für die Haftfestigkeit, wobei laut Datenblatt beide Tinten im Gitterschnittverfahren einen identischen Wert von 5B erzielen. Trotzdem zeigt sich die Siebdruck-Tinte in der Anwendung robuster. Dies ist unter anderem auch der Grund weshalb bei der Sensorentwicklung anfänglich eine Kombination aus Siebdruck und Aerosol-Jet-Druck für die Herstellung verwendet wird. Der Siebdruck ermöglicht eine schnelle Auftragung großflächiger Strukturen mit guter Leitfähigkeit. Da teilweise die Kontaktierung des Sensors mit einem Stecker direkt über die gedruckte Struktur erfolgt, muss das Material an der Kontaktstelle möglichst robust und kratzfest sein. Im Gegenzug wird die Sensorstruktur mithilfe des Aerosol-Jets in einer hohen Auflösung hergestellt, die mit Siebdruck nicht realisierbar ist.

Bei der Siebdruck-Tinte erkennt man in der Aufnahme, kleine Silberplättchen in der Größe einiger Mikrometer. Die Tinte weist dabei einen Feststoffanteil von 62 % auf. Im Gegenzug besteht die Aerosol-Jet-Tinte aus Silberpartikeln mit einer Größe von durchschnittlich 35 nm und einem Feststoffanteil von 50 %. Neben der Partikelgröße spielt für das jeweilige Druckverfahren vor allem die Viskosität eine wichtige Rolle. Für Siebdruck wird eine pastenartige Konsistenz benötigt, weshalb die Siebdruck-Tinte eine honigartige Viskosität von 9000 cP ausweist. Beim Aerosol-Jet sind zwei Vernebelungsverfahren möglich, wobei die Tinte speziell für die Ultraschallkartusche ausgelegt wurde. Um mit dieser kompatibel zu sein, beträgt die Viskosität der Aerosol-Jet-Tinte lediglich 10 – 20 cP.

Die Silbertinten benötigen nach der Deposition noch eine Nachbehandlung in Form eines Sintervorgangs. Dazu muss die gedruckte Schicht einer erhöhten Temperatur von  $> 120\text{ °C}$  ausgesetzt werden. Erst mit dem Sintervorgang bekommt die Schicht ihre Leitfähigkeit. Durch Erhöhen der Temperatur und/oder Sinterdauer konnte die Leitfähigkeit des Materials bis zu einem gewissen Grad weiter gesteigert werden. Wie in der Abbildung 4.6 zu erkennen ist, „backen“ die einzelnen Silberpartikel zusammen, wobei vereinzelt Hohlstellen verbleiben. Entsprechend liegt die maximal erzielbare Leitfähigkeit bei 15 – 20 % im besten Fall verglichen mit Silber als Vollmaterial. Dabei muss beachtet werden, dass das verwendete Substrat mit der notwendigen Sintertemperatur kompatibel sein muss. Hier spielt das in Kapitel 3.3.1 vorgestellte photonische Sintern eine wichtige Rolle. Damit lässt sich gezielt eine Temperatur von mehreren  $100\text{ °C}$  in der gedruckten Schicht für wenige Mikrosekunden erzeugen, ohne dabei das Substrat zu schädigen. Genau dieses Verfahren wird zum Sintern der Aerosol-Jet-Strukturen eingesetzt. Im Vergleich zum Ausheizen auf einer Heizplatte, wird nicht nur eine höhere Leitfähigkeit erreicht, sondern es kann Rissbildung oder Abplatzen der Strukturen vermieden werden. Im Gegenzug funktioniert das Sintern der Siebdruck-Silbertinte auch auf einer Heizplatte mit einer Temperatur von mindestens  $120\text{ °C}$  sehr gut. Aufgrund der Gegebenheiten beim Siebdruckvorgang ist das Ausheizen per Heizplatte die bessere Option. Ausgehend von der Druckreihenfolge werden die Aerosol-Jet-Schichten nach und somit auf den Siebdruckschichten aufgebracht, weshalb diese zusätzlich noch dem photonischen Sinterprozess ausgesetzt sind. Mehrfache Sintervorgänge wirken sich nicht weiter negativ auf das Material aus, sondern erhöhen höchstens noch weiter die Leitfähigkeit. Weitere Details zur Herstellung der Sensoren finden sich in den jeweiligen Ergebniskapiteln 6.1.2 und 7.3 zu den Sensoren.

#### 4.2.2.2 PEDOT:PSS

Poly(3,4-ethyldioxythiophen)polystyrolsulfonat (PEDOT:PSS) ist wohl eins der bekanntesten leitfähigen, organischen Polymere, das in den unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz kommt. Ein großer Vorteil des Materials ist die sehr gute Leitfähigkeit, die Transparenz, eine gute Druckbarkeit und die Möglichkeit die Leitfähigkeit gezielt einzustellen. Im wissenschaftlichen Umfeld hat das Material zuletzt viel Aufmerksamkeit im Bereich der gedruckten Elektronik, Solarzellenforschung oder Thermoelektrik erhalten.

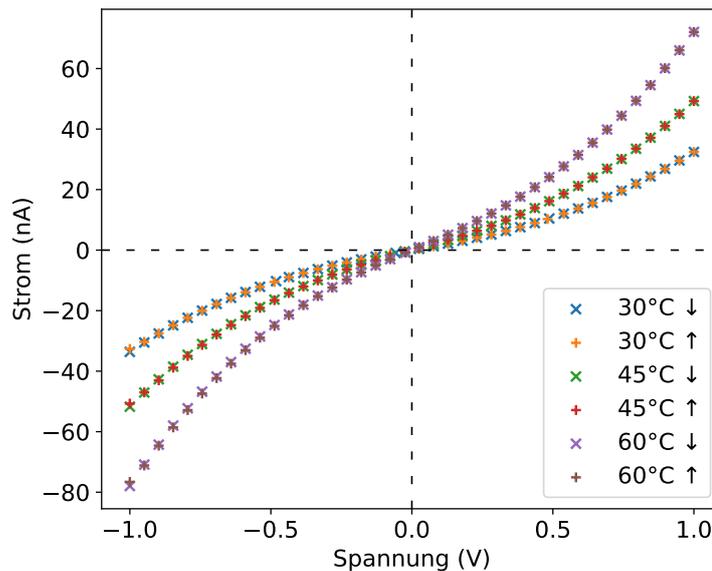


**Abbildung 4.7:** Dargestellt sind die zwei Hauptkomponenten des Polymerelektrolyts PEDOT:PSS. PEDOT ist ein hochleitfähiges, konjugiertes Polymer. PSS wird als Tensid zugesetzt, um das Material wasserlöslich zu machen und zu stabilisieren.

In Abbildung 4.7 sind die zwei Hauptkomponenten dargestellt, die für die Synthese von PEDOT:PSS verwendet werden. Dabei handelt es sich um ein Polymerelektrolyt, bestehend aus dem leitfähigem, konjugiertem Polymer PEDOT und einem Isolator PSS. Letzteres wirkt als Tensid und ermöglicht die Wasserlöslichkeit des Materials und stabilisiert dieses [126, 127]. Zu Beginn der Arbeit werden einige Versuche mit PEDOT:PSS als Thermistormaterial durchgeführt, wobei vom Hersteller Heraeus Epurio GmbH verschiedene Produkte untersucht werden: Clevios™ S V4, Clevios™ P VP Al 4083 und Clevios™ HTL Solar. Die PEDOT:PSS-Varianten unterscheiden sich in der Leitfähigkeit und in der Art der Auftragung. Clevios™ S V4 wurde im Siebdruckverfahren aufgetragen, während die beiden anderen auf dem Aerosol-Jet verdruckt werden, da diese sehr flüssig sind. Allerdings zeigt sich in den Versuchen, dass der erzielte Widerstand der PEDOT:PSS-Schichten zu gering ausfällt. Dadurch kommt es zu einer gegensätzlichen Überlagerung der Widerstandsänderung der Silberleiterbahnen und dem Thermistormaterial unter Temperatureinfluss. Gleichzeitig reagierte PEDOT:PSS stark auf eine Änderung der Luftfeuchtigkeit, weshalb die Messungen starken Störungen ausgesetzt sind und eine aufwändige Verkapselung erforderlich wäre. Aus diesem Grund erweist sich die Verwendung von PEDOT:PSS als ungeeignet, weshalb stattdessen das im nachfolgenden Abschnitt vorgestellte LOCTITE® EDAG PM 404 E&C eingesetzt wird.

#### 4.2.2.3 LOCTITE® EDAG PM 404 E&C

Die Thermistorschicht der hergestellten Temperatursensoren basieren alle auf LOCTITE® EDAG PM 404 E&C [128] der Marke Henkel AG & Co.KGaA. Die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit dieses Materials geben dem Temperatursensor seine Funktion. Offiziell wird LOCTITE® EDAG PM 404 E&C als hochresistive Siebdrucktinte vermarktet. Gemäß den Angaben des Herstellers kann der Widerstand des Materials durch das prozentuale Vermischen mit einer Schwestertinte (LOCTITE® EDAG 6017SS E&C) eingestellt werden. Auf diese Möglichkeit wurde in dieser Arbeit allerdings verzichtet und stattdessen der Widerstand über die Anzahl an Lagen und somit die Schichtdicke erzielt. Laut Datenblatt basiert LOCTITE® EDAG PM 404 E&C [128] auf einem Thermoplast ohne bzw. mit sehr geringem Anteil an Carbon Black als Füller. Je höher der Anteil des Füllers ist, desto besser ist die Leitfähigkeit des Materials. Entsprechend der Anforderungen, haftet das Thermistormaterial gut auf PEN-/Polyimidoberflächen und erreicht vergleichbare Haftwerte wie die verwendeten Silbertinten. Obwohl die Tinte für den Siebdruck entwickelt wurde, wird diese auf dem Aerosol-Jet verwendet, um mehr Kontrolle über die Schichtparameter zu erhalten. Die Tinte weist eine hohe Viskosität von 10000 – 20000 cP in der Ursprungsform auf. Da die Schicht jedoch auf dem Aerosol-Jet verdruckt werden sollte, muss die Viskosität auf ein akzeptables Maß gesenkt werden. Dazu werden 2 g der Thermistorpaste mit 1 ml Triethylenglykolmonomethylether (TGME) verdünnt und so die Viskosität auf etwa 2100 cP gesenkt. Damit wird die Tinte mit der pneumatischen Druckkartusche des Aerosol-Jet-Druckers kompatibel. Nach dem Druck der Schicht wird die Probe in einen Ofen bei 120 °C für 6 h zum Trocknen gelagert. Dadurch wird das enthaltene Lösungsmittel aus der Schicht ausgedampft. In Abbildung 4.6 zeigt sich, dass die getrocknete Thermistorschicht eine poröse, vernetzte Struktur mit



**Abbildung 4.8:** Dargestellt ist die Strom-Spannungs-Kennlinie des Thermistormaterials bei unterschiedlichen Temperaturen. Der Verlauf ist nichtlinear, aber symmetrisch und erinnert an das Verhalten eines Varistors. Die Abbildung wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

größeren Agglomeraten bildet. Im Fall eines Sensorpixels ist das Thermistormaterial zwischen zwei Lagen aus Aerosol-Jet-Silber eingebettet, anders als im dargestellten Ausschnitt des Randbereiches des Sensors.

Das Thermistormaterial wird im Sensorsystem einer grundlegenden elektrischen Messung unterzogen, indem die Strom-Spannungs-Kennlinie bestimmt wird. Dazu wird eine Spannung zwischen  $-1\text{ V}$  und  $+1\text{ V}$  abgefahren und währenddessen der Strom gemessen. Die Messung wird bei verschiedenen Temperaturen wiederholt. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Dabei zeigt sich ein um  $0\text{ V}$  punktsymmetrisches, nichtlineares Verhalten, wobei der Strom mit steigender Temperatur zunimmt. In diesem Zusammenhang werden solche Materialien als Heißeleiter oder NTC-Thermistor bezeichnet. Auf der hier dargestellten Abhängigkeit der Leitfähigkeit beruht das Messprinzip des entwickelten Sensors. Da die Messwerte für beide Spannungs-Messrichtungen exakt aufeinanderliegen, konnten weder ein Ladungseffekte noch eine Hysterese beobachtet werden. Der Verlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie ähnelt stark dem Verhalten eines Varistors, was sich auch im symmetrischen Aufbau des Sensors widerspiegelt. Standardvaristoren bestehen aus einer Keramikschiicht (meist  $\text{ZnO}$ ), welche zwischen zwei Metallelektroden angeordnet ist. Um das Verhalten zu erklären wird in diesem Zusammenhang vermutet, dass es aufgrund der Bildung von doppelten Schottky Barrieren (*Double-Schottky-Barrier (DSB)*) zwischen den einzelnen Korngrenzen im Keramikpulver zu einer Ausbildung eines Diodenübergangs kommt [129, 130, 131]. Damit liegt die Ähnlichkeit der gedruckten Temperatursensorstruktur auf der Hand und legt nahe, dass ähnliche Prozesse für das beobachtete nichtlinear, symmetrische Verhalten verantwortlich sind.

Für das NTC-Verhalten, beziehungsweise die gemessene Temperaturabhängigkeit des Widerstands, sind zwei verschiedene Erklärungsansätze denkbar. Einerseits können physikalische Prozesse dafür sorgen, dass mit einer Zunahme der Temperatur mehr freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Wird das Thermistormaterial als Halbleiter betrachtet, entspricht die Zunahme der Leitfähigkeit exakt diesem Verhalten. Der Aufbau des Sensorarrays weist eine hohe Ähnlichkeit zu einer Schottky-Diode auf. Auch diese zeigt eine vergleichbare Temperaturabhängigkeit, die im Zusammenhang mit der thermischen Emission von Ladungsträgern steht und Ursache für das beobachtete Temperaturverhalten ist [132]. Auf der anderen Seite, können

die Polymereigenschaften der Tinte selbst für das Verhalten verantwortlich sein. Die Untersuchung von Polymerkompositen in Verbindung mit verschiedenen Füllern ist bereits seit Jahren Gegenstand der Forschung [133, 134, 135, 136, 137]. Die Vorgänge sind allerdings nicht vollständig verstanden. Im Zusammenhang mit dem beobachteten NTC-Verhalten wird vermutet, dass es mit steigender Temperatur zu einer Relaxation/Erweichen der Polymermatrix kommt, wodurch es zu einer Verschiebung der leitfähigen Füllerteilchen kommt. Dadurch können sich leitfähige Ketten im Thermistormaterial ausbilden, die wiederum zur Erhöhung der Leitfähigkeit führen [138, 139, 140]. Eine tiefgreifende Analyse des kommerziellen Materials wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt.

Die Entscheidung dieses Thermistormaterial zu verwenden, ist auf die starke Temperaturabhängigkeit des Materials, die Robustheit gegenüber äußeren Einflüssen, sowie der Kompatibilität zu den verwendeten Materialien und dem Drucker zurückzuführen.

### 4.3 Beispiele zur Optimierung des Silberliniendrucks

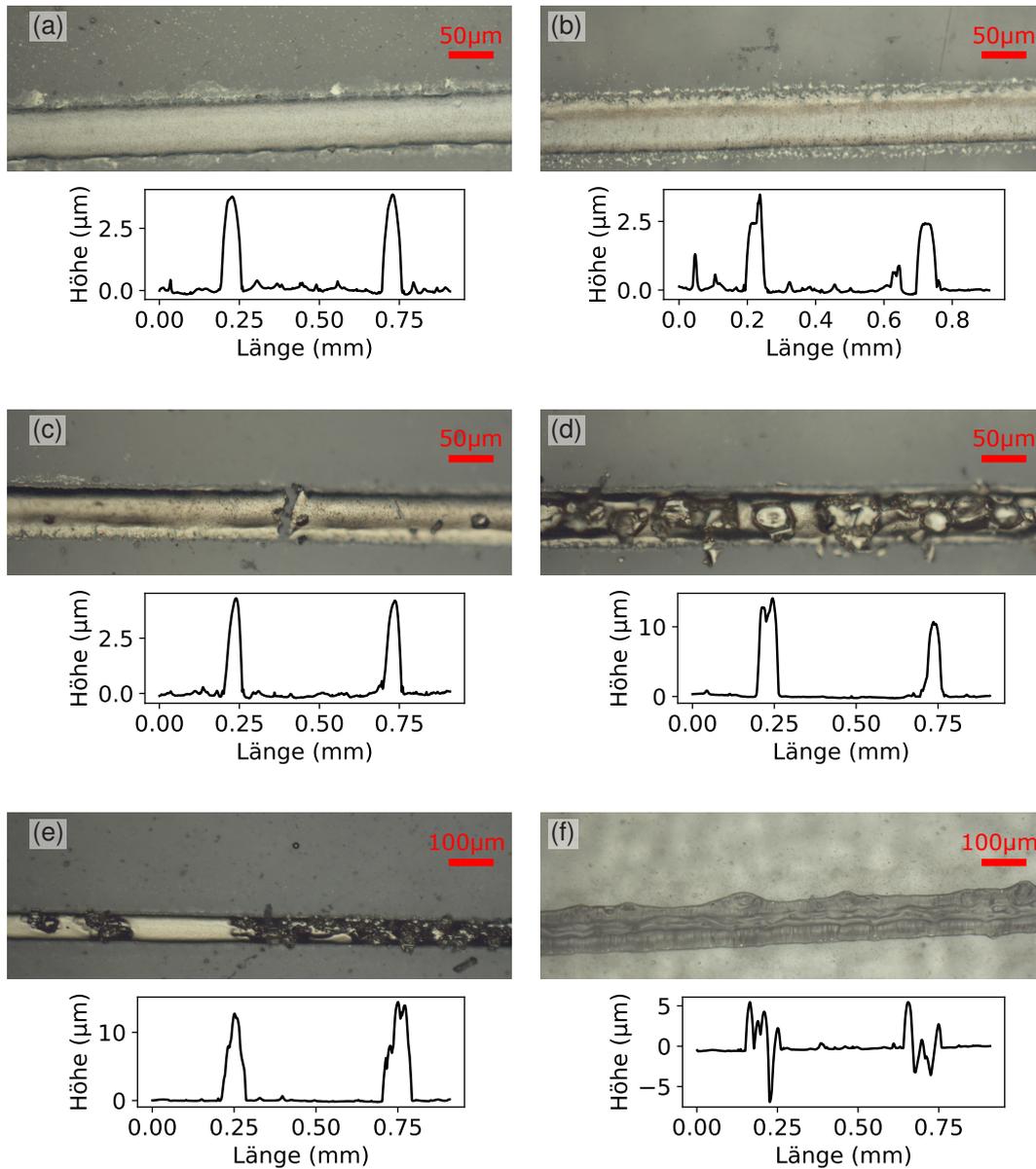
Ein Hauptbestandteil der Entwicklungsarbeit für die Temperatursensorarrays ist die Optimierung des Aerosol-Jet-Drucks und die anschließende Nachbehandlung mithilfe von photonischem Sintern. Zur Herstellung kleiner Elektrodenstrukturen wird eine nanopartikuläre Silbertinte (Metalon® JS-A221AE, Novacentrix) verwendet. Um eine hohe Druckqualität zu erzielen, genügt es nicht einen Teil der Herstellung zu optimieren, sondern die einzelnen Herstellungsschritte, insbesondere Druck und Nachbehandlung, müssen gemeinsam optimiert werden. Veränderungen am Druckbild haben automatisch immer eine Auswirkung auf den Sinterprozess, während umgekehrt teilweise der Druckprozess angepasst werden muss, um das Sintern zu ermöglichen. Während der Herstellung ist ein wichtiger Teil der Arbeit die regelmäßige Qualitätskontrolle der gedruckten Strukturen, was insbesondere zu Beginn des Druckens wichtig ist. In der Regel genügt eine optische Prüfung mit dem Mikroskop und gegebenenfalls eine Schichtdickenanalyse. In Abbildung 4.9 sind Aufnahmen von gedruckten und anschließend gesinterten Silberlinien gezeigt. Anhand des Aussehens in Kombination mit den ermittelten Schichtdicken lassen sich die meisten Probleme identifizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen. Dieser Abschnitt beruht maßgeblich auf den gesammelten Erfahrungen während der Arbeit. Die Probleme und auch die Gegenmaßnahmen sind sehr individuell und erfordern eine Anpassung für jede Kombination aus Tinte, Substrat und Maschine. Auch Variationen in der Luftfeuchtigkeit oder Verschmutzung führen zu einem tagesindividuellem Verhalten.

Nicht immer lassen sich alle Anforderungen an das Druckergebnis, also hier die Silberline, erfüllen. Teilweise steht eine Optimierung einer Eigenschaft einer anderen entgegen, weshalb häufig ein Kompromiss bei der Herstellung eingegangen werden muss. Beispielsweise sollten die Elektroden einen möglichst hohen Leitfähigkeit aufweisen. Dies kann erreicht werden, indem eine größere Linienbreite, eine höhere Schichtdicke oder eine höhere Temperatur beim Sinterprozess gewählt wird. Die Linienbreite ist meist durch das Drucklayout oder die Herstellungsmethode vorgegeben und kann daher nicht beliebig vergrößert werden. Folglich verbleiben nur Freiheitsgrade bei der Schichtdicke und beim Sinterprozess, um die Leitfähigkeit zu optimieren.

Die Abbildungen 4.9 verdeutlichen einige Probleme bei der Herstellung von Silberelektroden auf Kunststoffolie. Zunächst ist in (a) das Erscheinungsbild einer gut leitfähigen und intakten Silberlinie zu sehen. Die Linie ist sauber und gleichmäßig ausgeprägt mit einer Linienbreite von knapp 60  $\mu\text{m}$ . Der Rand verläuft in einer Linie und die Silberoberfläche ist geschlossen. Die Linienhöhe beträgt etwa 4  $\mu\text{m}$ . Jenseits der Linien sind Satellitentropfen sichtbar, deren Menge ist jedoch gering und beeinträchtigt die Anwendung nicht weiter. Die Silberlinie ist also ein Beispiel für ein gutes optimiertes Druckresultat. Bild (b) weist einen ausgefranzten Rand auf, während die Linie über den Querschnitt leicht nach unten hin verschoben ist, wodurch in im oberen Teil lediglich eine geringe Schichtdicke erzielt wird. Die Linie ist allerdings vollständig

gesintert und leitfähig. Man erkennt in Schichtdickenmessung, dass die Elektrode lediglich  $2,5\ \mu\text{m}$  erreicht. Daher sollte die Schichtdicke erhöht werden, um die Leitfähigkeit und das Schichtgefüge im Schichtstapel zu verbessern. In Bild (c) ist die Funktion der Linie durch einen Riss beeinträchtigt. Dies lässt sich auf Materialstress durch unterschiedliches Ausdehnungsverhalten unter Temperatureinfluss zwischen Substrat und Silberlinie schließen [141, 142]. Dieses Phänomen lässt sich meist durch das Anpassen der Sinterparameter vermeiden. Die Sinterenergie sollte reduziert, indem entweder die Lampenspannung, Pulsdauer oder Pulsformation angepasst wird. Auch ein Substratvorbehandlung, um die Adhäsion des Silbers auf dem Substrat zu verbessern, kann Abhilfe schaffen. Außerdem scheint der Hauptteil der Linie etwas nach oben verschoben zu sein, was eventuell auf eine verschmutzte Druckerdüse hindeutet. Die Silberlinien in (d-e) sind erheblich dicker gedruckt und weisen Schichthöhen von  $10 - 12\ \mu\text{m}$  auf. Die Bilder zeigen eine erhebliche Schädigung der Silberlinienoberfläche. Beim Sintervorgang kommt es zum Abplatzen von Silberpartikeln oder zur Bläschenbildung. Die Leitfähigkeit muss nicht zwangsläufig negativ beeinträchtigt sein. Dieser Effekt kommt dadurch zustande, dass die Silberlinie einerseits dick gedruckt und andererseits die Sinterenergie zu hoch gewählt ist. Durch eine Versinterung der äußersten Schicht, baut sich im Innern durch das freiwerdende Lösungsmittel aus der tieferliegenden Tinte Druck auf, der anschließend lokal herausbricht. Folglich sollte die Schichtdicke reduziert und die Sinterparameter angepasst werden, indem die Sinterenergie verringert und/oder Multipulse verwendet werden. Allerdings besteht hierbei die Gefahr, dass die Linie unvollständig gesintert wird und es zu einem Verschmieren der Struktur kommt. Abbildung (f) zeigt ein Substrat bei dem die Sinterenergie signifikant zu hoch gewählt wurde. Dabei platzt die gesamte Silberstruktur vom Substrat ab. Es verbleibt eine angeschmolzene Substratoberfläche, wie die Höhenprofilmessung offenbart. Hier zeigt sich jedoch der Vorteil von photonischem Sintern. Obwohl die Sinterenergie für die Silberschicht deutlich zu hoch gewählt wurde, bleibt die Schädigung des Substrats nur auf die Kontaktfläche zum Silber beschränkt. Das übrige Substrat ist vollständig intakt.

Wie sich an den gezeigten Bildern offenbart, kommt es beim Optimieren der Druckergebnisse zum Wechselspiel zwischen Druck und Nachbehandlung. Dies ist besonders herausfordernd, wenn die Elektrode nicht nur auf die glatte und homogene Substratoberfläche gedruckt wird, sondern auch direkt auf das zuvor aufgebraute Thermistormaterial. Hierbei ist nicht nur die Oberfläche uneben, sondern auch die Oberflächenhaftung variiert. Der Parameterraum, der zu einem guten und funktionalen Ergebnis führt, ist nur sehr klein. Das bedeutet, dass bereits kleine Schwankungen beim Druck oder photonischen Sintern zu einem fehlerhaften Resultat führen. Besonders wenn dabei mehrere Herstellungsschritte vorausgehen, lohnt es sich die Schichtherstellung gegebenenfalls zunächst auf einer vereinfachten, aber realitätsnahen Probe zu optimieren.



**Abbildung 4.9:** Mikroskopaufnahmen verschiedener Silberlinien nach dem photonischen Sintern. Darunter findet sich das gemessene Höhenprofil der Linien/Elektroden. (a) Erscheinungsbild einer guten Silberlinie (b-f) Die Silberlinien weisen verschiedene Defekte auf, weshalb der Aerosol-Jet-Druck und das photonische Sintern optimiert werden müssen.

## 5 Ausleseelektroniken und Kalibrierverfahren

*Bei der hier gezeigten Temperaturmessung handelt es um eine digitale und indirekte Messmethode. Für die Funktion des Temperatursensor-Arrays ist es daher unerlässlich auch eine geeignete Ausleseelektronik zu verwenden, die eine entsprechende Auswertung der Messergebnisse nach sich zieht. Folglich ist dieses Kapitel der Ausleseelektronik und den Kalibrierverfahren gewidmet. Grundsätzlich muss bei der Entwicklung der Ausleseelektronik die Kompatibilität mit dem Sensor sichergestellt werden. Dies bedarf der Implementierung einer passenden Kontaktierung, Anpassung der Layouts an die Gegebenheiten und die Abstimmung auf die elektronischen Eigenschaften des Sensors. Nicht zuletzt soll die Messung möglichst präzise und schnell erfolgen. Die Anforderungen und Entwicklung der Ausleseelektronik wird in Kapitel 5.1 ausführlich behandelt.*

*Bei der Temperaturmessung handelt es um eine indirekte Messmethode. Dabei gibt die mit dem Temperatursensor verbundene Ausleseelektronik einen Messwert aus, der zwar mit der Temperatur korreliert ist, aber dieser nicht entspricht. Deshalb muss dieser Messwert anschließend in einen Temperaturwerte „übersetzt“ werden. Eine Voraussetzung ist, dass der Zusammenhang zwischen Messwert und Temperatur bekannt ist. Dazu wird der Sensor vor seinem eigentlich Einsatzzweck kalibriert. Die verwendeten Kalibrierverfahren werden in Kapitel 5.2 erläutert und miteinander verglichen.*

### 5.1 Entwicklung von passenden Ausleseelektroniken

Erst mit einer geeigneten Ausleseelektronik kann das entwickelte Temperatursensor-Array verwendet werden. Dazu werden zunächst die Anforderungen an die Ausleseelektronik anhand der Gegebenheiten von Sensor, Messumgebung und Anwendung definiert. Die Kontaktierung des Temperatursensor-Arrays mit der Ausleseelektronik stellt aufgrund des sehr dünnen plastikbasierten Substrats eine Schwierigkeit da. Wird die Folie jedoch mit den nötigen Leiterbahnen versehen, besteht eine hohe Ähnlichkeit zu einem klassischen Flachbandkabel. Die Verwendung eines Steckverbinders für flexible Leiterplatten (FPC) mit 50 Kontakten mit einem Leiterabstand (*Pitch*) von 0,5 mm ist daher naheliegend. Dieses Anschlusskonzept wird bei den entwickelten Ausleseelektroniken und Sensoren konsequent beibehalten. Somit ist sichergestellt, das zumindest im Bezug auf den verwendeten Anschluss, jeder Sensor mit jeder Ausleseelektronik kompatibel ist. Aus diesem Grund konnte auf kein kommerzielles System für die Messung zurückgegriffen werden. Im Gegensatz zu herkömmlicher Elektronik und Sensorik sind die verwendeten Materialien und die daraus resultierenden Eigenschaften des Sensors nicht standardisiert. Gleichzeitig zeigt sich die Passiv-Matrix-Struktur des Sensors anfällig für Störungen, sodass diese Effekte mit einer geeigneten Ausleseelektronik reduziert werden sollen. Die Ursachen von Störungen sind in diesem Zusammenhang vielfältig. Wie in Kapitel 2.1.4 erläutert wird, verursacht die Passiv-Matrix-Struktur einen parasitären Strom im Widerstandsnetzwerk, der zu einer Messwertverfälschung führt. Gleichzeitig zeigt sich das Sensorarray und die Ausleseelektronik anfällig für das Einkoppeln von elektromagnetischen Feldern, wie beispielsweise die Netzfrequenz von 50 Hz. Auch durch spontane Kontaktänderungen im Materialgefüge oder am Stecker kann es zu einer Messsignalländerung kommen. Da diese Störeinflüsse omnipräsent und sehr prominent bei der Messung sind und bis zuletzt nur teilweise beseitigt werden konnten, wurde der Rauschen als Störgröße nicht näher untersucht. Zur

Kontaktierung des Temperatursensor-Arrays wird die Steckerkonfiguration in das Drucklayout der gedruckten Zuleitungsstruktur übernommen. Außerdem wird eine Silbertinte mit hoher Kratzfestigkeit verwendet, damit die Leiterbahnen bei der Kontaktierung mit dem Stecker nicht geschädigt werden. Da sich je nach Variante des Temperatursensor-Arrays auch etwas das Anforderungsprofil ändert, werden zwei verschiedene Ausleseeinheiten entwickelt. Die erste Version der Ausleseelektronik wird vor allem während der Entwicklung des Temperatursensor-Arrays verwendet. Dazu muss die Ausleseelektronik einen möglichst großen Messbereich bereitstellen, damit in dieser Phase verschiedene Thermistormaterialien und Sensorvarianten mit unterschiedlichen Wertebereichen vermessen werden können. In Kapitel 5.1.1 ist der Aufbau und die Funktion des hybriden Messsystems der ersten Bauart ausführlich beschrieben. Für die meisten im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird diese Ausleseelektronik verwendet.

Nach der Erarbeitung eines Sensorkonzept und der Festlegung auf ein geeignetes Thermistormaterial, kann mit der Entwicklung einer speziell auf das Sensorarray zugeschnittenen Ausleseelektronik begonnen werden. Dabei steht eine höhere Auslesegeschwindigkeit und die Kompensation von parasitären Strömen, wie sie bei passiv Matrizen entstehen, im Vordergrund. Gleichzeitig soll die Platine einen portablen und autarken Betrieb erlauben, weshalb die benötigte Elektronik auf einer Platine integriert werden sollte. Dazu werden in Kapitel 5.1.2 verschiedene Messmethoden zur Fehlerkompensation vorgestellt und die Anforderungen an die Platine definiert. Die zweite Version der Ausleseelektronik wird hauptsächlich für die Temperaturmessung auf der CPU verwendet. Hierbei war die Auslesegeschwindigkeit ein entscheidendes Kriterium zur zeitnahen Lokalisierung von kritischen Hitzequellen.

### 5.1.1 Entwicklung einer Multiplexer-Ansteuereinheit

Mit der Entwicklung verschiedener Temperatursensoren, der Suche nach geeigneten Thermistormaterialien und der Konzeptionierung des Sensordesigns, ist eine Ausleseelektronik mit großem Messbereich erforderlich. Vor der Entwicklung der ersten Version der Ausleseelektronik gingen einige Vorversuche mit einfachen vollintegrierten Ausleseelektroniken auf Basis eines *Arduinos* voraus. Aufgrund der Herstellungsschwankungen während der Entwicklungsphase der Sensoren waren die einfachen Ausleseelektroniken vom Messbereich schwierig abstimmbare, unflexibel in der Anpassung und bei der Messung sehr unpräzise bzw. störanfällig. Aus diesem Grund wird die Ausleseelektronik in zwei Teile aufgeteilt, wobei schließlich im Rahmen der ersten Ausleseelektronik nur die Ansteuereinheit zur Signalerfassung entworfen wird. Um einen möglichst großen Messbereich abzudecken und eine präzise Messung des Widerstandes zu ermöglichen, wird ein kommerzielles elektronisches Multifunktionsgerät - *Source Measurement Unit* (SMU) eingesetzt. Das Messgerät lässt sich durch einen Computer konfigurieren, ansteuern und auslesen. Alle relevanten Messparameter, wie Messspannung und Strommessbereich, lassen sich gezielt einstellen. Der Vorteil dieser SMU ist die Kombination aus geregelterm Netzteil und hochpräziser Messeinheit in einem Gerät. Um dieses mit dem Temperatursensor-Array zu verbinden, ist allerdings eine Ansteuereinheit notwendig. Zur Verbesserung der Messgenauigkeit, besonders im Zusammenhang mit einem geringem Sensorwiderstand, wird bei der Ausleseelektronik und dem Sensorlayout die Möglichkeit zur Vierleitermessung vorgesehen. Das Funktionsprinzip beruht auf dem Aufteilen von Stromfluss und Spannungsmessung. Mithilfe zweier Leiter wird ein bekannter Strom durch einen Widerstand bzw. das Sensorpixel geleitet. Gleichzeitig erfolgt über zwei weitere Leiter die Messung des Spannungsabfalls über den Widerstand mit einem hochohmigen Spannungsmessgerät. Aufgrund des vernachlässigbar kleinen Stroms in der Spannungsmessleitung wird die Spannungsmessung idealerweise nicht durch Kontakt- und Leitungswiderstände verfälscht. Dieses Verfahren ist insbesondere bei der Messung von Widerständen relevant, wenn die Leitungs- und Kontaktwiderstände im Vergleich zum gemessenen Widerstand nicht vernachlässigbar klein sind. Im Gegensatz dazu, erfolgt bei der Zweileitermessung der Stromfluss und die Spannungsmessung über ein gemeinsames Leiterpaar. Entsprechend gehen der Leitungs- und Kontaktwiderstand bei der Messung mit ein. Allerdings kann bei den

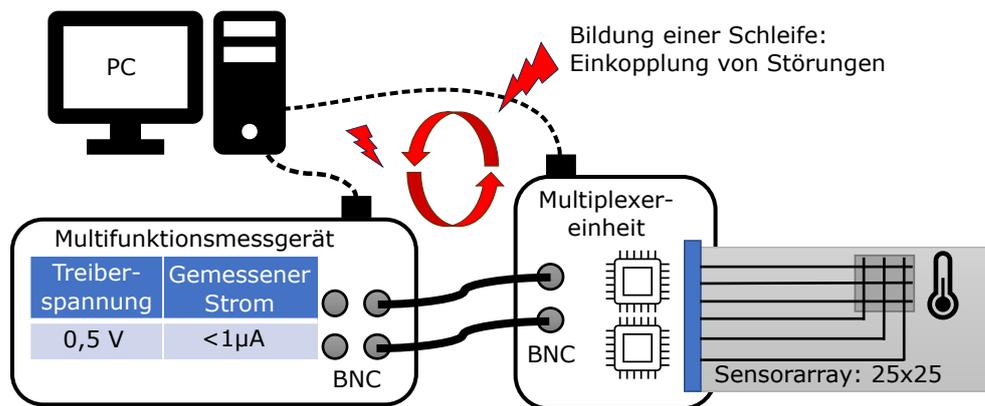


**Abbildung 5.1:** Im Bild sind zwei Versionen der zum Auslesen des Temperatursensor-Arrays verwendeten Ansteuereinheiten zu sehen. Beide Versionen ähneln sich in der Grundfunktion, allerdings ist bei der rechten Version die Möglichkeit zur Vierleitermessung vorgesehen, weshalb zwei Steckverbinder für flexible Leiterplatten (FPC) Anschlüsse verbaut sind.

hier entwickelten Sensoren auf eine Vierleitermessung verzichtet werden, da die Sensorpixel Widerstände im  $k\Omega$ - $M\Omega$  Bereich aufweisen. Mit der Kenntnis über den Stromfluss und den Spannungsabfall, lässt sich der Widerstand mit  $R = U/I$  berechnen.

In Abbildung 5.1 sind die für die Messung entwickelten Ansteuereinheiten dargestellt. Beide Versionen ähneln sich stark in Funktion und Aufbau. Bei der rechten Version kann eine Vierleitermessung durchgeführt werden, weshalb zwei FPC-Stecker zum Anschluss des Sensors verbaut sind. Die FPC-Stecker stellen 50 Kontakte zum Anschluss des Temperatursensor-Arrays über die Zuleitungen bereit. Diese werden in jeweils 25 Kontakte für die vertikale bzw. horizontale Elektrodenstruktur aufgeteilt. Für eine mögliche Vierleitermessung werden die Elektroden des Sensorarrays jeweils doppelt kontaktiert. Die Verschaltung der Ansteuerelektronik verhält sich entsprechend und wird in Sensorreihe und -spalte unterteilt. Zum Ansteuern der einzelnen Elektroden bzw. Sensorpixel sind jedem FPC-Stecker auf der Platine je zwei Multiplexer jeweils für eine Reihe und Spalte zugeordnet. Diese dienen als Signalweiche um einen Messkanal anzu-steuern und das Signal auf den Eingang/Ausgang zu legen. Das Messsignal wird über Koaxialanschlüsse (Bayonet Neill–Concelman (BNC)) von der Platine an die SMU weitergeleitet. Bei der Verschaltung der BNC-Anschlüsse findet sich ein kleiner Unterschied zwischen den beiden in Abbildung 5.1 dargestellten Versionen. Bei der rechten Version wird sowohl der Außen- als auch der Innenleiter des Koaxialanschlusses zu Signalübertragung genutzt. Bei der Messung führt dies allerdings zu Störeinflüssen. Aus diesem Grund lässt sich bei der linken Version das Messsignal bei der Zweileitermessung auf zwei getrennte BNC-Anschlüsse aufteilen. Die Signalübertragung erfolgt dann lediglich über den Innenleiter des BNC Kabels, während der Außenleiter auf Masse liegt. Das Leiterplattenlayout und der Schaltplan ist im Anhang A.1 & A.2 zu finden.

Um mit den Multiplexern einen Kanal anzuwählen, wird auf der Platine ein *Arduino Nano IoT* verbaut. Dabei handelt es sich um eine kommerzielle und quelloffene Hardwareentwicklungsplatine basierend auf einem einfachen Mikrocontroller. Der Vorteil des *Arduinos* liegt in einer einfach zu programmierenden Hardwareumgebung, die verschiedene Ein- und Ausgabeschnittstellen bereitstellt. Die verbaute Variante besitzt außerdem ein Bluetooth- und WLAN-Modul, dass hier zur drahtlosen Kommunikation genutzt wird. Der Aufbau der Ausleseelektronik ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Außerdem ist die für Störeinflüsse verantwortliche Leiterschleife angedeutet. Die Abbildung zeigt wie das Temperatursensor-Array über die FPC-Stecker mit der Ansteuereinheit verbunden wird. Über BNC-Kabel wird diese an die SMU) angeschlossen. Die Steuerung beider Geräte sowie die Datenerfassung erfolgt über einen separaten Steuerungscomputer. Zunächst erfolgte die Kommunikation zwischen Steuerungscomputer und Ansteuereinheit kabelgebunden über eine serielle Schnittstelle, welches zu den besagten Störungen durch Einkoppeln von Störsignalen aus dem Computer und der Umgebung führte. Wie in der Abbildung 5.2 skizziert, kam es aufgrund der Verkabelung



**Abbildung 5.2:** Im Schaubild ist der Messaufbau zum Auslesen des Temperatursensor-Arrays dargestellt. Dazu wird das Temperatursensor-Array mit der Ansteuereinheit verbunden. Diese leitet das Messsignal über zwei BNC-Kabel an ein Elektronisches Multifunktionsgerät - *Source Measurement Unit* (SMU) weiter. Dieses stellt die Treiberspannung zur Verfügung und führt gleichzeitig die Strommessung durch. Beide Geräte sind mit einem Steuerungscomputer verbunden. Bei einer kabelgebundenen Steuerung der Ansteuereinheit, kam es zu massiven Störeinflüssen bei der Messung durch eine Leiterschleife. Durch die Verwendung einer kabellosen Anbindung der Ansteuereinheit über WLAN konnte dieses Problem schließlich beseitigt werden.

zu einer Leiterschleife zwischen den einzelnen Geräten. Aus diesem Grund ist auf dem *Arduino* ein Webserver implementiert, der die Kommunikation des Steuerungscomputers mit der Ansteuereinheit kabellos per WLAN ermöglicht. Die Stromversorgung der Platine wird über eine USB-Schnittstelle auf der Platine bewerkstelligt und autark mit einer Powerbank mit Energie versorgt. Nach der Eliminierung der Leiterschleife, Verwendung der WLAN basieren Kommunikation, sowie einer Powerbank zur Energieversorgung konnte die Störanfälligkeit effektiv reduziert werden. Im Gegenzug steigt durch die WLAN Verbindung die Latenzzeit beim Kanalwechsel, was sich auf die Gesamtmesszeit für einen Auslesevorgang des Sensorarrays negativ auswirkt. Bei statischen Messungen, wie diese hauptsächlich zu Beginn durchgeführt wurden, ist die Messzeit allerdings zweitrangig.

Im späteren Verlauf wird die Ausleseelektronik um einen Temperaturmessplatz erweitert. Dazu wird mithilfe einer PID-Steuerung und Peltierelementen eine vollautomatische Temperatursteuerung in das Messsystem integriert und später zur Vermessung/Kalibrierung der Temperatursensoren verwendet. Dies ermöglicht das unbeaufsichtigte Abfahren von Temperaturzyklen und die Kalibrierung des Sensors. Die Beschreibung des Temperaturmessplatz findet sich in Kapitel 6.2.

## 5.1.2 Entwicklung einer angepassten Ausleseelektronik

Die im Kapitel 5.1.1 zweigeteilte Ausleseelektronik, bestehend aus einer SMU mit vorgeschalteter Ansteuereinheit, weist im Bezug auf Messzeit und Störanfälligkeit einige Defizite auf. Für zeitkritische Anwendungen ist eine Auslesezeit von 1-2 Minuten für alle 625 Sensorpixel des Temperatursensor-Arrays unpraktikabel. Gleichzeitig bietet die erste Version der Ausleseelektronik keine Möglichkeit die negativen Eigenschaften der Passiv-Matrix-Struktur, auf welcher der Sensor basiert, zu kompensieren. In Kapitel 2.1.4 werden die Vor- und Nachteile einer passiven und aktiven Matrix beschrieben. Zwei Probleme sind bei der entwickelten Temperatursensoramatrix besonders prävalent: 1) Da sich alle Sensorpixel in einem großen Verbund befinden, fließen bei Ansteuerung eines Pixels auch parasitäre Ströme über die umliegenden Pixel. Dies führt zu einer Verfälschung des Messwertes. In Abbildung 2.6 ist die Problematik durch eine Schaltskizze verdeutlicht. 2) Die Auslesezeit skaliert stark mit der Anzahl der auszulesenden Sensorpixel, da jeweils nur ein Pixel gleichzeitig ausgelesen werden kann. Ein Erweitern des Sensorarrays um weitere Sensorpixel steht damit im Widerspruch zur Auslesegeschwindigkeit.

Im Folgenden ist eine Liste möglicher Verfahren zum Auslesen einer passiv Matrix zusammengestellt, die den Einfluss des parasitären Stroms reduzieren und/oder eine höhere Auslesegeschwindigkeit ermöglichen. Die in der Liste zuletzt vorgestellte Methode wird bei der angepassten Ausleseelektronik angewendet und umgesetzt:

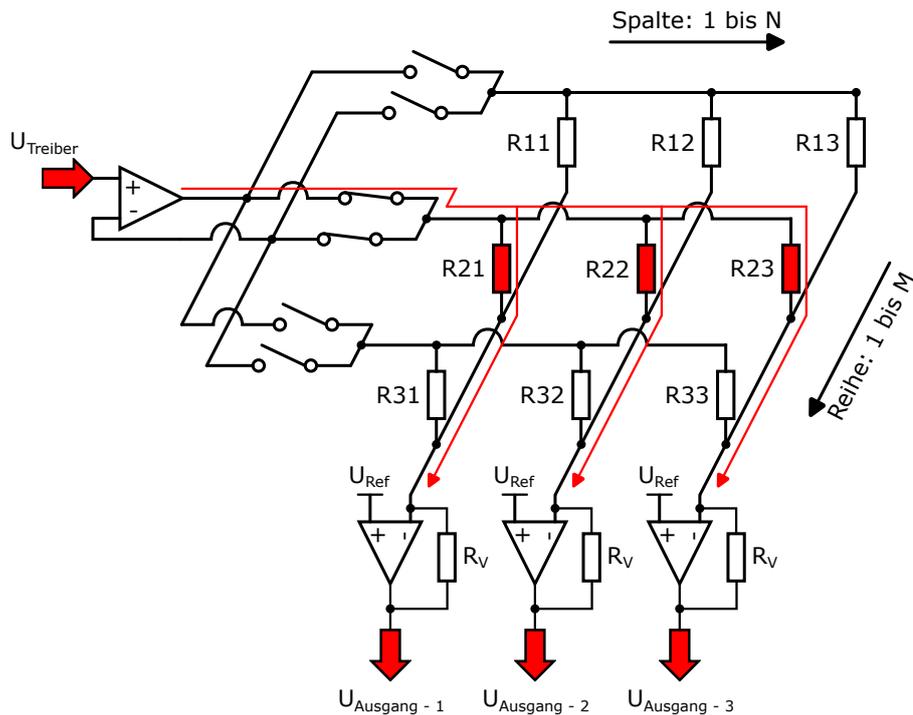
**Integrierte Diode:** Im Rahmen dieses Verfahrens wird zu jedem Sensorpixel eine Diode in Reihe geschaltet. Dadurch werden parasitäre Ströme durch die unidirektionale Leitfähigkeit der Dioden unterbunden. Auf diese Weise können prinzipiell alle Sensorpixel einer angewählten Reihe/Spalte gleichzeitig ausgelesen werden. Allerdings muss die Diode notwendigerweise in das Sensorarray integriert werden, weshalb die Fertigungskomplexität und der Platzbedarf steigt. Außerdem zeigen Dioden eine Temperaturabhängigkeit, die ebenfalls zu einer Messwertverfälschung führt. [143, 144]

**Integrierter Transistor:** Bei dieser Methode wird jedem Sensorpixel ein Transistor hinzugefügt. Durch Anwählen der Steuerleitung einer Spalte/Reihe, schalten die damit verbundenen Transistoren durch und erlauben das Auslesen der angeschlossenen Sensorpixel. Ist die übrige Elektronik entsprechend ausgelegt, können gleichzeitig alle Sensorpixel der gewählten Reihe/Spalte ausgelesen werden. Somit erfordert diese Methode zusätzlich die komplexe Herstellung von Transistoren und die Integration in das Sensorarray. Hinzu kommen Elektroden, die als Steuerleitung benötigt werden und den Platzbedarf noch weiter steigern. Durch die Anzahl an Elektroden entstehen ungewollte Kreuzungspunkte, weshalb eine elektrische Isolatorschicht nötig wird. Auch die Transistoren weisen eine Temperaturabhängigkeit auf und wirken sich somit negativ auf die Messgenauigkeit aus. [145, 144]

**Widerstands-Matrix-Berechnung:** Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie ohne zusätzliche Komponenten innerhalb des Sensorarrays auskommt. Durch die Anwendung der Kirchhoff'schen Gesetze wird ein Gleichungssystem für das gesamte Sensorarray aufgestellt. Damit dieses allerdings gelöst werden kann, ist eine zusätzliche Reihe/Spalte von Referenzwiderständen auf dem Sensorarray erforderlich. Zur korrekten Berechnung der Widerstände müssen alle Sensorwiderstände über den gesamten Messzeitraum möglichst konstant bleiben. Entsprechend ist diese Methode für schnelle Temperaturänderungen ungeeignet, insbesondere wenn eine große Anzahl an Sensorpixeln ausgewertet werden sollen. Bis zu einem gewissen Grad kann dieses Problem durch eine sehr hohe Ausleserate kompensiert werden. Änderungen der Messwerte während einer Messung wirken sich negativ auf die Messgenauigkeit aus. Für große Arraysysteme mit vielen Sensorpixeln ist diese Messmethode daher ungeeignet. Außerdem sollte der erforderliche Rechenaufwand nicht unterschätzt werden. [146, 144]

**Feedback-Loop-Methode:** Die Methode unterdrückt die parasitären Ströme indem nicht beteiligte Sensorpixel auf das gleiche Potential des gemessenen Pixels gesetzt werden. Der Vorteil ist, dass diese Variante gänzlich ohne zusätzliche Komponenten in dem Sensorarray auskommt. Dabei wird das auszulesende Sensorpixel mit der Treiberspannung beaufschlagt und gegen Masse gemessen. Die übrigen Reihen/Spalten werden mit Hilfe einer Rückkopplungsschleife über einen Impedanzwandler auf ein sich einstellendes Potential gezogen. Allerdings können nicht ideale Bauteileigenschaften trotzdem zu kleinen parasitären Strömen führen. Da die Methode nur das Auslesen eines Pixels erlaubt, ist die Auslesegeschwindigkeit ebenfalls limitiert. [147, 148, 144]

**Zero-Potential-Scanning:** Diese Methode ist an die Feedback-Loop Methode angelehnt, allerdings werden nicht gemessene Sensorpixel auf Masse gezogen. Außerdem werden Komponenten im Sensorarray benötigt. In Abbildung 5.3 ist die Schaltung, wie sie zum Auslesen des Temperatursensor-Arrays verwendet wird, schematisch dargestellt. Als niederimpedante Spannungsquelle und Reihentreiber wird ein Operationsverstärker



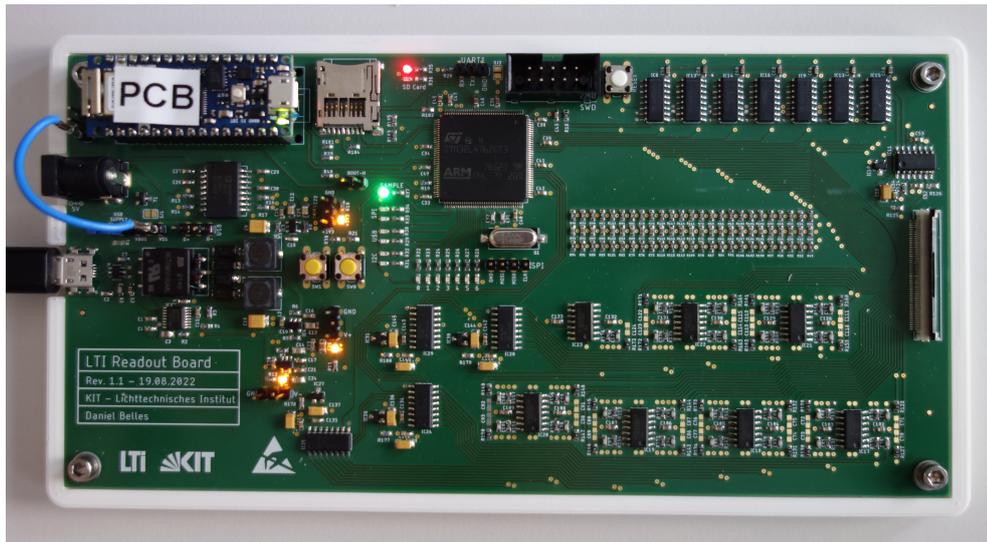
**Abbildung 5.3:** In der Abbildung ist das Schaltungsdesign für die *Zero-Potential-Scanning*-Methode dargestellt. Mit einem Operationsverstärker wird eine niederimpedante Spannungsquelle realisiert und eine für die Messung notwendige Treiberspannung zur Verfügung gestellt. Durch einen nachgeschalteten Multiplexer kann die zu messende Reihe ausgewählt werden. Jede Spalte wird über einen invertierenden Verstärker ausgelesen. Durch die erzeugte virtuelle Masse werden parasitäre Ströme im Sensorarray unterbunden. Beim Auslesen kann eine hohe Abtastrate erreicht werden, da alle Sensorpixel einer angesteuerten Reihe gleichzeitig ausgelesen werden können. Angelehnt an [71]; CC-BY 4.0

verwendet. Durch einen nachgeschalteten Multiplexer wird eine Reihe zum Auslesen ausgewählt und mit der Treiberspannung versorgt. Jede Spalte ist mit einem invertierenden Verstärker versehen, der gleichzeitig als virtuelle Masse dient. Der verbaute Widerstand  $R_V$  in der Gegenkopplung des Verstärkers erlaubt die Wahl des Verstärkungsfaktors. Nicht ideale Bauteileigenschaften können auch hier zu kleinen Messfehlern führen. Da gleichzeitig alle Sensorpixel der beschalteten Reihe ausgelesen werden können, kann eine hohe Abtastrate erreicht werden. [71, 148, 144]

Im direkten Vergleich mit den vorgestellten Messmethoden bietet die *Zero-Potential-Scanning*-Methode den besten Kompromiss. Der Verzicht auf weitere Komponenten in der Sensorstruktur ist vorteilhaft, da die Komplexität bei der Herstellung auf das Sensorarray beschränkt bleibt. Außerdem kann eine höhere Sensordichte erzielt werden. Auch die Komplexität der Ausleseelektronik ist überschaubar, wobei die benötigten Komponenten hauptsächlich mit der Anzahl der Spalten (vgl. Abbildung 5.3) skaliert. Da mehrere Sensorpixel gleichzeitig ausgelesen werden können, wird einer hohen Auslesegeschwindigkeit erreicht. Dies mindert allerdings nicht die Messgenauigkeit, die im Wesentlichen von der Wahl hochwertiger Komponenten, insbesondere der Operationsverstärker, abhängt.

Auf Grundlage der *Zero-Potential-Scanning*-Methode wird eine angepasste Ausleseelektronik speziell für die Temperatursensor-Arrays entwickelt. Die Konzeptionierung und Umsetzung erfolgt im Rahmen einer Masterarbeit und wurde maßgeblich von D. Belles [15] durchgeführt. Einige Anforderungen sind für die Entwicklung der Ausleseelektronik vorab definiert worden:

- Volle Kompatibilität mit den gedruckten Temperatursensor-Arrays, bestehend aus maximal 25 Reihen und 25 Spalten.



**Abbildung 5.4:** Das Bild zeigt die fertig entwickelte Ausleseelektronik auf Grundlage der *Zero-Potential-Scanning*-Methode. Das Temperatursensor-Array wird rechts über einen FPC-Stecker mit der Elektronik verbunden. Mithilfe des verbauten Mikroprozessors ist, je nach gewähltem Modus, auch eine Datenvorverarbeitung auf der Platine möglich. Entnommen von [1]; CC-BY 4.0

- Abdeckung eines großen Widerstandsmessbereichs, der sich etwa von  $500\text{ k}\Omega$  bis  $10\text{ M}\Omega$  erstreckt. Die Notwendigkeit für ein derart großes Spektrum ist auf zwei Faktoren zurückzuführen: 1) Fluktuationen bei Herstellung im Druckverfahren. 2) Die intrinsische Temperaturabhängigkeit des Widerstandes. Hierbei soll mindestens eine Einsatztemperatur für den Sensor zwischen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgedeckt werden.
- Eine möglichst echtzeitnahe Temperaturerfassung und Darstellung des Temperaturprofils. Als Ziel wird eine Abtastrate von mindestens  $10\text{ Hz}$  definiert.
- Die Temperaturentauflösung soll bei  $< 0,1\text{ K}$  liegen.
- Die relative Messabweichung der Temperatur soll auf  $< 1\%$  begrenzt bleiben.
- Aufgrund der gesammelten Erfahrung bei der zuvor entwickelten Ansteuereinheit im Zusammenhang mit der Anfälligkeit für das Einkoppeln von Störungen über die Spannungsversorgung, soll eine kabellose Schnittstelle vorgesehen werden. Die Energieversorgung kann über eine Powerbank erfolgen und womit eine autarke Verwendung möglich ist.

In Abbildung 5.4 ist die auf Basis der *Zero-Potential-Scanning*-Methode entwickelten Ausleseelektronik zu sehen. Um die zuvor definierten Anforderungen zu erfüllen, ist die Platine in Segmente unterteilt, abhängig von der jeweiligen Funktion. Die gesamte kabelgebundene Kommunikation ist nach außen galvanisch von der Messelektronik getrennt, um die Einkopplung von Störungen zu verhindern. Es wird außerdem ein *Arduino Nano 33 IoT* verbaut, der zusätzlich zur kabelgebundenen, auch eine kabellose Kommunikation erlaubt. Somit kann die Steuerung und auch der Messdatenaustausch, wie bei der Ansteuereinheit (siehe Kapitel 5.1.1), über WLAN erfolgen. Zum Betrieb der einzelnen Baugruppen werden verschiedene Betriebsspannung benötigt, die ausgehend von der Versorgungsspannung von  $5\text{ V}$  alle auf der Platine generiert werden. Die Spannungsversorgung war besonders auf die Erzeugung einer stabilen und rauscharmen Spannung ausgelegt. Die Baugruppen sind voneinander galvanisch und mit möglichst großem Abstand getrennt. Bei der Entwicklung der Platine wird großer Wert auf die Auswahl geeigneter Komponenten gelegt, da diese sich unmittelbar auf die Signalqualität auswirken. Vor allem der Analog-Digital-Wandler muss neben einer hohen

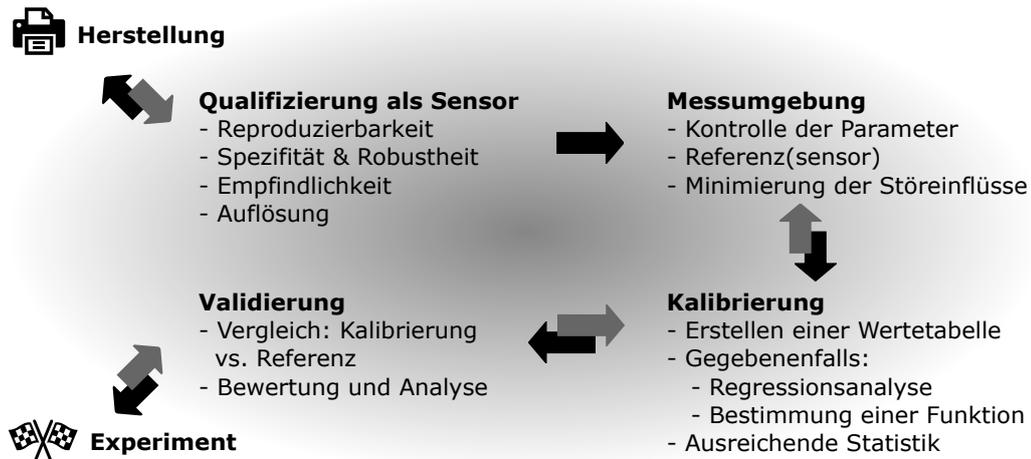
Auflösung von 12 Bit auch eine hohe Abtastrate erzielen. Für den unmittelbaren Testbetrieb und Werteabgleich ohne angeschlossenes Sensorarray sind zusätzliche Referenzwiderstände verbaut. Für den Betrieb muss neben einer Betriebsfirmware für die Ausleseelektronik, auch eine Kommunikationsbibliothek und die Benutzeroberfläche für den Steuerungscomputer geschrieben werden. Die ursprünglich gesetzten Anforderungen konnten nach Fertigstellung der Platine erfüllt werden, wobei aufgrund von Variationen bei der Herstellung der Temperatursensor-Arrays weitere Optimierungen notwendig wurden. Eine vollständige und tiefgreifende Beschreibung, sowie die Schaltpläne zur angepassten Ausleseelektronik ist in der Masterarbeit [15] von D. Belles zu finden.

## 5.2 Kalibrierverfahren

Zur Temperaturbestimmung müssen die von der Ausleseelektronik ausgegebenen Werte interpretiert werden. Dazu muss konkret der gemessene Widerstand in die Temperatur übersetzt werden. Damit dies zuverlässig funktioniert, muss der Messwert und die Temperatur miteinander korreliert sein. Außerdem muss der Sensor und die Ausleseelektronik reproduzierbare Ergebnisse liefern. Zur Interpretation der Messwerte wird die Kenntnis über den Zusammenhang zwischen Messwert und Temperatur vorausgesetzt. Für diese Arbeit werden zwei Verfahren zur Umrechnung bzw. Kalibrierung des Sensors verwendet. Beide Methoden haben im Hinblick auf die erforderliche Temperaturwiedergabegenauigkeit, den Zeitaufwand und aufgrund von Einschränkung bei der Messdurchführung jeweils entscheidende Vor- und Nachteile. Im anschließenden Kapitel 5.2.1 werden die Details zur sogenannten individuellen Kalibrierung erläutert. Dabei wird für jedes Sensorpixel des Temperatursensor-Arrays eine eigene Kalibrierfunktion berechnet und diesem zugeordnet. Im späteren Verlauf der Arbeit wird mit der sogenannten gemittelten Kalibrierung eine vereinfachte Kalibrierung etabliert. Diese basiert zwar auf der individuellen Kalibrierung, erlaubt aber ein schnelleres Rekalibrieren. Dieses Verfahren wird in Kapitel 5.2.2 ausführlich beschrieben. Die mathematischen Grundlagen für die Kalibrierung und Beschreibung des Temperaturverhaltens von Thermistoren ist Inhalt von Kapitel 2.2.3.

Im Allgemeinen stehen bei der Kalibrierung des Temperatursensor-Arrays eine große Anzahl an Messpunkten zur Verfügung. Mithilfe einer Regressionsanalyse werden verschiedene mathematische Modelle auf die Messdaten angewendet, um eine passende Kalibrierfunktion zu finden. Die mit Abstand beste Übereinstimmung zwischen Messdaten und Regressionsfunktion kann mit einem Polynom vierten Grades erzielt werden und wird deshalb als Regressionsfunktion für die gesamte Arbeit genutzt. Die explizite Ausführung der Kalibrierung ist in den Experimentalkapiteln 6 und 7 beschrieben. In Abgrenzung dazu, werden in diesem Kapitel wichtige Hintergründe und Anmerkungen zu den jeweiligen Kalibriervorgängen gegeben.

Bevor das Temperatursensor-Array als Temperatursensor eingesetzt werden kann, bedarf es einer Kalibrierung. Die grundsätzliche Vorgehensweise und die für eine Kalibrierung notwendigen Voraussetzungen sind schematisch in Abbildung 5.5 zusammengefasst. Der Kalibrierprozess wird im Zuge der Entwicklung der Ausleseelektronik erarbeitet und speziell an die Gegebenheit angepasst. Grundsätzlich muss sich der gedruckte Materialstapel als Sensor qualifizieren. In einer vereinfachten Messung wird überprüft, ob der Sensor verlässlich reproduzierbare Werte bei verschiedenen Temperaturen liefert. Das heißt, dass unter gleichen Bedingungen immer die selben Messwerte erzielt werden. Nicht bei allen untersuchten Thermistormaterialien war dies der Fall, weshalb das Material infolgedessen ausgeschlossen wurde. Außerdem sollte der Messwert spezifisch nur auf die Temperatur reagieren. Bei der Benutzung ist der Sensor äußeren Umwelteinflüssen ausgesetzt und muss für die Benutzung daher eine ausreichende Stabilität und Robustheit mitbringen. Die Anwendung setzt normalerweise gewisse Anforderungen an die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen im Bezug auf die Messgröße voraus. Einfach ausgedrückt muss eine Änderung der Temperatur auch zu einer Änderung des Messsignals führen. Außerdem stellt sich die Frage, wie klein eine Temperaturänderung



**Abbildung 5.5:** Der Weg von der Herstellung des Sensors bis zum eigentlichen Einsatz im Experiment erfordert mehrere Zwischenschritte, insbesondere dann wenn für den Messvorgang eine Kalibrierung erforderlich ist. Zunächst muss der Sensor alle erforderlichen Voraussetzung erfüllen, um als Sensor genutzt werden zu können. Für die Kalibrierung des Sensors müssen im Messaufbau alle wesentlichen Messgrößen erfasst und die Umgebungsparameter kontrolliert werden. In einer Kontrollmessung sollte die ermittelte Kalibrierung anschließend überprüft werden. Konnten die gesetzten Anforderungen erfüllt werden, kann das Temperatursensor-Array im Experiment als Temperatursensor eingesetzt werden.

sein kann, um noch detektiert zu werden. Bei der Entwicklung des Temperatursensor-Arrays ist die Auswahl der Materialien und die Festlegung auf eine Sensorstruktur ein interaktiver, mehrschrittiger Prozess. Dies umfasst die Herstellung bis hin zur Untersuchung, ob alle Kriterien erfüllt sind.

Bei der Kalibrierung des Sensors, ist eine präzise Steuerung der Temperatur in der Messumgebung erforderlich. Sollten weitere Umgebungsparameter (z.B. die Luftfeuchtigkeit) auf die Messwerte Einfluss nehmen, müssen diese mitberücksichtigt werden. Idealerweise zeigt der Sensor keine weiteren Abhängigkeiten. In diesem Zusammenhang konnte bei den letztendlich verwendeten Materialien keine weitere Einflussgröße identifiziert werden. Dies vereinfacht nicht nur die Fertigung, weil damit beispielsweise das Aufbringen einer Versiegelung vermieden werden kann, sondern reduziert auch die Komplexität der Messung. Um die Messwerte mit der Temperatur zu korrelieren, ist die Erfassung der Referenztemperatur erforderlich. In jedem Messaufbau ist deshalb ein Referenzsensor eingelassen. Bei der Positionierung sollte darauf geachtet werden, dass der Referenzsensor und das Temperatursensor-Array möglichst den gleichen Bedingungen ausgesetzt sind, um eine Vergleichbarkeit der gemessenen Temperaturen beider Sensoren zu gewährleisten. Jegliche Art von Störeinflüssen sollte bei der Kalibrierung möglichst abgeschirmt werden, der sonst als systematischer Fehler bei jeder Messung mit eingehen würde. Wie im nachfolgenden Kapitel 5.2.1 erläutert wird, werden dazu verschiedene Gegenmaßnahmen ergriffen.

Die einfachste Art der Kalibrierung ist die Messung vieler Datenpunkte und das Aufstellen einer Wertetabelle (LUT). Im Anschluss erlaubt ein Abgleich der Messwerte mit der Wertetabelle die Umrechnung in Temperaturwerte. Liegt der Messwert zwischen zwei Referenzpunkten, kann durch eine Interpolation zur Umrechnung genutzt werden.

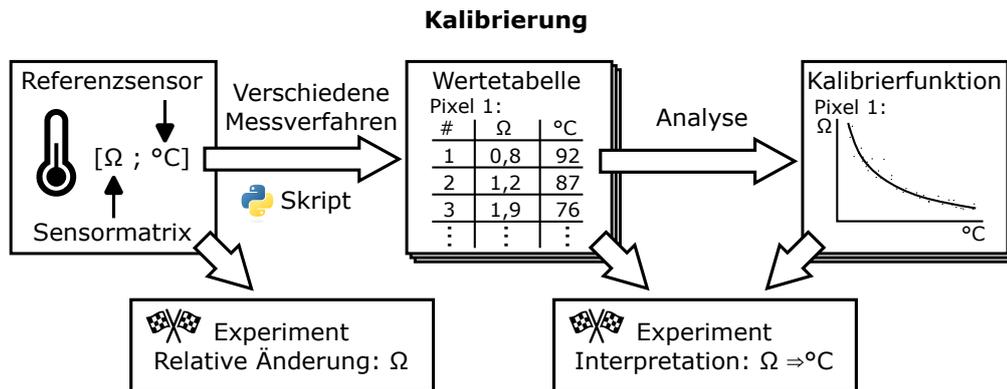
Lässt sich die Korrelation zwischen Messwert und Referenzwert durch eine mathematische Funktion beschreiben, kann die Kalibrierung vereinfacht werden. Mithilfe einer Regressionsanalyse, beispielsweise unter Verwendung eines Polynom vierten Grades (siehe Kapitel 2.2.3), wird aus den gemessenen Datenpunkten eine individuell passende Regressionsfunktion berechnet. Eine solch parametrisierte Funktion, entspricht der Kalibrierfunktion für den jeweiligen Sensor. Im Gegensatz zu einer Wertetabelle, sind eventuell weniger Daten ausreichend, um eine Regressionsanalyse durchzuführen. Da bei der Erstellung der Kalibrierfunktion die Gesamtheit aller Datenpunkte berücksichtigt wird, fallen außerdem „Ausreißer“ beim Kalibriervorgang

weniger ins Gewicht. Trotzdem ist eine Mehrfachmessung und eine höhere Statistik von Vorteil, um „Ausreißer“ und Störungen besser zu kompensieren und/oder erkennen zu können. Bleibt der mathematische Zusammenhang zur Beschreibung des Sensors auch über die Grenzen der Kalibrierung (z.B. Temperaturbereich) hinaus gültig, kann durch Extrapolation der Messbereich vergrößert werden.

Nach der Kalibrierung sollten die ermittelten Regressionsfunktionen nochmals in einer Messung verifiziert werden. Zur Bewertung wird das interpretierte Ergebnis mit der Referenzmessung verglichen. Mit der Kalibrierung lässt sich schließlich auch eine Aussage über die Genauigkeit des Sensors treffen. Dabei kann die Genauigkeit der Kalibrierung nur so gut sein, wie die Messgenauigkeit des Referenzsensors. Die Messdaten, die als Grundlage für die Kalibrierung dienen, werden außerdem zur Charakterisierung genutzt, wie beispielsweise zur Berechnung des TCR-Werts (siehe Kapitel 2.2.3). Liefern die ermittelten Kalibrierfunktionen des Temperatursensor-Arrays bei der Validierung zufriedenstellende Ergebnisse, kann diese im Anschluss für die Interpretation der Messdaten im Experiment eingesetzt werden. Während der Verwendung des Sensorarrays im Experiment kann es jedoch zu einem Sprung oder Verschiebung des Messwerte kommen. Eine mögliche Ursache ist die Änderungen des Kontaktwiderstandes zwischen Stecker und Sensor durch eine Erschütterung. Um die höchstmögliche Messgenauigkeit bei einem Experiment zu erzielen, wird das Temperatursensor-Array jedes Mal neu kalibriert und vorsichtig in den Messaufbau umgezogen. Da sich leider die einzelnen Temperatursensoren aufgrund von Fertigungstoleranzen unterscheiden, können die individuellen Kalibrierungen nicht sensorübergreifend verwendet werden. Allerdings ist ein generell ähnliches Verhalten zwischen den Sensorpixeln auch über verschiedene Temperatursensor-Arrays festzustellen. Genau diese Gemeinsamkeit wird bei der gemittelten Kalibrierung ausgenutzt und zur Vereinfachung des Kalibriervorgangs verwendet. Die Details sowie ein Vergleich zwischen beiden Methoden ist in Kapitel 5.2.2 beschrieben. An dieser Stelle sei allerdings angemerkt, dass nicht immer eine Temperaturmessung notwendig ist. Da das Sensorarray aufgrund der lateralen Auflösung zur Bildgebung eingesetzt werden kann, ist häufig schon die Beobachtung der Messwertänderung ausreichend. Dazu wird die absolute oder relative Abweichung zu einer Messbasislinie (*Baseline*) berechnet und als Wärmeverteilung dargestellt. Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens des Thermistormaterials kommt es aber zu einer Verfälschung der Werte über den Temperaturbereich. Wird lediglich die Messwertänderung im Experiment benötigt, kann auf eine Kalibrierung des Sensorarrays verzichtet werden.

### 5.2.1 Individuelle Kalibrierung

Bei der sogenannten individuellen Kalibrierung wird für jeden Sensorpixel eine eigene Kalibrierfunktion berechnet und diesem zugeordnet. Die grundsätzliche Vorgehensweise für eine Messung inklusive der Kalibrierung ist in Abbildung 5.6 skizziert. Mithilfe der Messung der Referenztemperatur und der Widerstandswerte der einzelnen Sensorpixel wird eine Wertetabelle erstellt. Die Datenerhebung erfolgt mit einer der entwickelten Ausleseelektroniken. Prinzipiell kann der erstellte LUT bereits zur Umrechnung des Messwerts in die Temperatur genutzt werden. Anstelle dessen werden auf Grundlage der LUT die Kalibrierfunktionen berechnet. Die in Kapitel 2.2.3 vorgestellten mathematischen Modelle werden in einer Regressionsanalyse auf die Datenpunkte angewendet. In dieser Arbeit kommt ein Polynom vierter Ordnung zum Einsatz, womit die beste Übereinstimmung erzielt wird. Die ermittelten Kalibrierfunktionen werden anschließend im Experiment zur Umrechnung der Messwerte in Temperaturwerte verwendet. Werden nur die bildgebenden Möglichkeiten des Temperatursensor-Arrays ohne Kalibrierung genutzt, können die Messungen bei Bedarf trotzdem nachträglich umgerechnet werden. Der Sensor wird in der Regel vor jedem Experiment neu kalibriert. Mit der individuellen Kalibrierung der einzelnen Sensorpixel wird ein Temperaturmessfehler von kleiner  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  erzielt. Der Kalibriervorgang der entwickelten Sensorfolie ist in Kapitel 6.3 beschrieben.



**Abbildung 5.6:** Schematische Darstellung nötiger Vorbereitungen, zum Einsatz des Temperatursensor-Arrays im Experiment. Bei der individuellen Kalibrierung wird jedes Sensorpixel kalibriert. Zunächst wird eine Wertetabelle, bestehend aus der Referenztemperatur und dem dazugehörigen Widerstandswert, erstellt. Diese kann entweder direkt verwendet werden oder die Daten werden für eine Regressionsanalyse zur Bestimmung der Kalibrierfunktionen genutzt. Beide Varianten ermöglichen die Umrechnung des Widerstand-/Messwerts in die Temperatur. Bei Betrachtung der Wärmeverteilung kann bereits die Analyse der absoluten oder relativen Messwerte genügen. Eine Kalibrierung ist dann nicht erforderlich.

Die Kalibrierung des Temperatursensor-Arrays kann sowohl mit der Ansteuereinheit in Kombination mit der SMU oder durch die angepasste Ausleseelektronik erfolgen. Mit der angepassten Ausleseelektronik wird der Kalibriervorgang aufgrund der hohen Auslesegeschwindigkeit verkürzt. Es stehen verschiedene Messverfahren für den Kalibriervorgang zu Verfügung. Das manuelle und halb-automatische Verfahren erfordern häufiges Eingreifen und benötigen viel Zeit. Mit einem vollautomatischen Temperaturmessplatz wird die Datenerhebung schließlich stark vereinfacht. Die Methoden werden im Folgenden vorgestellt.

### 5.2.1.1 Temperaturstabilisierte Messung mit einer Heizplatte

Diese Methode wird für erste Messversuche/Kalibrierungen verwendet und besteht aus einer manuell einstellbaren Laborheizplatte. Die vorgegebene Temperatur wird durch eine fest verbaute PID-Steuerung eingeregelt. Für die Kalibrierung werden händisch nacheinander mehrere Temperaturstufen ausgewählt und die Messung ausgeführt, sobald sich die Temperatur eingependelt hat. Der Sensor wird zwischen zwei großflächigen Aluminiumplatten eingeklemmt, die wiederum durch die darunterliegende Heizplatte temperiert werden. Jede Aluminiumplatte wird über ein Erdungskabel auf Masse gezogen und dadurch externe Störeinflüsse reduziert. Außerdem ist jede Platte mit einem Referenzthermometer zur Kontrolle und Steuerung der Messung versehen. Um die Temperaturdifferenz zwischen beiden Platten zu minimieren und um das Abkühlen der oberen Platte, die der Umgebung ausgesetzt ist, zu verlangsamen, wird ein thermisch isolierter Deckel über die Heizplatte gestülpt. Da die Temperatureinstellung an der Heizplatte manuell erfolgt, wird über das Messskript eine halbautomatische Messung ausgeführt, das nach der Messphase den Vorgang pausiert und auf den nächsten Temperaturschritt wartet. Im Skript wird dazu die angestrebte Referenztemperatur eingegeben und diese im Anschluss manuell an der Heizplatte eingestellt. Mithilfe des eingelassenen Referenzthermometers wird vom Skript die aktuelle Temperatur der Aluminiumplatten abgefragt und mit der Vorgabe abgeglichen. Um eine Messung des Temperatursensors auszulösen, müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein:

- 1) Die Zieltemperatur inklusive einer Toleranz von  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  muss an beiden Aluminiumplatten erreicht sein.
- 2) Die Temperaturdifferenz zwischen beiden Platten muss  $< 0,5^\circ\text{C}$  betragen.
- 3) Sind die beiden zuvor genannten Bedingungen erfüllt, startete ein Countdown von 30 s. Innerhalb von diesem Zeitraum müssen alle Bedingungen erfüllt bleiben.

Diese Maßnahmen stellen sicher, dass sich die Temperatur ausreichend stabilisiert hat. Damit werden die

von der Heizplatte erzeugten Temperaturüberschwinger vermieden und Fehlmessungen, aufgrund von Temperaturdrift während der Auslesedauer von etwa 2 min für alle 625 Sensorpixel, verhindert. Um mögliche Messfehler zu kompensieren, wird die Messung bei einer Temperaturstufe mehrfach wiederholt und die Werte gemittelt.

Diese Messmethode wird nur im Zusammenhang mit der Multiplexer-Ansteuereinheit in Kombination mit der SMU benutzt. Bei der Verwendung der angepassten Ausleseelektronik kommt es zum Einkoppeln von Störungen durch die Heizplatte.

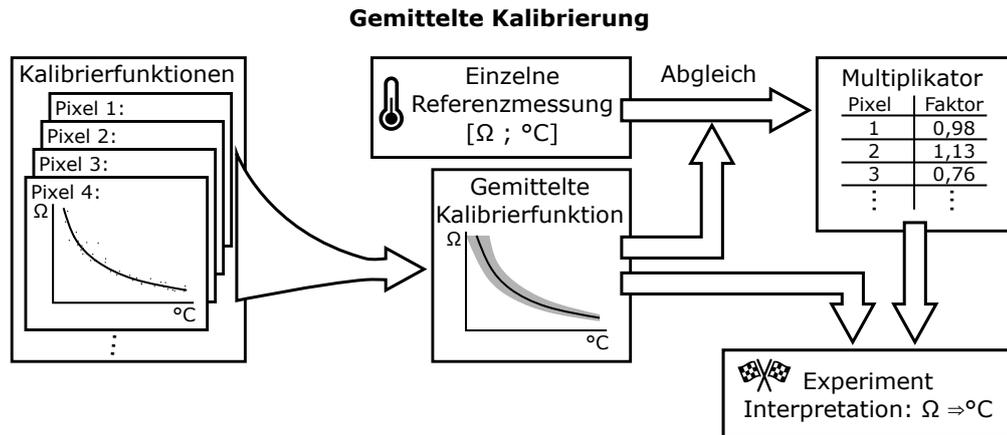
### 5.2.1.2 Dynamische Messung mit einer Heizplatte

Die dynamische Messmethode beruht auf der zuvor vorgestellten manuellen Messung mit einer Heizplatte. Allerdings werden hierbei keine vordefinierten Temperaturwerte angefahren. Ziel ist es, die Anzahl an manuellen Interaktionen mit der Heizplatte auf ein Minimum zu reduzieren und die Kalibrierung unbeaufsichtigt ablaufen zu lassen. Dazu wird die Aluminiumplatte inklusive Sensorarray auf die gewünschte maximale Kalibriertemperatur (z.B. 100 °C) aufgeheizt. Es ist lediglich notwendig zu Beginn der Messung die Heizplatte auf die gewünschte Zieltemperatur einzustellen und diese nach dem Erreichen der Temperatur wieder abzuschalten. Direkt nach dem Abschalten wird das Messskript gestartet und das Temperatursensor-Array kontinuierlich ausgelesen. Im Gegensatz zu der temperaturstabilisierten Messung werden nun die Sensorpixel bei einer gleichmäßig sinkenden Temperatur ausgelesen. Es ist daher nötig vor dem Auslesen jedes Sensorpixels auch die Referenztemperatur zu erfassen. Zwei Dinge sollten bei dieser Methode allerdings berücksichtigt werden: 1) Bei einer großen Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Plattentemperatur, kommt es zu einer höheren Abkühlrate. Diese nimmt entsprechend mit dem Abkühlen der Aluminiumplatten ab. Bis die Aluminiumplatten schließlich die Umgebungstemperatur erreichen, vergeht viel Zeit. Um das Datenaufkommen gegen Ende der Messung zu reduzieren, ist im Messskript ein Trigger hinterlegt, der jeweils nur nach dem Abkühlen der Platten um weitere 0,5 °C eine neue Messung anstößt. Bei hohen Plattentemperaturen kommt es aufgrund der hohen Abkühlrate zu einer kontinuierlichen Messung, während bei niedrigen Temperaturen die Pausen zwischen den Messintervallen zunehmen. 2) Da die Abkühlrate nahe der Umgebungstemperatur sehr langsam vonstatten geht, ist die Messmethode sehr zeitaufwendig. Allerdings kompensiert die Möglichkeit eine unüberwachte Messung auszuführen diesen Nachteil. Die Messdaten werden im Anschluss mit einer Regressionsanalyse verarbeitet und die berechneten Kalibrierfunktionen abgespeichert.

Der Kalibriervorgang ist durch diese Methode erheblich benutzerfreundlicher und Störeinflüsse durch die Heizplatte werden eliminiert. Außerdem erlaubt dieser Vorgang eine Kalibrierung des Temperatursensors direkt in der Messumgebung. In Kapitel 7.3 wird ein auf einen Kühlkörper gedrucktes Temperatursensor-Array vorgestellt. Zur Kalibrierung sind zwei Heizpatronen und ein Referenzsensor im Kühlkörper eingelassen. Dadurch lässt sich der gesamte Kühlkörper aufheizen, woraufhin der Abkühlvorgang im Anschluss zur Kalibrierung genutzt wird. In diesem Zusammenhang lassen sich beiden Ausleseelektroniken für die Messung verwenden.

### 5.2.1.3 Automatisierter Temperaturmessplatz

Bei dieser Kalibriermethode wird ein selbstgebauter Temperaturmessplatz, wie dieser in Abbildung 6.6 dargestellt ist, in den Messaufbau integriert. Dieser erlaubt eine vollautomatische Steuerung über ein Messskript und ermöglicht das Heizen oder Kühlen des Sensorarrays. Dazu wird eine PID-Steuerung mit Peltierelementen verwendet. Somit lassen sich die gewählten Temperaturwerte innerhalb weniger Sekunden stabil anfahren. Nach Erreichen der Zieltemperatur und unter Berücksichtigung einer Toleranz von  $\pm 0,2$  °C wird



**Abbildung 5.7:** Für die gemittelte Kalibrierung werden einmalig die individuellen Kalibrierfunktionen bestimmt und über alle Sensorpixel gemittelt. Um die gemittelte Kalibrierfunktion an das individuelle Pixelverhalten anzupassen, wird in einer einzigen Referenzmessung der Messwert aller Sensorpixel bei einer Temperatur erhoben. Für die gemessene Temperatur wird aus der gemittelten Kalibrierfunktion der dazugehörige Widerstandswert berechnet. Anschließend wird dieser mit dem Widerstandswert der Referenzmessung abgeglichen. Aus dem Unterschied wird für jeden Sensorpixel ein individueller Korrekturfaktor berechnet. Die Umrechnung der Messwerte in die Temperatur erfolgt daraufhin mit der Kalibrierfunktion und dem Korrekturfaktor.

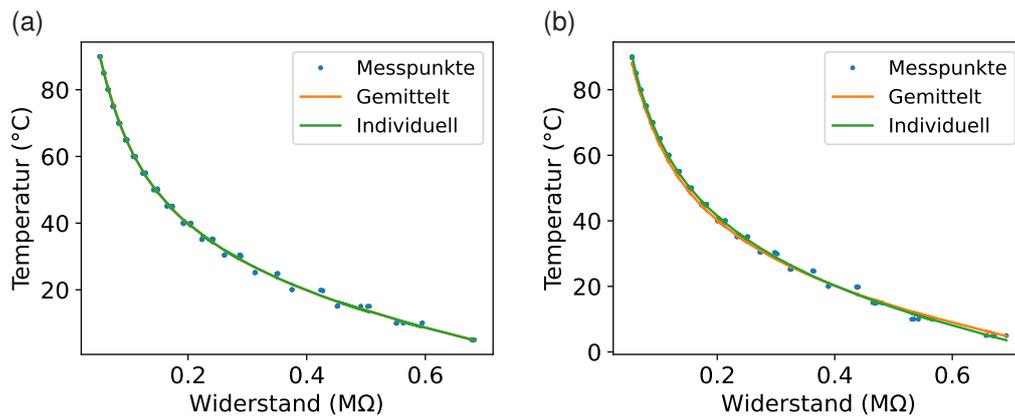
nach einer Wartezeit von 10 s die Messung getriggert. Es kann eine Temperatur zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $95^{\circ}\text{C}$  eingestellt werden. Dadurch kann die benötigte Messdauer zum Abfahren eines Temperaturprofils erheblich verkürzt werden, während die Aufheiz- und Abkühlvorgang für die Datenerfassung genutzt werden. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Methoden lassen sich auch Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur anfahren.

Für die automatische Messung werden die gewünschten Temperaturschritte vorab im Skript definiert. Für eine Messung wird zunächst vom Steuerungscomputer die neue Zieltemperatur an den Temperaturmessplatz übermittelt. Nach Erreichen der Temperatur und dem Ablauf der Wartezeit, wird die Messung angestoßen. Das Auslesen des gesamten Temperatursensor-Arrays erfolgt bei einer konstanten Temperatur. Nach dem Abschluss der Messung beginnt ein neuer Messzyklus. Um die Statistik zu verbessern, wird in der Regel derselbe Messzyklus mehrfach ausgeführt.

Diese Messmethode wird nur im Zusammenhang mit der Ansteuereinheit und der SMU verwendet. Bei der angepassten Ausleseelektronik kommt es aufgrund der Einkopplung der Netzfrequenz über die Peltelemente ebenfalls zu einer starken Beeinträchtigung. Auch die Implementierung eines Softwarefilters, eliminiert dieses Problem nicht vollständig. Von einer Verwendung der angepassten Ausleseelektronik wird deshalb abgesehen.

## 5.2.2 Gemittelte Kalibrierung

Bei der gemittelten Kalibrierung wird eine Rekalibrierung des Sensors im Vergleich zur individuellen Kalibrierung erheblich vereinfacht. Zwar weisen die Sensorarrays Schwankungen bei der Herstellung auf, die sich durch unterschiedliche absolute Widerstandswerte äußern, doch abgesehen von diesem Offset, folgt die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes trotzdem einem gemeinsamen Zusammenhang. Diese Gemeinsamkeit wird bei der gemittelten Kalibrierung ausgenutzt und dem individuelle Verhalten jedes Sensorpixels lediglich durch einen Korrekturfaktor entsprochen. Da dieser Korrekturfaktor einfach zu ermitteln ist, wird die Rekalibrierung dadurch erheblich beschleunigt, während die Genauigkeit nur geringfügig beeinträchtigt wird.



**Abbildung 5.8:** In den Bildern (a) & (b) sind die Kalibrierungen für zwei Sensorpixel dargestellt. In den Schaubildern ist die individuelle Kalibrierung (gemäß Kapitel 5.2.1) und die gemittelte Kalibrierung (gemäß Kapitel 5.2.2) gegenübergestellt. In Bild (a) beträgt die relative Abweichung über den gesamten Verlauf lediglich 0,21 % und die maximale Temperaturabweichung  $\pm 0,40$  °C. Bild (b) dient als „Worst-Case-Szenario“, wobei die relative Abweichung 5,61 % und eine maximale Temperaturabweichung von  $\pm 2,15$  °C erreicht wird. Somit steht einer erheblichen Zeitersparnis nur eine geringe Beeinträchtigung der Messung gegenüber.

Der Vorgang zur Bestimmung der gemittelten Kalibrierung ist in Abbildung 5.7 schematisch dargestellt. Zur Berechnung der gemittelten Kalibrierfunktion müssen einmalig die individuellen Kalibrierfunktionen aller Sensorpixel ermittelt werden, was die Messung eines vollständigen Temperaturzyklus voraussetzt. Zur Bestimmung des Mittelwertes werden aus den individuellen Kalibrierfunktionen zu vorgegebenen Temperaturwerten die dazugehörigen Widerstandswerte berechnet. Für jeden Temperaturwert wird aus den Widerstandswerten ein einziger gemittelter Widerstandswert ermittelt. Aus der gewonnenen Werteverteilung wird mithilfe einer Regressionsanalyse (Polynom vierten Grades) eine Kalibrierfunktion berechnet, die als gemittelte Kalibrierfunktion bezeichnet wird.

Die Anpassung der gemittelten Kalibrierung auf das individuelle Verhalten geschieht im zweiten Schritt durch den Abgleich der Werte mit einer Referenzmessung. Dazu wird eine einzige Messung bei einer beliebigen Temperatur vorgenommen. Aus der gemittelten Kalibrierfunktion wird der Widerstandswert zu dieser Referenztemperatur berechnet und mit dem gemessenen Wert jedes Sensorpixels abgeglichen. Der Quotient aus den beiden Werten ergibt den Korrekturfaktor für das betrachtete Sensorpixel. Die Kalibrierung besteht somit aus der gemittelten Kalibrierfunktion und einem individuellen Korrekturfaktoren für jedes Temperatursensor-Array.

Für eine Neukalibrierung muss lediglich eine neue Referenzmessung durchgeführt und die Korrekturfaktoren aktualisiert werden. Bei ausreichend kleinen Herstellungsvariationen zwischen verschiedenen Temperatursensor-Arrays kann die gemittelte Kalibrierfunktion außerdem sensorübergreifend eingesetzt werden. Für die Berechnung der Temperatur wird der Messwert mit der gemittelten Kalibrierfunktion umgerechnet und im Anschluss mit dem Korrekturfaktor gewichtet.

Um ein Fazit zwischen der individuellen und gemittelten Kalibrierung ziehen zu können, wird ein bereits vorhandener individueller Kalibrierdatensatz verwendet und daraus die gemittelte Kalibrierfunktion berechnet. Im Anschluss wird bei einer Temperatur der Korrekturfaktor für die Sensorpixel berechnet. In Abbildung 5.8 ist die individuelle und gemittelte Kalibrierungen zweier unterschiedlicher Sensorpixel gegenübergestellt. In Abbildung 5.8 (a) zeigt sich nahezu keine Abweichung zwischen beiden Verfahren. Die relative Abweichung über den gesamten Kurvenverlauf liegt bei 0,21 % und der maximale Fehler beträgt  $\pm 0,40$  °C. Als Gegenbeispiel ist in Abbildung 5.8 (b) die Kalibrierung für ein Sensorpixel mit einer schlechten Übereinstimmung dargestellt. Die relative Abweichung steigt auf 5,61 % und der absolute Fehler vergrößert sich auf  $\pm 2,15$  °C. Selbst in diesem Fall ist die erreichte Messgenauigkeit für die meisten Anwendungen ausreichend. Das nicht lineare Verhalten des Sensors wird dadurch trotzdem effektiv kompensiert.

Muss bei Experimenten das Sensorarray umpositioniert werden, kann es zu einer Änderung des Kontaktwiderstandes in Stecker kommen. Eine Rekalibrierung des Sensors lässt sich mit der gemittelten Kalibrierung daher schnell umsetzen. Bei Experimenten ohne externe Beheizung, ist die gemittelte Kalibrierung die einzige Möglichkeit eine Kalibrierung zu bewerkstelligen. Im Zusammenhang mit der angepassten Ausleseelektronik werden mit der gemittelten Kalibrierung stellenweise bessere Ergebnisse erzielt, wenn die Messung Störungen unterworfen ist. Meist liegt eine Störung nur in einem Temperaturteilbereich vor, sodass jedoch die Kalibrierfunktion über den gesamten Temperaturbereich negativ beeinträchtigt wird. Durch den Ausschluss von offensichtlich fehlerhaften individuellen Kalibrierfunktionen wird eine bereinigte gemittelte Kalibrierfunktion bestimmt. Zuvor stark beeinträchtigte Sensorpixel mit gestörten Kalibrierfunktionen, liefern im Anschluss zumindest in Temperaturteilbereichen konsistente Messwerte. Im Sensorverbund werden daher homogenere Werte über das gesamte Temperatursensor-Array erzielt und die Bildgebung verbessert.

### 5.3 Zusammenfassung

Für die Verwendung des gedruckten Temperatursensor-Arrays wird eine passende Ausleseelektronik benötigt. Dazu werden zwei verschiedene Ausleseelektroniken mit unterschiedlichem Funktionsumfang entwickelt. Bei der Untersuchung verschiedener Thermistormaterialien und Sensorvarianten ist ein großer Messbereich erforderlich. Deshalb wird zur Messung des Widerstandes eine Kombination aus einer Ansteuerplatine zum Auswählen der Sensorpixel und zur Werterfassung eine SMU genutzt. Die SMU ermöglicht eine präzise Messung von Widerständen zwischen  $0\ \Omega$  und  $> 200\ M\Omega$  mit einer Abweichung im Promillebereich. Zur Steigerung der Auslesegeschwindigkeit auf etwa 10 Hz wird eine angepasste Ausleseelektronik auf Basis der *Zero-Potential-Scanning*-Methode entwickelt. Dadurch lassen sich parasitäre Ströme im Temperatursensor-Array und eingekoppelte Störeinflüsse unterdrücken.

Zur Bestimmung der Temperatur mit dem gedruckten Temperatursensor-Array muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Dazu wird unter kontrollierten Bedingungen ein Temperaturprofil abgefahren und der Widerstand der Sensorpixel erfasst. Zur Durchführung stehen manuelle und automatische Verfahren zur Auswahl. Aus den erhobenen Daten werden bei der individuellen Kalibrierung für jedes Sensorpixel eigenständige Kalibrierfunktionen berechnet. Damit kann ein Messfehler von  $< 1\ ^\circ\text{C}$  realisiert werden. Allerdings ist der individuelle Kalibriervorgang sehr aufwendig und zeitintensiv. Die Ähnlichkeit im Temperaturverhalten der einzelnen Sensorpixel erlaubt auf Grundlage der individuellen Kalibrierung die Berechnung einer einzigen gemittelten Kalibrierfunktion. Durch die vorab bestimmten Korrekturfaktoren wird diese Funktion an das spezielle Verhalten jedes Pixels angepasst. Eine Rekalibrierung wird dadurch erheblich beschleunigt und die Kalibrierung in Systemen ohne externe Temperaturkontrolle überhaupt erst möglich. Trotz der Vereinfachungen erzielt die gemittelte Kalibrierung im Vergleich zur individuellen Kalibrierung eine nur geringfügig schlechtere Messgenauigkeit.



## 6 Vollständig gedruckte Temperatursensor-Arrays

*In diesem Kapitel wird die Entwicklung von lateral hochaufgelösten und flexiblen Temperatursensor-Arrays beschrieben, die im Druckverfahren hergestellt werden. Die am Lichttechnisches Institut (LTI) verfügbaren Drucker erlauben eine kostengünstige und flexible Herstellung mit gleichzeitig hohem Auflösungsvermögen und hoher Präzision. In Kapitel 6.1 werden zunächst die Entwicklungsstufen für das Sensorkonzept und die Materialauswahl bis hin zur finalen Version erläutert. Zur Untersuchung und Kalibrierung wird ein spezieller Messplatz entwickelt, der das Auslesen des Temperatursensor-Arrays und das automatische Abfahren von Temperaturprofilen erlaubt. Alle Details sind in Kapitel 6.2 zusammengefasst. Erste Messergebnisse über das Verhalten und die Kalibrierung des Sensors werden in Kapitel 6.3 diskutiert.*

*Die Möglichkeiten des Sensorkonzepts werden anschließend in Kapitel 6.4 in einer Anwendung demonstriert. Dabei wird das Laserprofil durch Auswertung des erzeugten Temperaturprofils analysiert. Zum Vergleich werden die Erkenntnisse in einer Simulation verifiziert.*

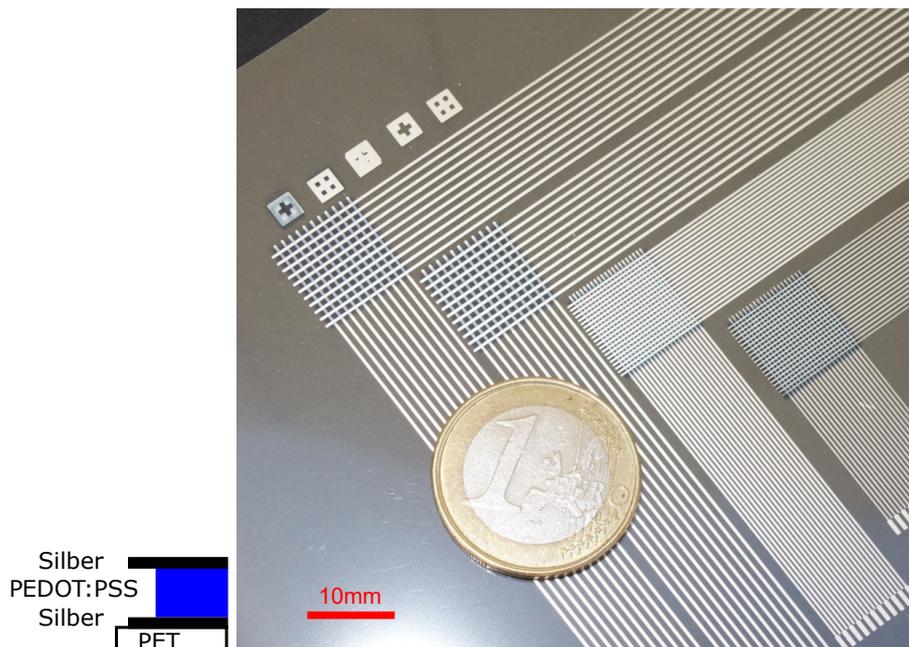
*Ein Großteil der hier präsentierten Ergebnisse wurden in [4, 5] veröffentlicht.*

### 6.1 Sensorstruktur und Herstellung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Entwicklungsphasen des Temperatursensor-Arrays. Auf Basis einer Passiv-Matrix-Struktur werden verschiedene Sensorkonzepte und Materialien untersucht. Diese Art der Sensorentwicklung wird in Kapitel 6.1.1 vorgestellt. Mit der Festlegung auf eine geeignete Materialpaarung wird in Kapitel 6.1.2 die Entwicklung der Herstellungsprozesse beschrieben.

#### 6.1.1 Sensorprototypen

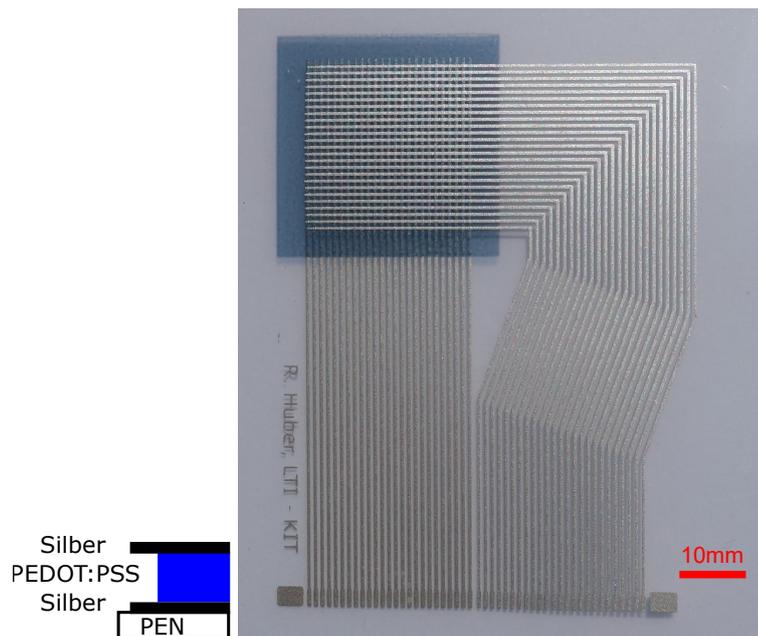
Im Zuge der Entwicklung des Temperatursensor-Arrays wurden zunächst zwei Prototypen hergestellt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden ohne dabei detailliert auf den Herstellungsprozess einzugehen. Für die Herstellung von Sensorarrays mit einer hohen Sensordichte durch Druckverfahren sollte die Sensorstruktur möglichst einfach gehalten werden. Dafür bietet sich im Speziellen eine Passiv-Matrix-Struktur an, wie sie in Kapitel 2.1.4 beschrieben wird. Der Aufbau besteht im einfachsten Fall lediglich aus einer unteren Elektrode, einer Thermistor-Zwischenschicht und einer oberen Elektrode. Strukturell werden die beiden Elektrodenlagen im Sensorbereich als Gitter ausgeführt, wobei Elektroden der unteren und oberen Lage im rechten Winkel zueinander angeordnet werden. Die Thermistorschicht wird als vollflächiges Quadrat zwischen den beiden Elektroden aufgebracht. Die Herstellung der Sensorstruktur erfolgt schichtweise, beginnenden mit der unteren Elektrode, gefolgt von der Themistorschicht und der oberen Elektrode als Abschluss. Die Kreuzungspunkte der Elektroden mit der dazwischenliegenden Thermistorlage entsprechen einem Sensorpixel. Zur Kontaktierung werden die Elektroden auf jeweils einer Seite verlängert. Die Struktur lässt sich gut im Siebdruckverfahren (siehe Kapitel 3.1.1) herstellen. Die Druckeigenschaften werden durch die Wahl der Gewebestruktur an die Tinten/Pasten sowie an das Drucklayout angepasst. Das Drucklayout enthält verschiedene Varianten des Temperatursensor-Arrays, um die Grenzen der Mikrostrukturierung im Zusammenhang



**Abbildung 6.1:** Darstellung von Temperatursensor-Arrays zur Voruntersuchung von Sensorkonzept, Herstellungsverfahren und Materialauswahl. Im Siebdruckverfahren wird eine Kombination aus verschiedenen Temperatursensor-Arrays gedruckt. Als Thermistormaterial kommt PEDOT:PSS zum Einsatz. Die Sensorfläche beträgt etwa  $1\text{ cm}^2$  und beinhaltet 121 oder 441 Sensorpixel. Die Abbildung wurde von [5] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

mit den Tinten und der Siebdruckmaschine zu untersuchen. Dazu werden die Breite der Elektrodenleiterbahnen sowie die Elektrodenabstände variiert, um verschiedene Sensordichten zu realisieren. Das Layout enthält Temperatursensor-Arrays mit 121 und 441 Sensorpixeln auf einer Fläche von  $1\text{ cm}^2$ . Zur Herstellung wird eine  $100\text{ }\mu\text{m}$  dicke PET Folie als Substrat verwendet. Die Elektroden werden aus kommerziell erhältlicher Silberpaste (Loctite ECI 1010 E & C, Henkel AG & Co. KGaA) gedruckt (siehe Abschnitt 4.2.2.1). Die Thermistorschicht wird aus 5 Lagen PEDOT:PSS (Clevios S V4, Heraeus Holding GmbH) aufgebaut (siehe Abschnitt 4.2.2.2). In wissenschaftlichen Publikationen zum Thema gedruckter Temperatursensorik wird PEDOT:PSS häufig als Thermistormaterial eingesetzt [67, 54, 29] und lässt sich gut im Siebdruckverfahren verarbeiten. Daher wird zunächst dieses Material in dieser Arbeit untersucht. Alle Drucklagen werden nacheinander gedruckt, wobei nach jeder Lage ein Trocknungsschritt folgt.

Abbildung 6.1 zeigt die vollständig siebgedruckten Temperatursensor-Arrays. Zur Kontaktierung ist die untere Silberelektrode nach unten hin verlängert, während die obere Silberelektrode nach rechts verläuft. Zwischen den Silberelektroden lässt sich die PEDOT:PSS-Schicht in einem leichten Blau erkennen. Die feinsten Elektrodenbahnen besitzen eine Breite von  $100\text{ }\mu\text{m}$ , lassen sich aber durch Siebdruck nicht zuverlässig herstellen und weisen unregelmäßige Unterbrechungen auf. Eine Kontaktierung der dahinterliegenden Sensorpixel ist dann nicht möglich. Das verwendete PEDOT:PSS zeigt nur einen sehr geringen Widerstand und besitzt eine ähnliche Leitfähigkeit wie die Silberleiterbahnen. Da sowohl das Silber, wie auch PEDOT:PSS einen temperaturabhängigen Widerstand aufweisen, kommt es zu einer Überlagerung der Effekte und erschwert die Messung der Temperatur eines Pixels. Außerdem reagiert PEDOT:PSS anfällig auf Schwankungen der Luftfeuchtigkeit. Dadurch sind reproduzierbare Ergebnisse ohne zusätzliche Kontrolle der Umgebung oder Verkapselung des Sensors unmöglich. Die absolute Widerstandsänderung unter Temperatureinfluss fällt bei PEDOT:PSS ebenfalls klein aus, was die Messung erschwert. Je nach Sensorpixel werden bei einer Temperaturänderung um  $60\text{ K}$  lediglich ein Abfall des Widerstands um  $0,5\text{ }\Omega$  registriert. Die Kontaktierung des Sensorarrays gestaltet sich ohne geeigneten Stecker ebenfalls schwierig und führt zu Kontaktabbrüchen bei leichten Erschütterungen. Trotz der Störanfälligkeit können die Sensorpixel dieses

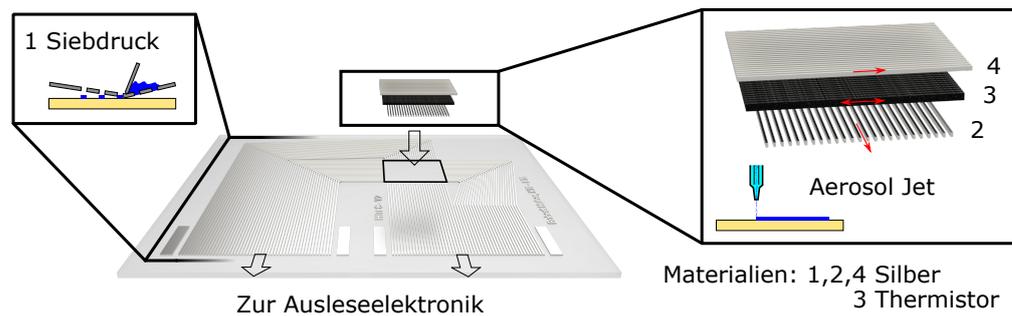


**Abbildung 6.2:** Um den Kontaktproblemen vorzubeugen, ist in dem neuen Sensorlayout eine dediziert Steckverbindung zur Kontaktierung vorgesehen. Gleichzeitig steigt die Anzahl an Sensorpixel auf 625. Um den Widerstand des Temperatursensor-Arrays zu erhöhen, werden zwei alternative PEDOT:PSS-Derivate verwendet. Die Gitterstruktur der Passivmatrix, sowie die als bläuliches Quadrat erkennbare Thermistorlage, sind gut sichtbar.

Temperatursensor-Arrays kalibriert und eine räumliche Temperaturverteilung eines heißen Drahtes erfasst werden.

Die genannten Probleme dieser ersten Version eines Temperatursensor-Arrays sollen in einer überarbeiteten Version behoben werden. Aufgrund der Ähnlichkeit der Sensorfolie zu einem Flachbandkabel, wird ein speziell dafür entwickelter FPC-Stecker verwendet. Dadurch soll die Kontaktierung des Sensors mit der Ausleseelektronik stabiler und vereinfacht werden. Das Sensorlayout wird daher an das Steckerlayout angepasst. In diesem Zuge wird die Anzahl der Elektrodenbahnen auf 25x25 erhöht und das Sensorarray entsprechend auf 625 Sensorpixel erweitert. Die Leiterbahnbreite beträgt 200  $\mu\text{m}$  mit einem Periodenabstand von 500  $\mu\text{m}$  zueinander. Dies erhöht außerdem die Ausbeute und Qualität der gedruckten Strukturen beim Siebdruck. Das zuvor verwendete PEDOT:PSS wird durch zwei neue PEDOT:PSS Derivate (Clevios HTL Solar & Clevios P VP Al 4083, Heraeus Holding GmbH) ersetzt. Beide Materialien weisen laut Datenblatt einen um etwa den Faktor 1000 höheren Leitungswiderstand auf. Die Probleme, die durch einen niedrigen Sensorwiderstand auftreten, sollen damit behoben werden. Die übrigen Herstellungsparameter sowie die verwendete Silberpaste werden beibehalten.

In Abbildung 6.2 ist die zweite Version des Temperatursensor-Arrays dargestellt. Die Kontaktierung mit dem neuen Steckerkonzept erweist sich als erheblich robuster, gleichzeitig werden die Leiterbahnen eng zusammengeführt und das Sensorarray dadurch kompakter. Die Sensorfläche wächst minimal auf 12 mm x 12 mm, während sich die Sensorpixelanzahl auf 625 erhöht. Die vollflächige Thermistorschicht ist größer ausgelegt und erleichtert die Positionierung der Elektroden zueinander. Durch die neuen PEDOT:PSS-Derivate steigt der Widerstand und die Empfindlichkeit gegenüber Temperaturänderungen an. Allerdings erweist sich die Verbesserung als nicht ausreichend um die Leitungswiderstände der Elektroden zu vernachlässigen. Außerdem zeigen auch diese PEDOT:PSS-Varianten eine starke Empfindlichkeit gegenüber der Luftfeuchtigkeit durch Drift und/oder sprunghafte Änderungen der Messwerte. Mit einer Verkapselung hätte dieser Problematik entgegengewirkt werden können. Ein zusätzliche Schutzschicht auf dem Sensor wirkt jedoch als thermische Isolierung und führt zu trägem Ansprechverhalten bzw. einer Verfälschung der Temperaturwerte.



**Abbildung 6.3:** In der Weiterentwicklung des Temperatursensor-Arrays wird in einem hybriden Druckverfahren Siebdruck und Aerosol-Jet kombiniert. Das Sensordesign wird erweitert, um eine Vierleitermessung zu ermöglichen. Im ersten Schritt werden die Zuleitungen (1) mithilfe von Siebdruck hergestellt. Mit dem Aerosol-Jet-Druckverfahren wird das eigentliche Temperatursensor-Array in einem dreistufigen Prozess in die dafür vorgesehene Öffnung gedruckt. Diese wird von unten nach oben aufgebaut: (2)-Untere Elektrode, (3)-Thermistorschicht, (4)-Oberer Elektrode. Über die Zuleitungsenden an der Vorderseite des Sensorarrays wird die Verbindung zur Ausleselektronik hergestellt. *Die Abbildung wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.*

Aus diesen Gründen wird eine weitere Entwicklung von Temperatursensor-Arrays auf Basis von PEDOT:PSS ausgeschlossen und diese Version des Temperatursensor-Arrays nicht weitergehend untersucht.

### 6.1.2 Hybrides Temperatursensor-Array

Diese Version stellt die optimierte und finale Version des folienbasierten Temperatursensor-Arrays dar. Die verbliebenen Probleme sind auf das zuvor verwendete Thermistormaterial PEDOT:PSS zurückzuführen, weshalb das Material im Zuge dieser Version ersetzt wird. Ein neues Thermistormaterial sollte die folgenden Eigenschaften aufweisen: 1) Der elektrische Widerstand des Thermistormaterials sollte mehrere Größenordnungen über dem Leitungswiderstand der Zuleitungen/Elektroden liegen, um diesen vernachlässigen zu können. 2) Eine größere Temperaturabhängigkeit erlaubt präzisere Messungen und reduziert die Anforderungen an die Ausleselektronik. 3) Eine hohe Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen, um eine Verkapselung des Sensors zu vermeiden.

Durch die Einführung eines hybriden Druckprozesses, bestehend aus Siebdruck und Aerosol-Jet-Druck, stehen mehr Materialien zur Auswahl und es wird mehr Kontrolle über die Druckparameter erlangt. Für den Aerosol-Jet wird das Drucklayout angepasst, da der Druck nun zeilenweise erfolgt. Dabei werden das Sensorlayout erweitert und die Zuleitungen verdoppelt, um eine Vierleitermessung zu ermöglichen. Bei diesem Messprinzip erfolgt der Stromfluss zur Messung und die Spannungsmessung über getrennte Leiterpaare. Die Spannung wird hochohmig über ein Leiterpaar abgegriffen. Da hierbei lediglich ein infinitesimaler Stromfluss im Messleiter auftritt, kann der Leitungswiderstand bei der Spannungsmessung vernachlässigt werden. Wenn der zu messende Widerstand und die Zuleitung in etwa gleich groß sind, bietet dieses Verfahren somit Vorteile. Allerdings wird schließlich LOCTITE EDAG PM 404 E&C, Henkel AG & Co. KGaA [128] als hochresistives Thermistormaterial verwendet, das wiederum eine Vierleitermessung obsolet macht.

Für die Herstellung werden sowohl 100 µm dicke PEN-Folien oder bis zu 25 µm dünne Polyimid-Folien (Kapton) als Substrat verwendet. Dünnere Folien weisen eine geringere Wärmekapazität auf und erzeugen je nach Anwendungsfall eine ungewollte Isolationswirkung. Bei höheren Temperaturen entstehen in der PEN-Folie teilweise Wellen, die die Benutzung des Sensors beeinträchtigen. Polyimid weist diesen Nachteil nicht auf. Mehr Details zu den verwendeten Substraten finden sich in Kapitel 4.2.1. In Abbildung 6.3 sind der Aufbau des Temperatursensor-Arrays und die dafür genutzten Herstellungsverfahren dargestellt. Im Gegensatz zu den vorausgegangenen Versionen werden die Zuleitungen zum Sensor und die Elektroden des Sensorarrays getrennt hergestellt. Im ersten Schritt werden die Zuleitungen mithilfe von Siebdruck auf

das Substrat aufgedruckt. Diese weisen eine Breite von 300  $\mu\text{m}$  pro Leiterbahn und einem Abstand von 200  $\mu\text{m}$  zueinander auf. Als Material wird die bereits zuvor eingesetzte Silberpaste (Loctite ECI 1010 E & C, Henkel AG & Co. KGaA, [124], siehe Kapitel 4.2.2) verwendet. Die hohe Haftung und Kratzfestigkeit auf dem Substrat ist für die Kontaktierung mit dem FPC-Stecker besonders geeignet. Der Druck wird auf einer halbautomatischen Siebdruckmaschine (RokuPrint SD05, RokuPrint GmbH, siehe auch Kapitel 3.1.1) durchgeführt und ein Drucksieb mit 165 Fäden  $\text{cm}^{-1}$  und einer Fadendicke von 27  $\mu\text{m}$  verwendet. Zur Trocknung werden die Proben auf einer Heizplatte bei 120  $^{\circ}\text{C}$  für 15 min gelagert. Die gedruckten Zuleitungen besitzen eine Schichtdicke von  $<3 \mu\text{m}$  und weisen über eine Länge von 8 cm lediglich einen Widerstand  $< 15 \Omega$  auf.

Das eigentlich Temperatursensor-Array wird mit dem Aerosol-Jet gedruckt. Eine detaillierte Beschreibung des Druckers ist in Kapitel 3.1.2 zu finden. Wie Abbildung 6.3 zu entnehmen ist, setzt sich der Sensor aus drei Lagen (Schritt 2-4) zusammen, die nacheinander aufgebracht werden: untere Elektrode - Thermistorlage - obere Elektrode. Zur Kontaktierung überlappen die Elektroden an den Enden jeweils mit den Zuleitungen. Durch den Wechsel auf den Aerosol-Jet-Drucker kann die Strukturgröße der Elektroden von 300  $\mu\text{m}$  auf 60 – 80  $\mu\text{m}$  verkleinert werden. Diese Maßnahme verbessert die Messeigenschaften des Temperatursensor-Arrays, da die Wärmekapazität und -leitung im System reduziert wird. Für den Aerosol-Jet wird zu einer nanopartikelbasierten Silbertinte (JS-A221AE, NovaCentrix, [125], siehe Kapitel 4.2.2) gewechselt. Für den Druck werden 3 ml Tinte in den Ultraschall-Tintentank gefüllt und auf etwa 27  $^{\circ}\text{C}$  temperiert. Zur Erzeugung des Aerosols wird der Ultraschall erzeugende Piezoelement mit 400 – 420 mA betrieben. Um die Elektrodenstrukturgröße von 60  $\mu\text{m}$  zu erreichen, wird eine 150  $\mu\text{m}$  große Druckdüse verwendet. Diese wird mit einem Materialgasfluss von 22  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$  und einem Hüllgasfluss von 50  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$  beaufschlagt. Als Prozessgas wird Stickstoff verwendet. Ein mit deionisiertem Wasser gefüllter Gasvorbefeuchtungstank (*Add-back*) erhöht bei 28  $^{\circ}\text{C}$  den Feuchtigkeitsgehalt des Gasstroms. Der Druckprozess wird bei einer Geschwindigkeit von 10  $\text{mm s}^{-1}$  durchgeführt und die Proben im Anschluss sofort photonisch gesintert (Pulseforge 1200, Novacentrix, siehe Kapitel 3.3.1). Der Sintervorgang besteht aus 75 Einzelblitzen mit einer Wiederholungsrate von 2 Hz. Die Blitzlampe wurde mit einer Lampenspannung von 420 V betrieben, wobei jeder Blitz eine Länge von 200  $\mu\text{s}$  aufweist. Die Sinterparameter sind dahingehend optimiert, eine möglichst hohe Leitfähigkeit der Silberschicht zu erreichen, aber gleichzeitig Rissbildung in der Schicht zu vermeiden. Aufgrund leichter Parameterschwankungen beim Druck beträgt die Elektrodenbreite 55 – 70  $\mu\text{m}$  mit einer Schichthöhe von  $< 4 \mu\text{m}$ .

Als nächstes wird die Thermistorschicht lotrecht auf die untere Elektrode gedruckt, welche in Abbildung 6.3 - 3 als schwarze Schicht dargestellt ist. Die Schichtdicke dieser Lage bestimmt maßgeblich den erzielten Widerstand des Temperatursensor-Arrays. Außerdem führen minimale Schwankung der Druckparameter zu Variationen der Widerstandswerte der einzelnen Sensorpixel zueinander. Die im folgenden aufgelisteten Maßnahmen verbessern die Homogenität des Sensorarrays:

- 1) Um dem zeilenweisen Druckvorgang des Aerosol-Jets besser zu entsprechen, wird das Thermistormaterial in getrennten Bahnen aufgetragen. Eine Überlappung oder eine zu kompakte Anordnung der Bahnen führt zu Wellenbildung und inhomogenen Schichtdicken. Beim Aneinanderreihen der Bahnen im Druckvorgang verbleibt die Tinte im flüssigen Zustand und wird durch den Düsenstrahl (*Jet*) beim Drucken der benachbarten Linie zur Seite „weggeblasen“. Etwas Abstand zwischen den Bahnen verhindert diesen Effekt und erlaubt ein präzises Einstellen der Schichtdicke.
- 2) Unter Berücksichtigung der vorherigen Maßnahme, werden die Thermistorlinien so breit wie möglich ohne Überlappung gedruckt. Um den Scheitelpunkt einer breiten Bahn herum entsteht ein Bereich mit einer gleichmäßig dicken Schicht. Der breite Bereich bietet außerdem mehr Toleranz für die Ausrichtung der aufgedruckten oberen Elektrode. Der damit einhergehende höhere Materialgasfluss sorgt im Aerosol-Jet für geringere Druckschwankungen, was in einem homogenerem Ergebnis resultiert.
- 3) Die Druckorientierung der Thermistorlage erfolgt explizit parallel zu den oberen Elektroden. Dadurch

können die oberen Elektroden auf eine durchgängige Schicht gedruckt werden. Die Nachbehandlung der Silberschichten mit photonischen Blitzintern bewirkt Materialstress, der zu Rissbildung führen kann. Durch eine Parameteroptimierung, lässt sich bei homogenen Schichten eine Schädigung allerdings verhindern.

4) Bei der Verwendung des Druckventils (*Shutter*) zur Unterbrechung des Materialgasflusses kommt es zu leichten Druckschwankungen im pneumatischen System des Druckers. Dies beeinflusst die deponierte Materialmenge unmittelbar bei der Betätigung des Ventils und führt zu einer Variation der Linienbreite und -dicke. Dieser Effekt wird durch die Verwendung einer Maske auf der Probe verhindert und Linienstruktur in einer zusammenhängenden Mäanderstruktur gedruckt. Dadurch kann auf die Verwendung des Druckventils bei der Herstellung der Thermistorschicht verzichtet werden. Durch Abheben der Maske werden die Randbereiche entfernt und es verbleibt lediglich die gewünschte Linienstruktur in der Mitte.

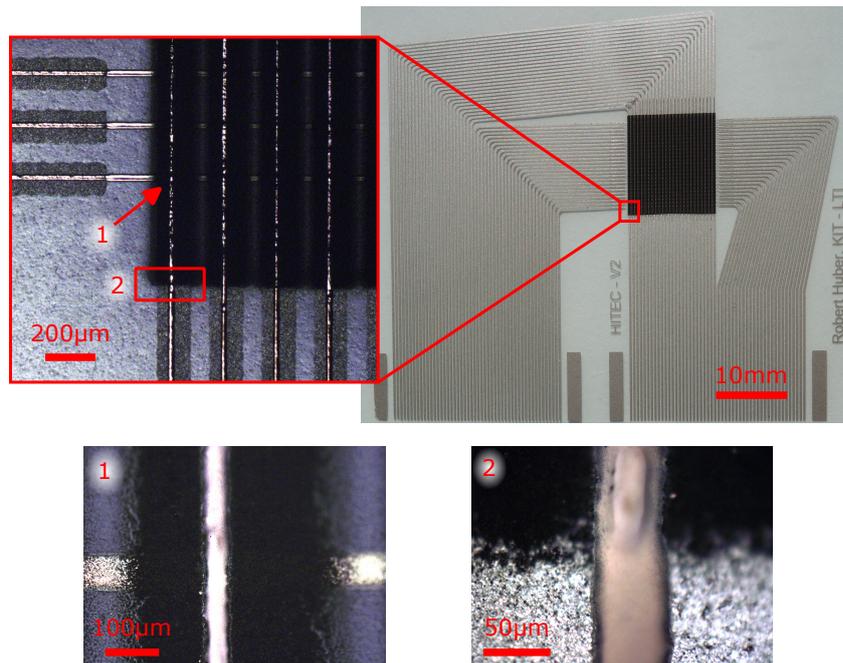
5) Die Thermistorschicht wird durch mehrere hintereinander aufgedruckte Schichten aufgebaut, anstatt diese in einem Vorgang herzustellen. Druckvariation fallen dadurch weniger ins Gewicht.

6) Die Thermistorschicht wird im Ofen für 6 h bei 120 °C getrocknet. Dabei wird Materialstress abgebaut und die Widerstandswerte der Sensorpixel gleichen sich an.

Die vorgestellten Maßnahmen erhöhen die Qualität und Ausbeute bei der Herstellung der Temperatursensor-Arrays deutlich. Homogenere Widerstandswerte der Sensorpixel vereinfachen außerdem die Auslegung der Ausleseelektronik.

Die Thermistorlage wird aus einer dielektrischen, hochresistiven Siebdruckpaste hergestellt, erfüllt die zuvor aufgestellten Anforderungen und weist eine hohe Temperaturabhängigkeit auf. Die Druckpaste (LOCTITE EDAG PM 404 E&C, Henkel AG & Co. KGaA [128]) besteht aus einem Thermoplast mit Kohlenstoffanteil und wird kommerziell als Isolatormaterial vertrieben. Eine Beschreibung des Materials ist in Kapitel 4.2.2.3 zu finden. Um die Thermistorschichtdicke präzise einstellen zu können, wird diese Siebdrucktinte auf dem Aerosol-Jet verdruckt. Dazu muss die Siebdruckpaste auf den Druckprozess angepasst werden und wird mit TGME verdünnt um die Viskosität auf ein akzeptables Maß zu senken. Als Mischverhältnis werden 2 g der Siebdruckpaste mit 1 ml TGME verdünnt und anschließend auf einem Vortexer vermischt. Die Viskosität wird so von  $\eta = 10000 - 20000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  (cP) [128] auf etwa  $\eta = 2100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  (cP) bei einer Scherrate von  $\gamma = 1.5 \text{ s}^{-1}$  gesenkt (Haake Mars Modular Advanced Rheometer System, Thermo Fisher Scientific). Die hohe Viskosität erfordert allerdings die pneumatische Tintenkartusche zur Erzeugung des Aerosols. Dazu werden 10 ml Tinte in die Kartusche gefüllt und auf 28 °C temperiert. Um ein Absetzen und Agglomerieren der Tinte zu verhindern, wird der verbaute Magnetrührer bei 5 V betrieben. Der Gasvorbefeuchtungstank (*Add-back*) wird mit 2-Propanol gefüllt und auf 25 °C temperiert. Dadurch wird der Stickstoffstrom befeuchtet und Lösungsmittelverlust von der Tinte verhindert. Zum Drucken der 450  $\mu\text{m}$  breiten Thermistorlinien wird eine 600  $\mu\text{m}$  Druckerdüse verwendet. Die pneumatische Tintenkartusche sowie der angeschlossene virtuelle Impaktor wird mit  $1200 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$  beaufschlagt. Gleichzeitig wird die Absaugung des virtuellen Impaktors mit einem Vakuum von 0,1 psi (6,9 mbar) betrieben. Zur Fokussierung des Materialstroms in der Druckerdüse wird ein Hüllgasfluss von  $250 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$  verwendet. Die Thermistorlinien werden mit einer Druckgeschwindigkeit von  $10 \text{ mm s}^{-1}$  aufgetragen. Die Thermistorlage wird in Form einer Mäanderstruktur aus 12 Schichten des Thermistormaterials aufgebaut. Nach dem Druck wird die PEN-Maske abgenommen und die Proben für etwa 6 h bei 120 °C im Ofen (UF55plus, Memmert GmbH + Co. KG) auf einem Gitter getrocknet. Die Thermistorbahnen weisen eine Breite von  $< 450 \mu\text{m}$  auf. Somit decken die einzelnen Linien die zur Verfügung stehende Fläche möglichst vollständig ab ohne zu überlappen. Die 12 aufgedruckten Schichten ergeben eine Gesamtdicke der Thermistorlage von 3 – 4  $\mu\text{m}$ . Damit konnte sichergestellt werden, dass eine geschlossene Schicht hergestellt wird, aber gleichzeitig der Widerstand der Sensorpixel in den unteren  $\text{M}\Omega$ -Bereich fällt.

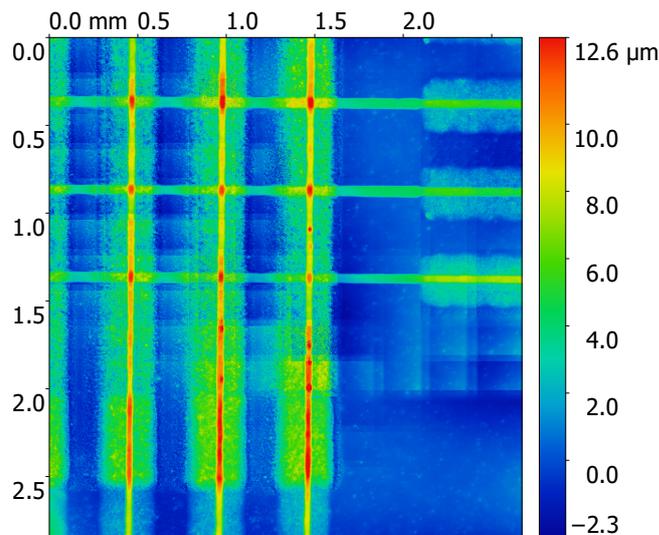
Mit dem Druck der oberen Elektroden wird schließlich das Temperatursensor-Array vervollständigt. Um den Sintervorgang zu verbessern, wird die obere Elektrode parallel auf die darunterliegenden Thermistorbahnen



**Abbildung 6.4:** Bild eines vollendeten Temperatursensor-Arrays, sowie detaillierte Mikroskopaufnahmen einzelner Sektoren. Das Thermistormaterial weist eine matte, leicht poröse, schwarze Oberfläche auf. (1) zeigt einen Sensorpixel, welcher durch den Kreuzungspunkt der unteren und oberen Elektrode definiert wird. In (2) ist die Übergangsfläche von Zuleitung zu Elektrode zu sehen. Die glatte Oberflächentextur der Aerosol-Jet-Silbertinte hebt sich eindeutig von der Siebdrucktinte ab und lässt sich vor allem auf die enthaltene Partikelgröße zurückführen. Die Abbildung wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

gedruckt. Die obere Elektrode ist in Abbildung 6.3 - 4 als oberste Schicht dargestellt. Die Druckparameter für den Aerosol-Jet-Drucker können von der Herstellung der unteren Elektroden übernommen werden. Aufgrund der darunterliegenden Thermistorlage müssen die Sinterparameter beim photonischen Sintern angepasst werden, um Rissbildung und Zerstörung der Silberelektroden zu verhindern. Im Vergleich zu den unteren Elektroden wird die Betriebsspannung der Blitzlampe auf 480 V erhöht und im Gegenzug die Blitzdauer auf 160  $\mu\text{s}$  reduziert. Zum vollständigen Sintern sind 150 Blitzwiederholung mit einer Frequenz von 1 Hz erforderlich. Werden zum Vergleich die Sinterparameter der unteren Elektrode gewählt, kommt es zu massiver Rissbildung bzw. zum vollständigen Abplatzen der Silberbahnen von der Thermistorschicht. Selbst nach der Optimierung der Sinterparameter, erweist sich Sintervorgang der letzten Silberschicht als äußerst empfindlich gegenüber Änderungen am Druckvorgang oder kleinen Anpassungen an den Sinterparametern. Besonders Silberlinienbreite und -schichthöhe haben einen kritischen Einfluss auf den Erfolg des Sintervorgangs. Trotz der Verwendung der gleichen Druckparameter der unteren Elektrode, wird auf dem Thermistormaterial lediglich eine Linienbreite von  $> 45 \mu\text{m}$  bei der oberen Elektrode erzielt. Die individuelle Schichtdicke der Elektrode im Schichtsystem konnte experimentell nicht befriedigend ermittelt werden. Die Gesamtschichtdicke an einem Sensorpixels, bestehend aus unterer Elektrode, Thermistorlage und oberer Elektrode beträgt  $\approx 12,3 \mu\text{m}$ . Unter Berücksichtigung der Schichtdicken der zuvor deponierten Lagen, kann die Schichtdicke der oberen Elektrode auf  $\approx 4 \mu\text{m}$  abgeschätzt werden.

Nach der Fertigstellung des Temperatursensor-Arrays werden die Proben nochmals im Ofen bei 120 °C für 24 h aufbewahrt, was vermutlich einen Abbau von Materialstress im Schichtsystem bewirkt. Bei der Messung eines zuvor unbenutzten Temperatursensor-Arrays wird dadurch ein Driften der Widerstandswerte bei höheren Temperaturen verhindert.



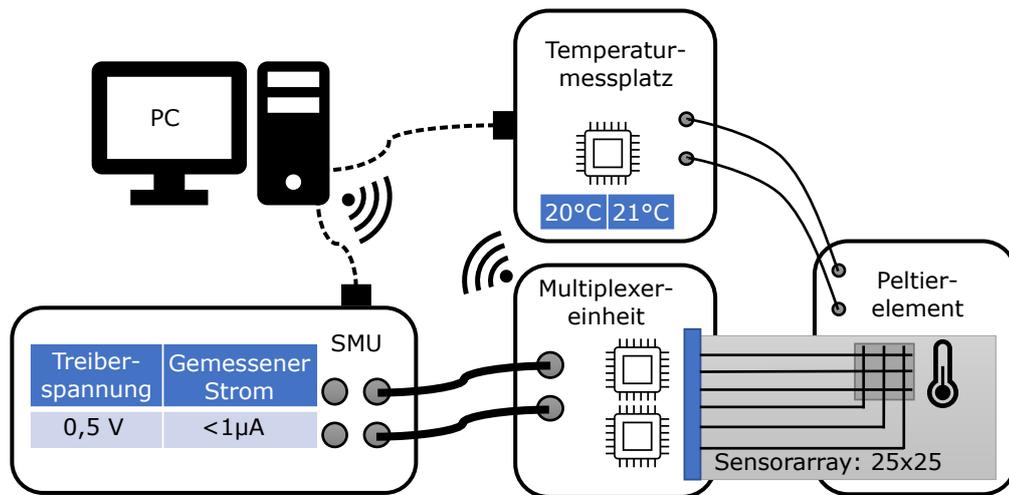
**Abbildung 6.5:** Weißlichtinterferometrische Aufnahme des Temperatursensor-Arrays. Die hierbei ermittelten Schichthöhen verifizieren die Messungen am Profilometer. Die Abbildung wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

Abbildung 6.4 zeigt das vollendete Temperatursensor-Array. Das matt schwarze Erscheinungsbild des Thermistormaterials grenzt den eigentlichen Sensorarraybereich gut sichtbar von den Zuleitungen ab. Um eine Vierleitermessungen zu ermöglichen, sind die Zuleitungen in zwei Anschlussbereiche aufgeteilt. Die Abbildung 6.4 beinhaltet einige Nahaufnahmen der Sensorstruktur. In (1) ist Struktur eines Sensorpixels abgebildet. Die Kreuzungspunkte der unteren und oberen Elektrode definieren die Position der Sensorpixel. Die Elektroden heben sich durch einen silbrigen Glanz von den restlichen Schichten ab. Die Nahaufnahme zeigt, dass die Thermistorschicht aus getrennten Linien besteht ohne zu überlappen. Der Übergangsbereich von Zuleitung und Elektrode ist in (2) sichtbar. Zur Kontaktierung überlappen die Elektroden großzügig mit den Zuleitungen. Die glatte Oberflächenbeschaffenheit der Aerosol-Jet-Silbertinte lässt sich in der Aufnahme gut erkennen, was sich auf die Zusammensetzung aus Nanopartikeln zurückführen lässt. Die Struktur hebt sich deutlich von der Siebdrucktinte ab. Im Übergang führt der Materialübergang sowie der Höhenunterschied, den die oberste Elektrode überwinden muss, beim Sintern zu erhöhtem Materialstress. Dies zeigt sich beispielsweise an dieser Stelle durch Blasenbildung. Aus genau diesem Grund verläuft die Thermistorlage parallel mit der oberen Elektrode, um unnötige Übergänge im Zwischenbereich zu vermeiden. In Kapitel 4.2.2 sind REM-Aufnahmen vom Querschnitt durch den Sensor, sowie eine weitere Beschreibung der Materialien zu finden.

Um einen Gesamteindruck über die Schichthöhenverhältnisse des Temperatursensor-Arrays zu gewinnen, ist in Abbildung 6.5 eine Messung mit dem Weißlichtinterferometer (WLI) dargestellt. Der dreidimensionale Strukturaufbau und die Schichten lassen sich im Höhenprofil gut erkennen. Die ermittelten Schichthöhen stimmen gut mit den Messungen der taktilen Profilometrie überein.

## 6.2 Messplatz zur Untersuchung der Sensorfolien

Das Auslesen und Charakterisieren des gedruckten Temperatursensor-Arrays erfolgt in einer speziell entwickelten Messplatzumgebung. Auf Basis der in Kapitel 5.1.1 vorgestellten Ausleseelektronik, wird die Messplatzumgebung um einen zusätzlichen Temperaturmessplatz zur einfacheren Kalibrierung erweitert. Der Aufbau ist in Abbildung 6.6 schematisch dargestellt. Für die Messung wird das Temperatursensor-Array über die FPC-Stecker der Ansteuereinheit verbunden. Je nach Substratdicke muss die Folie durch Klebeband aufgedoppelt werden, um eine stabile Kontaktierung durch den Stecker zu erreichen.



**Abbildung 6.6:** Dargestellt ist die Messplatzumgebung für das folienbasierte Temperatursensor-Array. Das Temperatursensor-Array ist mit der Ansteuereinheit verbunden, worüber die einzelnen Sensorpixel adressiert werden. Zur Störungsvermeidung erfolgt die Kommunikation mit der Platine über WLAN. Die Messung des Widerstands wird mit einer SMU durchgeführt. Dazu wird eine Spannung von 0,5 V eingeprägt, der resultierende Strom gemessen und daraus der Widerstand berechnet. Zur Kalibrierung und Charakterisierung wird das Temperatursensor-Array in einem Temperaturmessplatz verbaut, welcher digital über Peltierelemente die vorgegebene Temperatur anfährt. Die Steuerung sowie die Erfassung der Messdaten wird über eine *Raspberry Pi* als Steuerungscomputer durchgeführt. Die Abbildung wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

Zur Reduktion von Störeinflüssen wird die Ansteuereinheit über WLAN gesteuert und die Energieversorgung über eine Powerbank realisiert. Die zuvor vorhandene Leitungsschleife wird damit vermieden. Das Messsignal wird von der Ansteuereinheit mit Hilfe eines BNC-Kabels an eine SMU (2450 SourceMeter ®; SMU Instrument, Tektronix, Inc.) weitergeleitet. Für die Messung wird über die SMU eine Spannung von 0,5 V eingeprägt und gleichzeitig der Strom gemessen. Aus dem mathematischen Zusammenhang für den elektrischen Widerstand  $R = UI^{-1}$  wird der Wert des adressierten Sensorpixels berechnet. Die von der SMU ermittelten Messwerte werden per USB vom Steuerungscomputer abgerufen.

Zur Untersuchung und Durchführung der Kalibrierung des Temperatursensor-Arrays ist eine präzise Temperatursteuerung nötig. Der integrierte Temperaturmessplatz kann sowohl heizen als auch kühlen. Dafür wird ein Peltierelement (QC-241-1.0-3.0M, Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH) mit einer PID-Steuerung geregelt und ermöglicht somit das präzise Einregeln der vorgegebenen Temperatur. Zum Abgleich ist ein Referenztemperatursensor im Aufbau eingelassen. Das Temperatursensor-Array wird für die Messung zwischen einer dicken Styroporschicht als Isolation und dem Peltierelement, welches in einer Kupferplatte eingelassen ist, eingeklemmt. Es können Temperaturen zwischen 0 °C und 90 °C von dem Temperaturmessplatz angefahren werden.

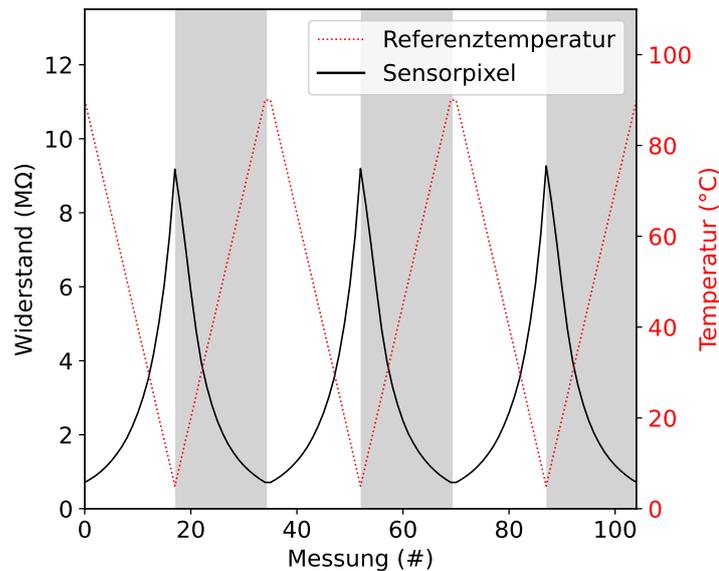
Alle Komponenten werden von einem zentralen Steuerungscomputer (*Raspberry Pi*) bedient und ausgelesen. Je nach Messung stehen verschiedene Pythonskripte zur Verfügung, die den Messvorgang automatisch durchführen. Das Auslesen des Temperatursensor-Arrays erfolgt nach einer festgelegtem Reihenfolge, die hinsichtlich Messgenauigkeit und Temperaturstabilität optimiert ist. Zunächst wird vom Steuerungscomputer mithilfe einer ID das Durchschalten der Ansteuereinheit eines Sensorpixels angefordert. Diese sendet zum Abgleich nach dem Umschalten der Multiplexer die gewählte ID des angewählten Sensorpixels zurück an den Steuerungscomputer. Mit dieser Bestätigung wird eine Messung auf der SMU getriggert. Dieses erfasst den Spannungs- und Stromwert, legt diese im integrierten Speicher ab und bestätigt die erfolgreiche Messung. Dieser Vorgang, zwischen Umschalten und anschließendem Messen wiederholt sich, bis alle Sensorpixel des Temperatursensor-Arrays einmal gemessen wurden. Im Anschluss wird der Messwertspeicher der SMU

vom Steuerungscomputer ausgelesen und die Messdaten aus dem Datenstring den einzelnen Sensorpixeln zugeordnet. Damit ist ein Zyklus abgeschlossen und die Messung beginnt von vorne. In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, dass die Sensorpixel nicht reihenweise ausgelesen werden, sondern in diagonaler Reihenfolge. Beim Pixelwechsel wird immer die Spalten- und Reihenposition gewechselt. Der gegenseitige Einfluss der benachbarten Sensorpixel auf die Messung wird dadurch reduziert.

Außerdem hat die richtige Wahl der Abtastrate der SMU einen starken Einfluss auf die Einkopplung von Störungen. Der Messzyklus der SMU ist an die Netzfrequenz der Versorgungsspannung gekoppelt. Wichtig ist hierbei die Anzahl der Netzyklen - *Number of Power Line Cycles* (NPLC) über die für eine einzelne Messung integriert wird. Ein NPLC-Wert von 1 entspricht bei einer Netzfrequenz von 50 Hz dem Messintervall von 20 ms und somit der Messung über eine Periode der Netzfrequenz. Wird ein nicht ganzzahliger NPLC-Werte gewählt, um beispielsweise die Messzeit zu verkürzen, ist die Messung durch erhebliche Störungen beeinträchtigt. Dies lässt sich auf Störeinflüsse durch eine Einkopplung der Netzfrequenz in das Temperatursensor-Array oder Ausleseelektronik zurückführen. Die Messdauer für einen Messzyklus wird außerdem maßgeblich durch die Kommunikationslatenz der WLAN-Verbindung zwischen Steuerungscomputer und Multiplexereinheit bzw. die Umschaltdauer der Multiplexer vorgegeben. Die Auslesezeit aller 625 Sensorpixel beträgt knapp 2 min. Für schnell wechselnde Temperaturverläufe ist diese Messmethode ungeeignet. Eine höhere Auslesegeschwindigkeit kann schließlich mit der angepassten Ausleseelektronik erzielt werden.

### 6.3 Charakterisierung und Kalibrierung der Sensorfolie

Wie bereits bei der Vorstellung des Thermistormaterials im Materialkapitel 4.2.2 gezeigt wird, weist dieses eine starke Temperaturabhängigkeit (Strom-Spannungskennlinie - Abbildung 4.8) auf. Um das Sensorarray als Temperatursensor einsetzen zu können, muss dieses Verhalten nun mit der Temperatur korreliert werden. Zur Kalibrierung wird das Sensorarray im vorgestellten Temperaturmessplatz (siehe Kapitel 6.2) installiert. Für den Kalibriervorgang wird nun ein vordefiniertes Temperaturstufenprofil mit Hilfe des Temperaturmessplatzes abgefahren und während der Widerstand jedes Sensorpixels des Temperatursensor-Arrays gemessen wird. Eine solche Messung ist exemplarisch für einen Sensorpixel in Abbildung 6.7 dargestellt. Zur Kalibrierung stehen prinzipiell auch alternative Messverfahren zur Verfügung, wie diese in Kapitel 5.2.1 vorgestellt werden. Der Temperaturmessplatz erlaubt jedoch unbeaufsichtigte Messungen und ein größeres Temperaturspektrum. Für die Messung wird die Temperatur alternierend zwischen 0 bis 90 °C in Intervallen von 5 °C abgefahren. Der Vorteil dieses Temperaturmessplatzes ist die Verwendung eines Peltierelements, welches aktiv den Sensor herunterkühlen kann. Wie im vorausgegangenen Kapitel beschrieben wird, verläuft die Messung nach einer festen Reihenfolge. Unter Berücksichtigung einer Messdauer von etwa 2 min für das gesamte Temperatursensor-Array, ist eine konstante Temperatur mit entsprechender Regelung für die Kalibrierung essentiell. Dazu fragt der Steuerungscomputer permanent die Temperatur des Referenztemperatursensors am Peltierelement ab. Sobald die Temperatur für 10 s innerhalb der gewählten Toleranz von  $\pm 0,2$  °C liegt, triggert der Steuerungscomputer eine Messung auf der SMU bzw. auf der Ansteuereinheit. Es werden daraufhin alle Sensorpixel der Reihe nach ausgelesen, bis das gesamte Temperatursensor-Array einmal vollständig erfasst wurde. Danach wiederholt sich der Messvorgang für die nächsten Temperaturschritte. Wie in Abbildung 6.7 ersichtlich ist, wird das Temperaturprofil mehrfach hintereinander abgefahren, um die Statistik zu verbessern und die Reproduzierbarkeit der Messwerte zu überprüfen. Die Abnahme des Widerstands ist dabei charakteristisch für ein NTC Material. Außerdem weist das Abflachen des Kurvenverlaufs des Widerstands bei höheren Temperaturen auf einen nichtlinearen Zusammenhang hin. Werden die Kurvenverläufe der einzelnen Messiterationen miteinander verglichen, stimmen diese sowohl in den Extrema und im Verlauf gut überein und weisen keinen Drift auf. Beim Vergleich von Abkühl- und Aufheizvorgang

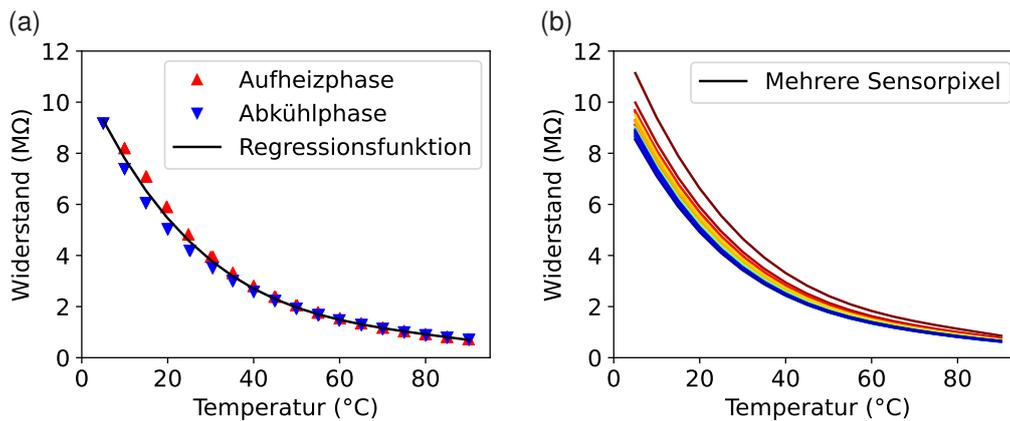


**Abbildung 6.7:** Darstellung des Temperaturverhaltens eines Sensorpixels. Um die Eignung des Sensorarrays als Temperatursensor zu untersuchen und diese zu kalibrieren wird mehrfach ein Temperaturstufenprofil zwischen 0 bis 90 °C im Messplatz abgefahren. Gleichzeitig werden die Widerstandswerte der Sensorpixel erfasst. Der Verlauf des Widerstands zeigt ein nichtlineares NTC-Verhalten, das auf das Thermistormaterial zurückzuführen ist. Die Messwiederholungen zeigen außerdem ein reproduzierbares Verhalten des Sensors. *Die Abbildung wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.*

lässt sich ein spiegelsymmetrisches Verhalten beobachten. Eine Hysterese lässt sich an dieser Stelle nicht ausmachen. Für ein reproduzierbares Verhalten sollten die Proben nach der Herstellung allerdings für längere Zeit (> 24 h) bei 120 °C im Ofen gelagert werden, da sonst bei neuen Proben zu Beginn einer Messung ein starker Drift der Widerstandswerte beobachtet werden kann. Für den betrachteten Sensor weisen die einzelnen Sensorpixel bei 0 °C Widerstandswerte von etwa  $10 \pm 5 \text{ M}\Omega$  auf. Dennoch zeigen alle Sensorpixel ein vergleichbares Verhalten unter Temperaturerhöhung, wie in Abbildung 6.7 deutlich wird. Der Unterschied zwischen den einzelnen Sensorpixeln lässt sich auf Variationen bei der Schichtdicke und Linienbreite durch Schwankungen während der Herstellung zurückführen.

Damit die gemessenen Widerstandswerte interpretiert werden können, ist eine Kalibrierung erforderlich. In Kapitel 5.2 werden die verwendeten Kalibrierverfahren erläutert. Bei dem folienbasierten Temperatursensor-Array kommt hauptsächlich die individuelle Kalibrierung, bei der für jeden Sensorpixel getrennt kalibriert wird, zum Einsatz. Erst bei der Durchführung von Experimenten außerhalb des Temperaturmessplatzes wird auf die gemittelte Kalibrierung gewechselt, um eine schnelle Rekalibrierung vor jedem Experiment durchzuführen.

Abbildung 6.8 (a) zeigt die Regressionsanalyse für die Messdaten eines Sensorpixels. Für die individuellen Kalibrierung eines Sensorpixels werden die Widerstandsmesswerte über die Referenztemperatur aufgetragen. Mit Hilfe eines Polynom vierten Grades wird eine Regressionsanalyse durchgeführt. Im Zusammenhang mit Thermistoren werden in Kapitel 6.9 gängige Regressionsfunktionen präsentiert. Im Vergleich erzielt das hier verwendete Polynom vierten Grades die beste Übereinstimmung mit den Messdaten. Die so ermittelte Regressionsfunktion, entspricht der individuellen Kalibrierfunktion des analysierten Sensorpixels. Im Schaubild sind die Datenpunkte der Aufheiz- und Abkühlphase getrennt voneinander dargestellt. Dabei lässt sich eine leichte Hysterese bei tiefen Temperaturen bis etwa 40 °C erkennen. Der Effekt wird nicht tiefgehend untersucht, da die Größenordnung keine Auswirkung auf die Anwendung hat. Es steht zu vermuten, dass die



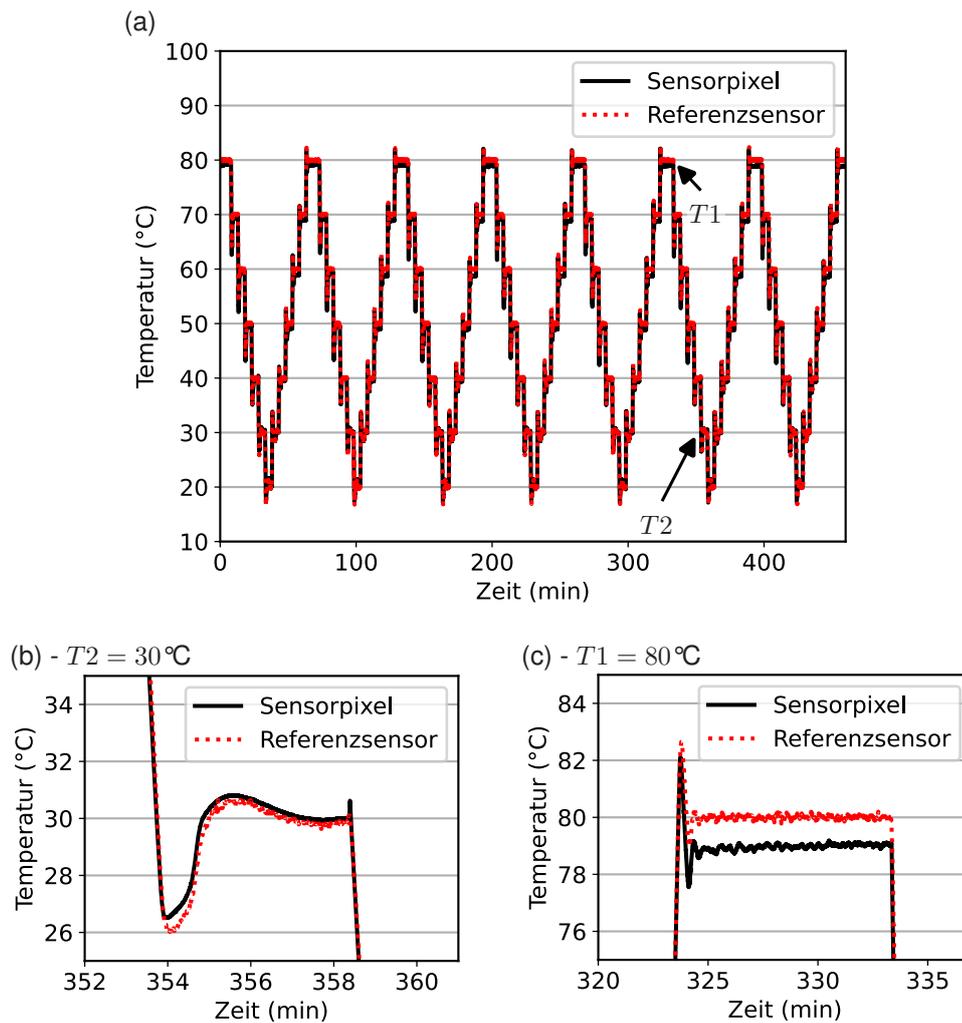
**Abbildung 6.8:** Zur Bestimmung der Kalibrierfunktion werden die Widerstandswerte mithilfe einer Messung vergleichbar zu Abbildung 6.7 durchgeführt. (a) Für jeden Sensorpixel werden die gemessenen Widerstandswerte über die Temperatur aufgetragen und eine Regressionsanalyse mit einem Polynom vierten Grades durchgeführt. Die gefundene Regressionsfunktion entspricht daraufhin der Kalibrierfunktion des Sensorpixels. Jedem Sensorpixel ist eine individuelle Kalibrierfunktion zugeordnet. Bei der Messung wird eine minimale Hysterese zwischen Aufheiz- und Abkühlvorgang bei tiefen Temperaturen festgestellt. (b) Die Kalibrierfunktionen mehrerer Sensorpixel weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Herstellungsschwankungen führen zu dem beobachteten Versatz. Die Abbildung wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

Hysterese auf Umlagerungseffekte im Thermistormaterial zurückzuführen ist. Außerhalb des Temperaturmessplatzes kann der Effekt allerdings nicht reproduziert werden. Der Temperaturmessplatz kann ebenfalls aufgrund seiner Wärmeträgheit Verzögerungen in der Temperaturanpassung bewirken und somit einen leichten Drift bei den gemessenen Widerstandswerten bewirken. Da die Sensitivität des Sensors bei niedrigen Temperaturen stärker ausgeprägt ist, tritt in diesem Bereich die Temperaturabweichung stärker hervor. Eine prinzipielle Kompensation der Hysterese unter Berücksichtigung des vorausgegangenen Temperaturverlaufs wäre möglich, wird allerdings in dieser Arbeit nicht umgesetzt.

Für die übrigen Sensorpixel werden nach demselben Muster individuelle Kalibrierfunktionen berechnet. Ein Teil davon ist in Abbildung 6.8 (b) dargestellt. Die Kalibrierfunktionen weisen alle einen vergleichbaren Verlauf auf, sind allerdings aufgrund von Herstellungsschwankungen in der Höhe versetzt. Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben wird, werden jedoch zur Verbesserung umfassende Maßnahmen bei der Herstellung ergriffen. Für die in Abbildung 6.7 dargestellte Messung werden drei Abkühl- und Aufheizphasen in 5 °C Schritten durchgeführt, was über 100 Messungen erfordert. Bei etwa 2 min pro Messvorgang sowie der erforderlichen Einschwingzeit des Temperaturmessplatzes waren mehrere Stunden pro Messdurchgang erforderlich. Eingekoppelte Störungen können außerdem eine Messwiederholung bedingen. Kommt es beispielsweise beim Einbau des Temperatursensor-Arrays in ein Experiment partiell zu Beschädigungen oder zu Veränderungen am Kontaktwiderstand des Steckers, muss eine neue Kalibrierung durchgeführt werden. Entsprechend ist die individuelle Kalibrierung ein sehr aufwendiges Verfahren.

Bei der Berechnung der Kalibrierung wird gleichzeitig für jeden Sensorpixel der TCR-Wert als Maß für die Empfindlichkeit berechnet. Aufgrund des nichtlinearen NTC-Verhaltens des Thermistormaterials ist dieser temperaturabhängig und negativ. Bei 20 °C beträgt der Temperaturkoeffizient  $-3,6\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  und nimmt bei 85 °C auf etwa  $-2,4\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ab. Die mathematische Beschreibung von Thermistoren und die Erklärung zum TCR-Wert ist in Kapitel 2.2.3 zu finden.

Zur Validierung der Kalibrierung wird das Temperatursensor-Array im Temperaturmessplatz weiteren Messungen unterzogen. Dazu wird ein Temperaturstufenprofil über einige Stunden abgefahren, im Anschluss die dabei ermittelten Messdaten mit der Kalibrierung in Temperaturwerte umgerechnet und schließlich die Werte mit der Referenztemperatur abgeglichen. Da nur ein Sensorpixel ausgelesen wird, kann trotz der begrenzten Auslesegeschwindigkeit eine zeitlich hochaufgelöste Messung vorgenommen werden. Abbildung



**Abbildung 6.9:** Um die Kalibrierung zu überprüfen, wird das Temperatursensor-Array einem Temperaturstresstest unterzogen. (a) Zunächst wird im Temperaturmessplatz erneut ein Temperaturprofil abgefahren und die Messergebnisse mit der ermittelten Kalibrierfunktion interpretiert. Selbst nach mehreren Stunden wird ein konsistentes Ergebnis erzielt. (b) Teilausschnitt der Messung bei  $T_2 = 30^\circ\text{C}$ . Bei niedrigen Temperaturen fällt die Abweichung kleiner aus. (c) Detaillierter Ausschnitt des Temperaturverlaufs bei  $T_1 = 80^\circ\text{C}$ . Bei hohen Temperaturen kann jedoch eine Temperaturabweichung von etwa  $1^\circ\text{C}$  beobachtet werden. Diese ist bei jeder Messiteration sichtbar. Die Abbildungen wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

6.9 (a) zeigt die Gegenüberstellung der Temperatur des Referenztemperatursensors und dem Temperaturverlauf eines Sensorpixels. Die gemessenen Temperaturüberschwinger sind auf den Temperaturmessplatz selbst zurückzuführen. Das Temperatursensor-Array erfasst detailliert den Temperaturverlauf, welches dem Profil des Referenzsensors entspricht. Auch die zeitlich kurzen Systemüberschwinger werden klar abgebildet, was für eine ausreichend kleine Wärmekapazität des Sensorarrays in diesem Kontext hinweist. Die Messwerte bleiben über die Messdauer reproduzierbar und es konnte kein Drift beobachtet werden. Um den detaillierten Verlauf besser darzustellen, sind in Abbildung 6.9 (b) und (c) zwei Teilausschnitte ausgewählt. Auch im Detail zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Temperaturprofilen von Sensorarray und Referenzsensor. Die absolute Temperaturabweichung beträgt etwa  $1^\circ\text{C}$  bei  $80^\circ\text{C}$ . Da in diesem Temperaturbereich die Temperaturabhängigkeit des Widerstands des Sensorarrays geringer ist (nicht lineares Verhalten), fallen kleine Abweichung des Widerstands bei der Interpretation mit der Kalibrierfunktion stärker ins Gewicht. Bei  $30^\circ\text{C}$  ist die Abweichung jedoch nach dem Einschwingen geringer als  $0,1^\circ\text{C}$ . Mit der individuellen Kalibrierung lässt sich mit dem Temperatursensor-Array eine schnelle und genaue

Temperaturmessung erzielen. Bei einer lateralen Temperaturmessung stehen meist die bildgebenden Möglichkeiten im Vordergrund, weshalb die absolute Messgenauigkeit keine wesentliche Rolle spielt. Dazu ist meist die Beobachtung der relativen Messwertänderung schon ausreichend und bedarf daher keiner Kalibrierung. Um trotzdem das nichtlineare Verhalten des Sensors zu kompensieren, kann auf die gemittelte Kalibrierfunktion gewechselt werden. Zwar ist die Temperaturmessgenauigkeit geringer verglichen mit der individuellen Kalibrierung, doch meist immer noch ausreichend. Im Versuch wird dadurch die Rekalibrierung des Sensorarrays allerdings massiv vereinfacht. Die exakte Vorgehensweise ist in Kapitel 5.2.2 zur gemittelten Kalibrierung ausführlich erklärt.

## 6.4 Laserstrahlprofilmessung

Das hohe laterale Auflösungsvermögen des gedruckten Temperatursensor-Arrays eignet sich zur Detektion kleiner ausgedehnter Wärmequellen. Die Sensordichte ermöglicht die Auflösung eines wenige Millimeter großen Laserpunkts. Dazu muss allerdings die Strahlintensität des Lasers ausreichen, um bei Bestrahlung des Sensors eine Erwärmung zu bewirken. Die induzierte Wärmeverteilung im Sensor kann darüber hinaus dazu verwendet werden die Strahlparameter des Laserstrahls zu bestimmen. Im erweiterten sichtbaren Wellenlängenbereich (etwa 240 – 1100 nm) kommen dazu üblicherweise Strahlprofilmessgeräte (*Beam profiler*) zum Einsatz, wobei diese meist auf CCD- oder CMOS-Bildsensoren basieren. Heutige Geräte kombinieren eine hohe Sensitivität mit einer hohen Bildauflösungen, was eine Pixelgröße im einstelligen Mikrometerbereich erfordert. Im mittleren und fernen Infrarotbereich hingegen steigt jedoch die Komplexität der Detektoren. Grundsätzlich wird hierbei zwischen thermischen und photonischen Infrarotdetektoren unterschieden. Bei den photonischen Detektoren werden meist maßgeschneiderte Halbleiter verwendet, die mit der einfallenden Infrarotstrahlung wechselwirken und ein elektrisches Signal generieren. Verbreitete Halbleiter für diesen Anwendungsbereich sind HgCdTe, InSb und InGaAs. Die Detektoren sind meist sperrig, schwer und sehr teuer. Zur Verbesserung des Rauschverhaltens müssen diese aktiv gekühlt werden. Je nach Variante sind hohe laterale Auflösung und hohe Auslesegeschwindigkeit möglich. Das zu detektierende Spektrum kann dabei selektiv gemessen werden. Im Gegenzug ist die thermische Detektion meist weniger komplex und kann gegebenenfalls sogar bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Typische Beispiele sind Bolometer, Thermolemente/Thermosäulen oder pyroelektrische Detektoren. Generell beruht die Messmethode darauf, dass die durch die einfallende Strahlung erzeugte Wärme zu einer physikalischen Änderung im Detektionsmaterial führt. Diese Änderung wird wiederum gemessen und in ein entsprechende Signal umgesetzt. Da lediglich die induzierte Temperatur eine Rolle bei der Messung spielt, ist diese ausschließlich von Intensität, aber nicht vom Spektrum abhängig. Um ein zweidimensionales Bild zu erzeugen, muss das zu messende Objekt abgerastert werden. [149, 150, 151]

Mit der lateralen Auflösung von 500  $\mu\text{m}$ , sowie mit einer Temperaturmessgenauigkeit von  $\pm 1$   $^{\circ}\text{C}$  eignet sich das vorgestellte Temperatursensor-Array ebenfalls zur Detektion und Vermessung einer punktuellen Laserquelle. Zur Demonstration wird ein grüner Laser mit einer Leistung von 22 mW verwendet. Die Bestrahlung erfolgt von der Rückseite, das heißt durch die PEN Folie. Um die Absorption zu verbessern, wird zusätzlich eine 14  $\mu\text{m}$  dicke, mattschwarze Folie aufgeklebt. Diese ist außerdem intransparent und stellt somit sicher, dass die gemessene Temperaturverteilung ausschließlich durch das induzierte Wärmeprofil zustande kommt. Auch wenn dazu kein Verdacht besteht, kann eine optische Anregung des Materials durch den Laser von vorneherein ausgeschlossen werden.

Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass die gemessene Wärmeverteilung nicht der eigentlichen Laserstrahlgröße entspricht. Im Substrat und der Sensorstruktur kommt es zu Wärmeleitung, die für eine Verbreiterung der eigentlich lokal begrenzten Wärmequelle sorgt. Um von der Temperaturverteilung auf die Ausmaße des Laserstrahls schließen zu können, muss die Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt werden.

Die Herleitung und Beschreibung ist im nachfolgenden Kapitel 6.4.1 zu finden. Diese wird im Anschluss verwendet um den Laserstrahldurchmesser zu berechnen, welcher mit den Messergebnissen eines Strahlprofilmessgeräts (BC106N-VIS/M - CCD Camera Beam Profiler, Thorlabs, Inc.) verglichen wird (siehe Kapitel 6.4.2). Im nächsten Schritt wird das Experiment erweitert und Einfluss von Laserstrahlgröße bzw. -intensität auf das Wärmeprofil untersucht. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6.4.2.1 vorgestellt. Das Experiment wird außerdem in einer Simulation zur Untersuchung der Wärmeverteilung im Temperatursensor-Array nachgeahmt. Die Simulationsergebnisse werden mit dem Experiment verglichen und in Kapitel 6.4.3 erläutert.

### 6.4.1 Wärmeleitungsgleichung

Damit von der gemessenen Temperaturverteilung auf die Dimension der Wärmequelle geschlossen werden kann, muss diese mit Hilfe der Wärmeleitungsgleichung (WLG) analysiert werden. Die Theorie wurde von Joseph Fourier zur Modellierung der Wärmediffusion durch einen Körper entwickelt. Die allgemeine Form der WLG unter Berücksichtigung einer Wärmequelle wird durch folgende inhomogene Differentialgleichung ausgedrückt:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{x}, t) - \lambda \Delta T(\vec{x}, t) = \underbrace{q(\vec{x}, t)}_{\text{Quellterm}}. \quad (6.1)$$

Hierbei beschreibt  $\lambda$  die Temperaturleitfähigkeit des betrachteten Materials. Prinzipiell müssen die unterschiedlichen Materialien des Temperatursensor-Arrays berücksichtigt werden. Zur Vereinfachung wird stattdessen  $\lambda$  stellvertretend für den gesamten Sensoraufbau verwendet. Der Quellterm in der WLG entspricht der einfallenden Laserstrahlung, die für die Wärmeentwicklung verantwortlich ist. Da weder die Messung zeitkritisch ist, noch die Ausleselektronik eine ausreichend hohe Samplingrate zur Auflösung der zeitlichen Entwicklung des Temperaturprofils aufweist, wird die WLG für den zeitunabhängigen, also stationären, Fall gelöst:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{x}, t) = 0 \quad \rightarrow \quad -\lambda \Delta T(\vec{x}) = q(\vec{x}). \quad (6.2)$$

Für den Laserstrahl wird eine zeitlich konstante und gaußförmige Intensitätsverteilung angenommen, welche für den Quellterm eingesetzt wird. Dieser Zusammenhang erlaubt im Nachhinein die Berechnung der ursprünglichen Wärmeverteilung des Lasers. Gleichzeitig kann bei dem Laserstrahl von einem gleichmäßigen runden Strahlungsprofil ausgegangen werden. Damit lautet der Quellterm:

$$q(r) = A \exp \left[ -\frac{r^2}{\sqrt{2}\omega^2} \right]. \quad (6.3)$$

Hierbei entspricht  $A$  der Amplitude bzw. der Intensität des Laserstrahls.  $\omega$  beschreibt die Strahlbreite in der Strahltaille. Aufgrund des rotationssymmetrischen Problems kann der Laplace-Operator in Polarkoordinaten ohne Winkelabhängigkeit ausgedrückt werden. Damit ergibt sich WLG zu

$$\underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r T(r)}_{\Delta T \text{ in sphärischen Koordinaten}} = \underbrace{-\frac{A}{\lambda} \exp \left[ -\frac{r^2}{\sqrt{2}\omega^2} \right]}_{q \text{ entspricht gaußförmigen Laserstrahl}}. \quad (6.4)$$

Zur Lösung der Differentialgleichung für  $T(x)$  wird diese zweimal integriert. Dazu wird die Fehlerfunktion verwendet, die durch  $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau$  beschrieben wird. Somit ergibt sich zur Beschreibung des Wärmeprofiles folgende Gleichung aus der WLG

$$T(r) = \tilde{A}_\lambda \omega^3 \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \frac{1}{r} \cdot \text{erf} \left( \frac{r}{\sqrt{2}\omega^2} \right). \quad (6.5)$$

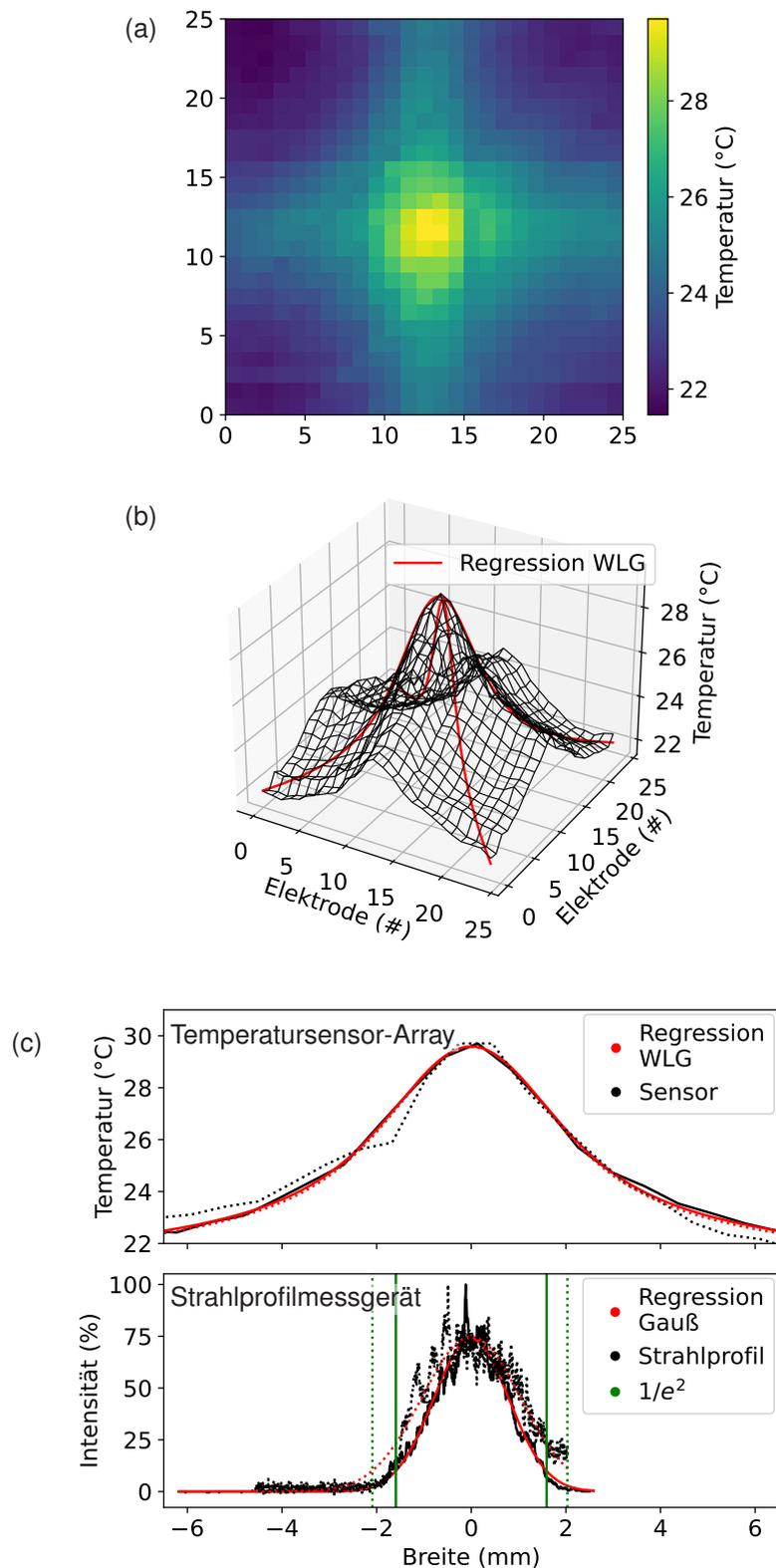
In der Gleichung wird zur Vereinfachung  $\frac{A}{\lambda} = \tilde{A}_\lambda$  eingeführt. Mit Gleichung 6.5 wird eine Regressionsanalyse am Verlauf des Temperaturprofils vorgenommen. Daraus können die variablen Parameter in der Gleichung bestimmt werden. Diese Parameter wiederum werden im Anschluss genutzt, um mithilfe von Gleichung 6.3 aus dem Quellterm die ursprüngliche Form des Laserstrahls zu berechnen und diese zu rekonstruieren. Aus dem berechneten Laserstrahlprofil wird schließlich der Strahldurchmesser berechnet. Dazu werden die Positionen, an denen die Intensität des Laserstrahlungsprofil auf  $1/e^2$  abfällt, bestimmt. Die Verwendung des Temperatursensor-Arrays zur Detektion eines Laserstrahls ist unabhängig von der Wellenlänge und bietet im Gegensatz zu kommerziellen thermischen Infrarotdetektoren ein laterales Auflösungsvermögen. Aufgrund der Wärmeleitung im Sensor und der verursachten Verbreiterung des Temperaturprofils, können selbst Laserstrahlgrößen detektiert werden, die unterhalb der Auflösung des Temperatursensor-Arrays liegen. Das Auflösungsvermögen im Bezug auf die minimal zu detektierende Laserstrahlgröße des Sensorarrays ist daher vielmehr vom induzierten Wärmeprofil abhängig.

### 6.4.2 Analyse eines Laserstrahls

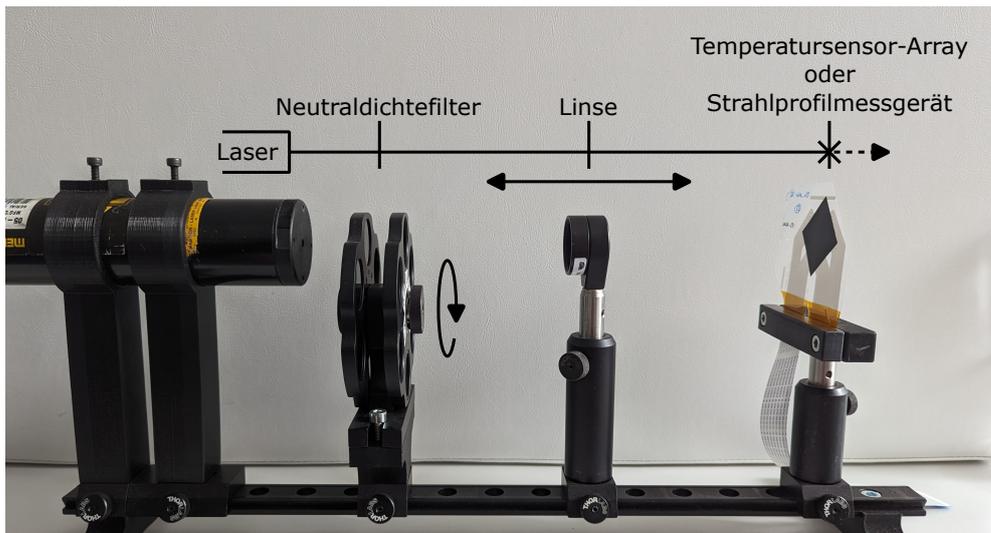
Die Vorbereitung des Temperatursensor-Arrays zur Vermessung des Strahldurchmessers eines Lasers erfolgt wie in Abschnitt 6.4 beschrieben. Um die Absorption des Lasers Sensorfolie zu verbessern, wird ein mattschwarzes Klebeband auf der Rückseite des Sensors angebracht. Die Messung erfolgt im Temperaturmessplatz, der in Kapitel 6.2 vorgestellt wird. Vor der eigentlichen Messung erfolgt eine Kalibrierung des Sensorarrays im Temperaturmessplatz. Direkt im Anschluss wird das Temperatursensor-Array vorsichtig aus dem Temperaturmessplatz herausgenommen und unter einem grünen Versuchslaser mit 22 mW Leistung platziert. Im Bereich der bestrahlten Fläche kommt es zu einer lokalen Erwärmung der Sensorfläche. In Abbildung 6.10 (a) ist die Messung dargestellt, wobei es mittig an der Position des Laserstrahls zu einer Temperaturerhöhung um etwa 6 °C zum Umfeld kommt. Um den Punkt mit der höchsten Temperatur entsteht ein sternförmiges Temperaturprofil entlang der horizontalen und vertikalen Elektroden. Hauptursache sind die bei einer Passivmatrix auftretenden parasitären Ströme durch die umliegenden Sensorpixel. Bei einer später durchgeführten Messung mit der ebenfalls entwickelten angepassten Ausleseelektronik (siehe Kapitel 5.1.2) kann dieser Effekt unter Bestrahlung nicht beobachtet werden. Hierbei werden die auftretenden parasitären Ströme bei der Passivmatrix durch die *Zero-Potential-Scanning-Methode* effektiv unterdrückt. Minimale Auswirkungen durch Wärmeleitung entlang der Silberelektroden sollten allerdings berücksichtigt werden.

Zur Berechnung des Laserstrahldurchmessers wird die in Kapitel 6.4.1 vorgestellte stationäre WLK 6.5 in einer Regressionsanalyse auf die Messdaten angewendet. Zur Vermeidung der Störeinflusses durch die benachbarten Sensorpixel wird der Temperaturverlauf entlang der Diagonalen, also quer zu den Elektroden, analysiert. Abbildung 6.10 (b) zeigt die dreidimensionale Darstellung des Temperaturverlaufs der Messung. Das lokale Temperaturmaximum bzw. die Position des Lasers lässt sich deutlich als Spitze identifizieren. In rot sind die Verläufe der berechneten Regressionsfunktionen entlang der Diagonalen eingezeichnet. Die WLKs weisen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten auf. Diese sind als Schnittansicht in Abbildung 6.10 (c) im oberen Bild dargestellt. Im Bild darunter ist die Vergleichsmessung mit einem Strahlprofilmessgerät gezeigt. Da typischerweise Laser ein gaußverteiltes Intensitätsprofil aufweisen, wird eine Gaußfunktion (vgl. siehe Gleichung 6.3) bei der Regressionsanalyse der gemessenen Intensitätsverteilung angenommen. Aufgrund der Wärmeleitung im Temperatursensor-Array kommt es zu einer Verbreiterung des Temperaturverlaufs im Vergleich zur Intensitätsmessung mit dem Strahlprofilmessgerät.

Zur Bestimmung der Strahlbreiten werden jeweils die berechneten Regressionsfunktionen herangezogen. Bei dem Temperatursensor-Array wird das Strahlprofil aus den Regressionsparametern vom Temperaturverlauf bestimmt. Die verwendete WLK berücksichtigt einen gaußförmigen Quellterm 6.3. Durch Anwendung



**Abbildung 6.10:** Vermessung eines grünen 22 mW Lasers mit dem Temperatursensor-Array. (a) An der bestrahlten Stelle kommt es zu einer lokalen Temperaturerhöhung. (b) Die dreidimensionale Darstellung zeigt eine klar definierte Temperaturspitze. Mit der hergeleiteten Wärmeleitungsgleichung 6.5 wird eine Regressionsanalyse entlang der Diagonalen (rote Kurvenverläufe) des Temperaturprofils durchgeführt. (c) Im Schnittbild sind beide Diagonalen (durchgezogene und gepunktete Linie) übereinandergelegt. Die ermittelten Regressionsfunktionen stimmen gut mit dem Messverlauf überein. Aus der Wärmeleitungsgleichung wird der Laserstrahldurchmesser berechnet. Zum Vergleich wird der Laserstrahl ebenfalls mit einem Strahlprofilmessgerät gemessen. Die Abbildungen wurde von [4] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.



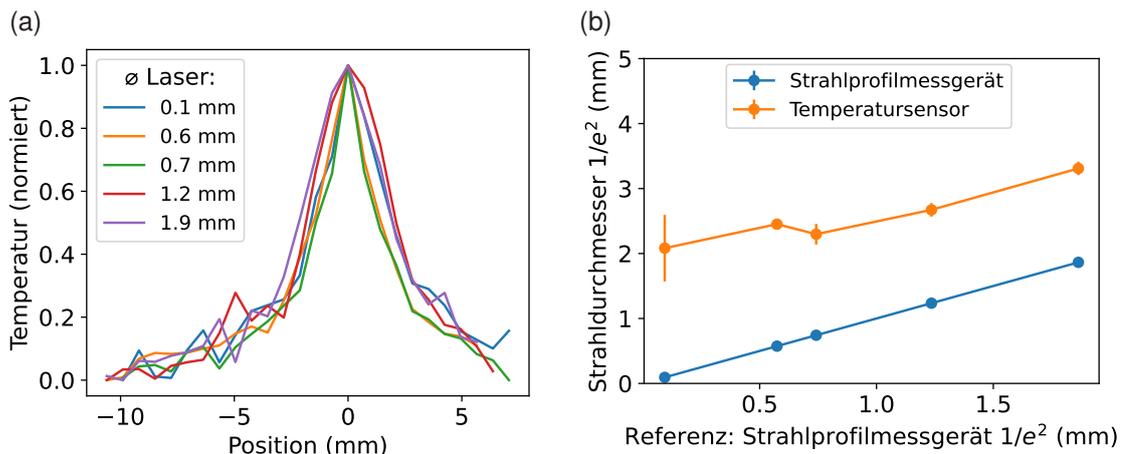
**Abbildung 6.11:** Optimierter Messaufbau zur Bestimmung der Abhängigkeit des induzierten Temperaturprofils im Temperatursensor-Array in Relation zur Laserstrahlgröße und Strahlintensität. Um die Laserstrahlgröße einzustellen, wird der Laserstrahl mit einer Linse fokussiert, wobei die Laserleistung konstant gehalten wird. Durch Variation des Abstandes der Linse zur Sensorfolie lässt sich der Strahldurchmesser einstellen. Für die Messung der Intensitätsabhängigkeit wird die Linse entfernt. Durch Verdrehen des Filterrades kann durch Auswählen eines Neutralsichtfilters die Intensität eingestellt werden. Zur Referenz wird jede Messung mit einem Strahlprofilmessgerät wiederholt.

der gewonnen Regressionsparametern auf den Quellterm kann sofort der zugrundeliegende Intensitätsverlauf berechnet werden. Beim Strahlprofilmessgerät wird hingegen der Intensitätsverlauf direkt bestimmt. Die Strahlbreite wird aus dem Positionsabstand im Intensitätsverlauf berechnet, bei der die Intensität auf  $1/e^2 \approx 13,5\%$  abgefallen ist. Für das Temperatursensor-Array ergibt sich ein Strahldurchmesser von  $D = 4,42 \pm 0,03$  mm. Der Strahldurchmesser aus dem direkt bestimmten Intensitätsverlaufs des Strahlprofilmessgerät beträgt  $D = 3,85 \pm 0,27$  mm, womit sich die Abweichung zwischen den beiden Messmethoden auf knapp 14 % beläuft.

Zur Bewertung des Ergebnisses aus dem Vergleich müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Der inhomogene Aufbau aus Materialien mit unterschiedlichen Wärmeleitkoeffizienten bleibt bei der WLK komplett unberücksichtigt. Die Silberelektroden besitzen im Vergleich zu den übrigen Materialien eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Auch die parasitären Ströme der benachbarten Sensorpixel beeinträchtigen die Messung, wie sich an der sternförmigen Temperaturverteilung erkennen lässt. Zwar werden die Messwerte entlang der Diagonalen zur Analyse genutzt, trotzdem muss von einem Einfluss auf die Messung ausgegangen werden. Die Wechselwirkung des Lasers mit dem Temperatursensor-Array wird ebenfalls nicht näher berücksichtigt. Konvektion oder Wärmestrahlung, die bei der Messung zu einem Kühleffekt führen können, werden ebenfalls vernachlässigt. Im Gegenzug weist auch die Messung mit dem Strahlprofilmessgerät ein hohes Maß an Rauschen auf, was den Messfehler bei der Referenzmessung vergrößert. Trotz dieser Einschränkungen beträgt die Messabweichung lediglich 14 %. Der Zusammenhang zwischen Laserstrahl und Temperaturverteilung wird in Kapitel 6.4.2.1 weiter untersucht und in einer Messreihe Laserstrahlgröße sowie Laserintensität variiert.

#### 6.4.2.1 Einflussgröße: Laserstrahldurchmesser

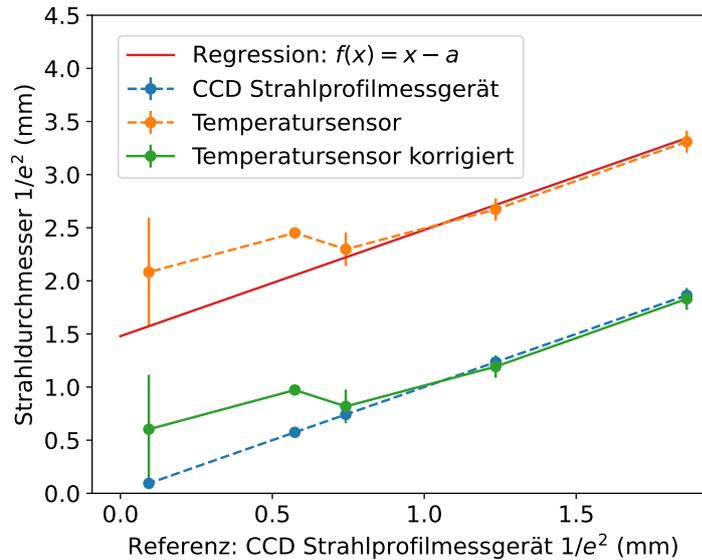
Im vorausgegangenen Kapitel wird die Vermessung eines Laserstrahls mit dem Temperatursensor-Array unter Ausnutzung der WLK gezeigt. Um darüber hinaus die Auswirkung der Laserstrahlgröße auf die Temperaturverteilung zu untersuchen, wird in einem neuen Messaufbau eine Messreihe durchgeführt. In Abbildung 6.11 ist der Messaufbau dargestellt. Zur Montage und Ausrichtung werden die Komponenten auf



**Abbildung 6.12:** (a) Die Abbildung zeigt die mit dem Temperatursensor-Array gemessenen Temperaturverläufe bei unterschiedlichen Laserstrahldurchmessern. Mit abnehmender Strahlgröße nimmt auch die Breite des Temperaturprofils ab. Der optische Unterschied der Temperaturverläufe nimmt aber bei sehr kleinen Strahldurchmessern aufgrund des limitierten Auflösungsvermögens ab. (b) Im Schaubild ist der berechnete Strahldurchmesser gegen die Referenzmessung mit einem Strahlprofilmessgerät aufgetragen. Wie man bereits an den Temperaturprofilen erkennen konnte, nimmt die Abweichung bei kleinen Strahldurchmessern deutlich zu.

einer optischen Schiene verbaut. Als Laser wird ein Helium-Neon-Laser (05-LHP-121-241, Melles Griot) mit einer Wellenlänge von 632,8 nm und einer gemessenen Leistung von 5 mW verwendet. Unmittelbar nach dem Laser folgt ein Filtrerrad mit einer Auswahl verschiedener Neutraldichtefilter zur Variation der Intensität. Die Messreihe umfasst Laserintensitäten zwischen 25 % und 100 %. Nach dem Filtrerrad ist eine verschiebbare Linse montiert. Durch die Variation des Abstands der Linse zum Sensor wird die Fokussierung verändert, wodurch sich der Durchmesser des Laserstrahls einstellen lässt. Das Ende bildet das Temperatursensor-Array im Strahlengang. Auf der Sensorfolie in Abbildung 6.11 lässt sich ein mattschwarzes Klebeband erkennen. Dieses erhöht die Absorption des Laserstrahls und dient als intransparente Trennschicht zum Sensor. Mit der Halterung kann der Sensor sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung justiert werden. Für die Referenzmessung wird das Temperatursensor-Array durch das Strahlprofilmessgerät (BC106N-VIS/M - CCD Camera Beam Profiler, Thorlabs, Inc.) ersetzt und an der gleichen Stelle positioniert. Das Auslesen des Sensorarrays erfolgt mit der zuvor verwendeten Ansteuereinheit und der SMU (siehe Kapitel 5.1.1). Da die Messung außerhalb des zuvor verwendeten Temperaturmessplatzes durchgeführt wird, wird für die Umrechnung der Widerstandswerte in die Temperatur die gemittelte Kalibrierfunktion verwendet (siehe Kapitel 5.2.2). Diese wird aus einer zuvor durchgeführten individuellen Kalibrierung berechnet. Auf diese Weise kann das Temperatursensor-Array vor jeder Messung rekaliert werden. Dazu werden bei Raumtemperatur lediglich ein neuer Referenzwert (*Baseline*) aufgenommen und die Skalierungsfaktoren neu berechnet. Damit kann der für die individuelle Kalibrierung erforderliche Einbau des Temperatursensor-Arrays in den Temperaturmessplatz vermieden und der Vorgang beschleunigt werden. Die Auswertung des Temperaturprofils erfolgt auf gleiche Weise mit der WLG wie bei der Laser Messung zuvor in Abschnitt 6.4.2.

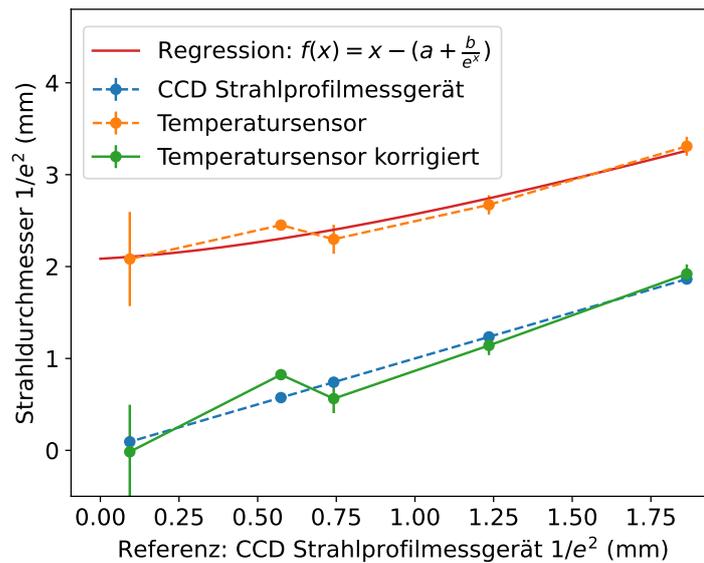
Fünf verschiedene Strahlgrößen werden durch Variation des Abstands zwischen Linse und Sensor eingestellt und das Temperaturprofil gemessen. Der Temperaturverlauf in Abhängigkeit des Strahldurchmessers ist in Abbildung 6.12 (a) dargestellt. Der dabei angegebene Strahldurchmesser entspricht der Referenzmessung mit einem Strahlprofilmessgerät. Der aufgetragene Temperaturverlauf ist der Mittelwert mehrerer hintereinander ausgeführten Messung unter Berücksichtigung beider Diagonalen bei der Auswertung. Im Schaubild lässt sich eine Korrelation zwischen der Laserstrahlbreite und Breite des Wärmeprofils erkennen. Bei kleinen Strahldurchmessern nimmt der Unterschied allerdings ab, was der Sensorauflösung geschuldet ist. Zur Berechnung der Laserstrahlgröße wird der Temperaturverlauf ebenfalls mit der WLG ausgewertet und



**Abbildung 6.13:** Um die Messung der Laserstrahlgröße mit dem Temperatursensor-Array zu verbessern, kann der Versatz durch einen festen Wert kompensiert werden. Dazu wird eine Regressionsanalyse mit  $f(x) = x - a$  auf den linearen Bereich der Messwerten angewendet. Der dabei ermittelte Versatz wird dann als Kompensationswert auf jeden Messwert angewendet. Für Strahldurchmesser  $> 750 \mu\text{m}$  kann die Abweichung zwischen Temperatursensor-Array und Referenzmessung effektiv korrigiert werden.

das Ergebnis mit der Referenzmessung verglichen. In Abbildung 6.12 (b) ist der berechnete Strahldurchmesser aus der Temperaturmessung gegen die Referenzmessung mit dem Strahlprofilmessgerät aufgetragen. Zur Verdeutlichung ist die Referenzmessung zusätzlich dargestellt. Bezogen auf die Referenzmessung ist außerdem die prozentuale Abweichung der Temperaturmessung zur Referenzmessung dargestellt. Bei Strahldurchmessern  $> 0,75 \text{ mm}$  lässt sich ein linearer Zusammenhang erkennen. Dieser verläuft parallel zur Referenzmessung und weist einen konstanten Versatz von etwa  $\pm 1,5 \text{ mm}$  auf. Dieser Versatz sowie die Abweichung zur Referenz nimmt für Strahldurchmesser  $< 500 \mu\text{m}$  zu. Dabei liegt die Laserstrahlgröße im Bereich des lateralen Auflösungsvermögens des Temperatursensor-Arrays mit einem Sensorpixelabstand von ebenfalls  $500 \mu\text{m}$ . Zwar sorgt die Wärmeleitung des Sensorarrays für eine Verbreiterung des Temperaturprofils, eine Differenzierung eines immer kleiner werdenden Strahldurchmessers wird allerdings trotzdem schwieriger. Der zunehmende Versatz kann daher mit dem begrenzten lateralen Auflösungsvermögen begründet werden. Auch die Positionierung des Laserstrahls auf dem Temperatursensor-Array spielt bei einem kleiner werdenden Strahldurchmesser eine immer größere Rolle, da die Anzahl der beteiligten Sensorpixel abnimmt im Temperaturmaximum und die Position dazu variiert. Dies geht mit einer wachsenden Streuung der Messwerte und einer Zunahme des Messfehlers einher. Die mittlere Abweichung bzw. der Versatz über alle Messwerte beträgt  $\pm 1,66 \text{ mm}$ .

Um die Messgenauigkeit mit dem Temperatursensor-Array zu verbessern, kann ein konstanter Korrekturwert auf die Messwerte gerechnet werden. Dadurch kann der Versatz des Laserstrahldurchmessers zwischen Referenzmessung und Temperaturmessung kompensiert werden. Aus den Messwerten im linearen Bereich der Messung wird mithilfe einer Regressionsanalyse unter Verwendung von  $f(x) = x - a$  der Versatz ermittelt. Die gewählte Regressionsfunktion dient zur Bestimmung des Versatzes zwischen den experimentellen Daten und der Referenzmessung. Der dabei berechnete Wert/Versatz  $a = 1,50 \text{ mm}$  wird anschließend von jedem Messwert abgezogen. In Abbildung 6.13 sind die Regressionsgerade, sowie die Messwerte dargestellt. Für Strahldurchmesser  $> 750 \mu\text{m}$  erzielte diese Methode eine sehr gute Übereinstimmung. Die mittlere Abweichung sinkt auf  $\pm 0,18 \text{ mm}$  und beträgt somit nur noch etwa 10% vom unkorrigierten Wert. Die Verwendung eines konstanten Korrekturwerts stellt daher eine einfache Möglichkeit zur Verbesserung



**Abbildung 6.14:** Um die Messung der Laserstrahlgröße mit dem Temperatursensor-Array zu verbessern, kann der Versatz zur Referenzmessung mit einem verlaufabhängigen Wert korrigiert werden. Dazu wird eine Regressionsanalyse mit  $f(x) = x - (a + b/e^x)$  auf die Messwerte angewendet. Mithilfe dieser Regressionsfunktion kann auch die bei Strahldurchmessern  $<750 \mu\text{m}$  zunehmende Abweichung effektiv korrigiert werden.

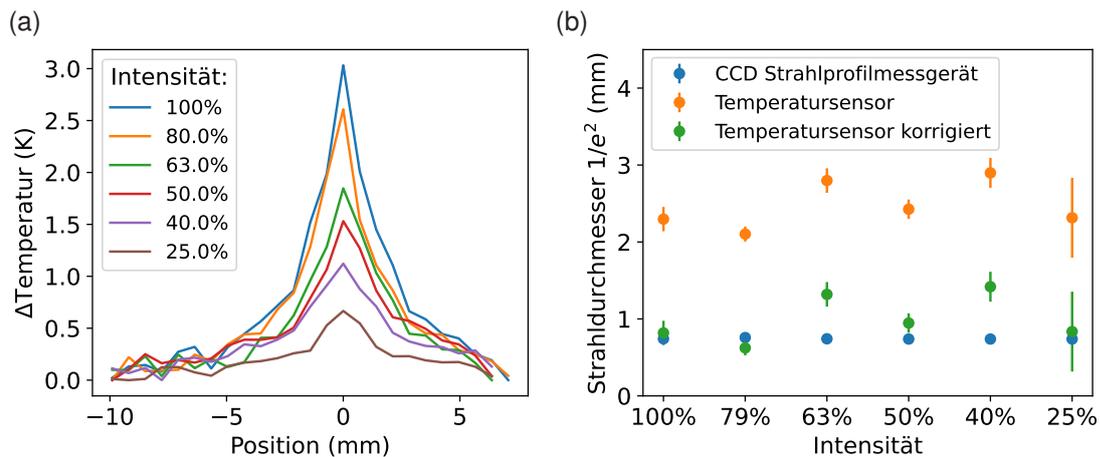
der Messgenauigkeit dar. Die erhöhte Abweichung bei kleinen Strahldurchmessern wird allerdings nicht berücksichtigt.

Die erhöhte Abweichung bei kleinen Strahldurchmessern wird allerdings nicht berücksichtigt. Anstelle einer linearen Regressionsfunktion kann dieses Verhalten durch die Verwendung von  $f(x) = x - (a + b/e^x)$  mitberücksichtigt werden. In Abbildung 6.14 ist das Ergebnis nach der Anwendung der Korrektur dargestellt. Offensichtlich wird bei der Methode die Abweichung bei kleinen Strahldurchmessern wesentlich besser kompensiert. Die mittlere Abweichung zur Referenzmessung sinkt dadurch auf  $\pm 0,02 \text{ mm}$ . Der Fehler bei der Bestimmung des Laserstrahldurchmessers mit dem Temperatursensor-Array lässt sich somit bei kleinen Strahlgrößen auf unter 10 % reduzieren. Wird eine Kalibrierung nach dem Vorbild der vorgestellten Methoden auf das Temperatursensor-Array angewendet, ist es möglich selbst Strahlgrößen unterhalb des lateralen Auflösungsvermögens zu detektieren und zu vermessen. Die Messgenauigkeit nimmt bei Strahldurchmessern oberhalb von 1 mm deutlich zu und die Abweichung sinkt in den unteren einstelligen Prozentbereich.

#### 6.4.2.2 Einflussgröße: Laserstrahlintensität

Um die Abhängigkeit der Laserintensität auf die Temperaturverteilung im Temperatursensor-Array zu untersuchen, wird bei konstanter Strahlgröße die einfallende Intensität variiert. Die zuvor ermittelte Laserstrahlgröße sollte möglichst unabhängig von der Laserintensität sein. Dazu werden die im Messaufbau (siehe Kapitel 6.4.2.1) in einem Filterrada verbauten Neutralsichtfilter verwendet. Die zuvor für die Variation der Laserstrahlgröße eingesetzte Linse, wird aus dem Strahlengang entfernt und der Abstand zwischen Laser und Sensor für alle Messungen konstant belassen. Die Neutralsichtfilter sind durch Angabe der optischen Dichte charakterisiert. Der Zusammenhang zwischen optischer Dichte (OD) und Transmission (T) ist definiert als  $T = 10^{-OD}$ .

In Abbildung 6.15 (a) sind die gemessenen Temperaturprofile bei unterschiedlichen Strahlintensitäten dargestellt. Für die Messung wird der Laser bei einem Strahldurchmesser von etwa  $750 \mu\text{m}$  ohne Linse verwendet.



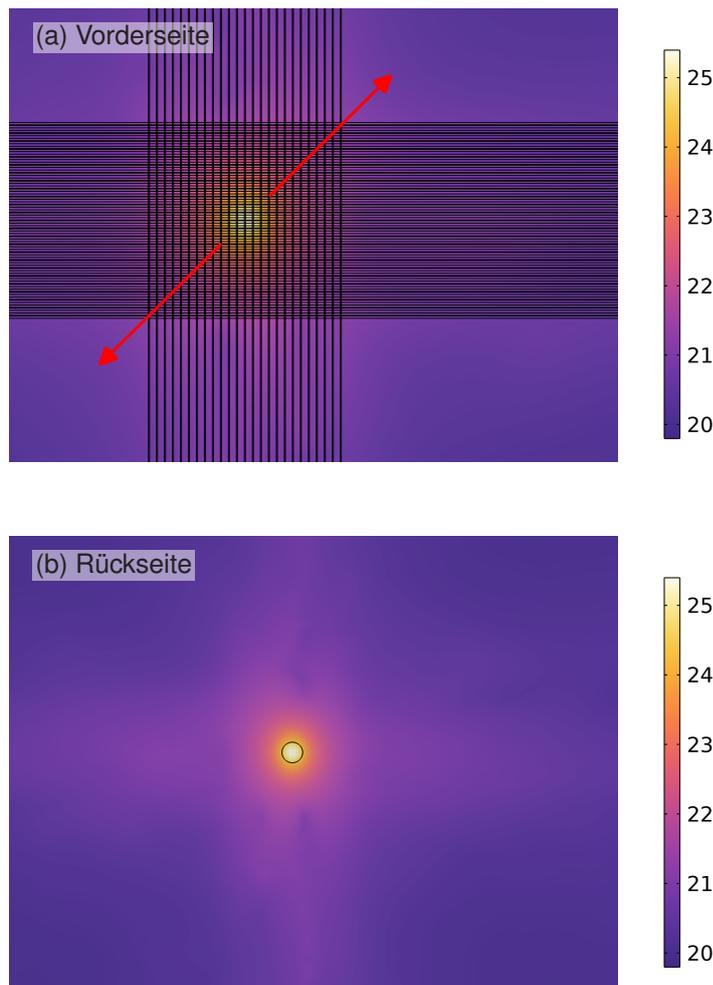
**Abbildung 6.15:** (a) Untersuchung der Auswirkungen der Laserstrahlintensität auf die gemessene Laserstrahlgröße. Für die Messung wird ein Laser mit 5 mW verwendet, wobei dies der Messung bei 100 % entspricht. Die maximal erreichte Temperatur korreliert dabei mit der eingestrahnten Energie. (b) Aus den Temperaturprofilen wird die Strahlgrößen mit Hilfe der Wärmeleitungsgleichung (siehe 6.5) bestimmt und zu Vergleichszwecken eine Referenzmessung mit einem Strahlprofilmessgerät durchgeführt. Durch Anwendung des zuvor ermittelten konstanten Korrekturwerts (siehe Kapitel 6.13), kann eine gute Übereinstimmung zwischen Referenzmessung und Messung mit dem Temperatursensor-Array erzielt werden.

Die maximal gemessene Temperatur sowie die Breite des Temperaturprofils sind dabei korreliert mit der gewählten Strahlintensität. Um eine mögliche Auswirkung auf den gemessenen Strahldurchmesser zu untersuchen, wird die zugrundeliegende Strahlgröße ebenfalls mithilfe der WLG 6.5 berechnet. Da lediglich die Intensität variiert wird, sollten die berechneten Strahldurchmesser konstant bleiben. Die ermittelten Strahldurchmesser sowie die Referenzmessung beziehen sich auf einen Intensitätswert von  $1/e^2$ . Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.15 (b) aufgetragen. Für die Referenzmessung wird ein Strahlprofilmessgerät (BC106N-VIS/M - CCD Camera Beam Profiler, Thorlabs, Inc.) verwendet. Der ermittelte Strahldurchmesser bei der Referenzmessung ist erwartungsgemäß unabhängig von der Strahlintensität. Im Schaubild liegen die Messpunkte alle auf einer Linie und zeigen lediglich leichte Messschwankungen. Die Messung mit dem Temperatursensor-Array weist größere Schwankungen auf. Werden allerdings alle Intensitätswerte betrachtet, lässt sich auch hier ein konstantes Verhalten vermuten. Wird der Versatz zwischen Temperaturmessung und Referenz mithilfe der linearen Wertekorrektur gemäß Abbildung 6.13 kompensiert, zeigen nur die Messwerte für eine Intensität von 40 % und 63 % eine größere Abweichung zur Referenz. Die übrigen Messwerte zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Referenzmessung. Die beobachteten Schwankungen lassen sich durch eine Verschiebung des Laserpunktes auf dem Sensorarray erklären, die durch beim Wechsel des Neutraldichtefilters mit dem Filterrad zustande kommt. Aufgrund der des begrenzten lateralen Auflösungsvermögens spielt die Position, sowie die Größe des Laserstrahls eine wichtige Rolle. Mit abnehmender Intensität nimmt außerdem die Ausprägung des Wärmeprofils ab, sodass das Messsignal im Messrauschen untergeht und die Regressionsanalyse fehlschlägt. Abgesehen von den beobachteten Schwankungen kann unter Berücksichtigung des Korrekturwertes eine präzise Messung der Laserstrahlgröße mit dem Temperatursensor-Array unabhängig von der Laserintensität durchgeführt werden. Die mittlere Abweichung beträgt somit  $\pm 0,25$  mm. Allerdings ist die Messung im Vergleich zur Analyse mit einem Strahlprofilmessgerät einer größeren Messwertschwankung unterworfen. Werden hohe Strahlintensitäten und/oder ein großer Strahldurchmesser verwendet, ist geht der Messfehler dagegen zurück.

### 6.4.3 Simulation

Als Vergleich zu den durchgeführten Messungen wird das Temperaturverhalten des Temperatursensor-Arrays unter Einfluss eines Laserstrahls in *COMSOL Multiphysics*® simuliert. Bei *COMSOL* handelt es sich um eine Simulationsumgebung, bei der verschiedene physikalische Vorgänge untersucht werden können. Je nach Fragestellung werden die passenden Pakete zum gewünschten physikalischen Zusammenhang in das Programm geladen. Die Problemstellung wird mithilfe eines mathematischen Modells beschrieben und die zugrundeliegenden Differentialgleichung (DGL) gelöst. Zunächst muss allerdings die zu untersuchende Geometrie in *COMSOL* modelliert werden. Um die Komplexität zu reduzieren und eine Lösung der DGLs zu ermöglichen, wird die sogenannte Finite-Elemente-Methode angewendet. Dazu wird die Geometrie in kleine und einfache Formen diskretisiert. Die Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Elementen werden als Knoten bezeichnet. Die Elemente sowie die Knoten bilden schließlich ein sogenanntes Netz. Als Formen zur Vereinfachung werden in der Regel Quader oder Tetraeder verwendet. Für jedes Element werden daraufhin eigenständige DGLs generiert und unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen, die Gleichungssysteme gelöst. Die Ergebnisse werden schließlich analysiert und visualisiert. Um das Temperatursensor-Array zu simulieren wird die Sensorstruktur in *COMSOL* nachgebaut. Um die Komplexität und den Rechenaufwand zu reduzieren, werden einige Vereinfachungen vorgenommen. Da vor allem die Wärmeausbreitung im Bereich des Sensors relevant für die Temperaturmessung ist, wird nur die Sensorstruktur bestehend aus dem PEN Substrat, den 25x25 Silberelektroden, sowie der dazwischenliegenden Thermistorschicht modelliert. Die Elektroden werden als gerade Linien bis zu den Rändern der Sensorfolie gezogen. Aufgrund des Abstands der außenliegende Zuleitungsstruktur zur eigentlichen Sensorstruktur wird diese vollständig vernachlässigt. Für die Berechnung der Wärmeleitung in den verschiedenen Schichten mussten die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien in *COMSOL* hinterlegt werden. Dafür sind Werte für die Materialdichte, Wärmeleitung und die Wärmekapazität erforderlich. Für PEN und das gedruckte Silber werden die Parameter von Vollmaterial verwendet. Im Fall des gedruckten Silbers werden die Werte somit überschätzt, da aufgrund der porösen Struktur des gesinterten Silbers von einer geringeren Wärmeleitfähigkeit und -kapazität ausgegangen werden muss. Für das Thermistorschicht können die Parameter auf Grundlage von einem thermoplastischem Material lediglich abgeschätzt werden.

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 6.16 jeweils ein Ausschnitt der Vorder- und Rückseite des modellierten Sensors in *COMSOL* dargestellt. Die Vorderseite (a) zeigt die Sensorstruktur. Die Struktur im Sensorbereich entspricht von den Schichtdicken und den Strukturgrößen den Maßen des tatsächlich hergestellten Sensors. In Abbildung 6.16 (b) ist die Rückseite des Substrats mit einer kreisförmigen Wärmequelle dargestellt, welche der Position des Laserstrahls bei den zuvor durchgeführten Messungen entspricht. Der Wärmequelle ist eine gaußförmige Intensitätsverteilung zugeordnet, was der üblichen Intensitätsverteilung eines Laserstrahls entspricht. In den Abbildungen ist die Temperatur als Farbcode dargestellt, wobei eine hellere Farbe einer höheren Temperatur entspricht. An der Position der Wärmequelle bzw. des Laserstrahls wird die höchste Temperatur erreicht, welche sich radial in alle Richtungen ausbreitet. Eine verstärkte Wärmeausbreitung ist entlang der Sensorstruktur bzw. der Elektroden beobachtbar. Die bei der Vermessung des Laserstrahls festgestellte sternförmige Temperatureausbreitung (siehe Kapitel 6.4.2) in horizontaler und vertikaler Richtung, ist daher vermutlich nicht nur auf die bei der Passivmatrix auftretenden parasitären Ströme zurückzuführen, sondern auch auf die Wärmeleitung entlang der Silberelektroden. Die Hauptursache für den Effekt sind aber wohl trotzdem die parasitären Ströme in der Matrix. Dies zeigt sich auch bei späteren Messungen mit der angepassten Ausleseelektronik bei denen keine sternförmige Temperaturverteilung mehr beobachtet werden konnte. Dabei werden die parasitären Ströme durch die Ausleseelektronik gezielt unterdrückt und somit eine Verfälschung der Messung verhindert. Um die Simulationen als Vergleichsstudie zu den zuvor durchgeführten Laserexperimenten (siehe Kapitel 6.4.2) zu verwenden, werden die Parameter in der Simulation für die Laserleistung und den Strahldurchmesser entsprechend dem Experiment gewählt. Die Intensität wird



**Abbildung 6.16:** Um das Temperaturverhalten des Temperatursensor-Arrays unter dem Einfluss einer punktförmigen Wärmequelle zu untersuchen, wird die Struktur des Sensorarrays in vereinfachter Form in *COMSOL Multiphysics*® nachgebildet. In Abbildung (a) ist die Vorderseite des Temperatursensor-Arrays dargestellt. Dabei wird die Passiv-Matrix-Struktur bestehend aus 25x25 Elektroden inklusive der dazwischenliegenden Thermistorschicht auf einem PEN Substrat modelliert. Wie bei der realen Messung werden die Messdaten entlang der roten Pfeile in der Diagonalen exportiert. (b) Die Abbildung zeigt die Rückseite der Sensorfolie und die simulierte punktuelle Wärmequelle eines Lasers mit gaußförmigen Intensitätsprofil.

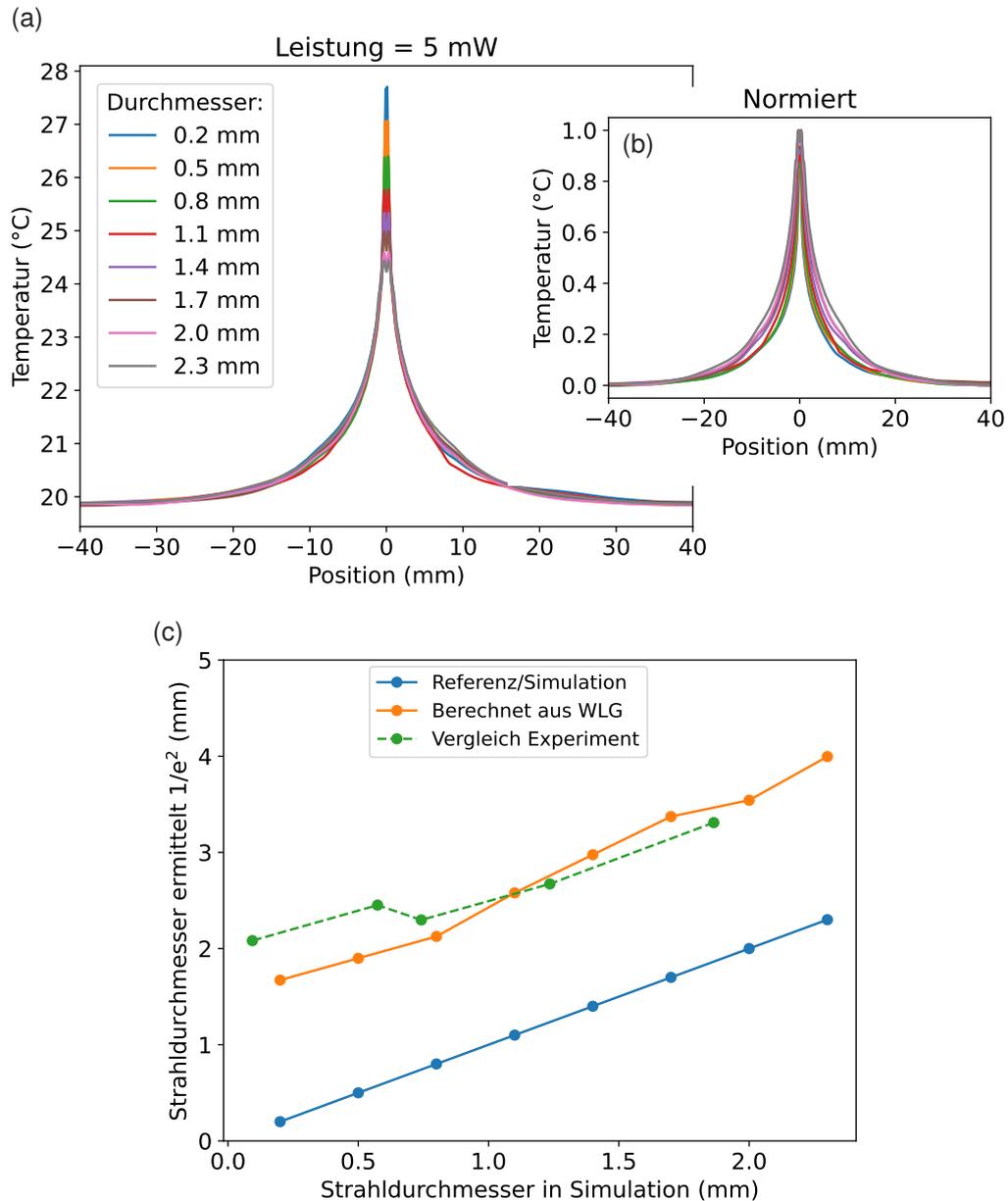
zwischen 1 mW bis 6 mW in 1 mW Schritten variiert. Um die Änderung der Strahlgröße mit einer Linse nachzuahmen, werden Strahldurchmesser zwischen 0,2 mm und 2,3 mm in 0,3 mm Schritten simuliert. Die generierten Daten aus der Simulation werden auf vergleichbare Weise zur realen Messung exportiert und analysiert. Das heißt die Datenpunkte werden entlang der Diagonalen zum Sensorarray aus den Datensätzen exportiert. In Abbildung 6.16 (a) ist dies durch zwei rote Pfeile angedeutet. Zur Auswertung und Bestimmung der Strahlgröße aus dem Temperaturprofil wird die in Kapitel 6.4.1 hergeleitete WLG 6.5 verwendet.

Allerdings wird bei der Anwendung der WLG bei der Regressionsanalyse auf die simulativ erzeugten Daten eine schlechtere Übereinstimmung zwischen Messdaten und Regressionsfunktion erzielt. Verschiedene Ursachen für diese Tatsache kommen in Frage: 1) Die Materialparameter der gedruckten Schichten konnten für die *COMSOL* Simulation nur abgeschätzt werden, sodass die tatsächlich auftretende Wärmeleitung im Temperatursensor-Array womöglich über-/unterschätzt wird. 2) Die hergeleitete WLG 6.5 ist ebenfalls nur eine vereinfachte Form, die lediglich eine Materialschicht berücksichtigt und damit eine Diskrepanz zum Mehrschichtsystem des Sensorarrays aufweist. 3) Die Datenpunktdichte ist bei den Messungen mit dem Sensorarray im Vergleich zur Simulation erheblich geringer. Beim direkten Vergleich der simulierten

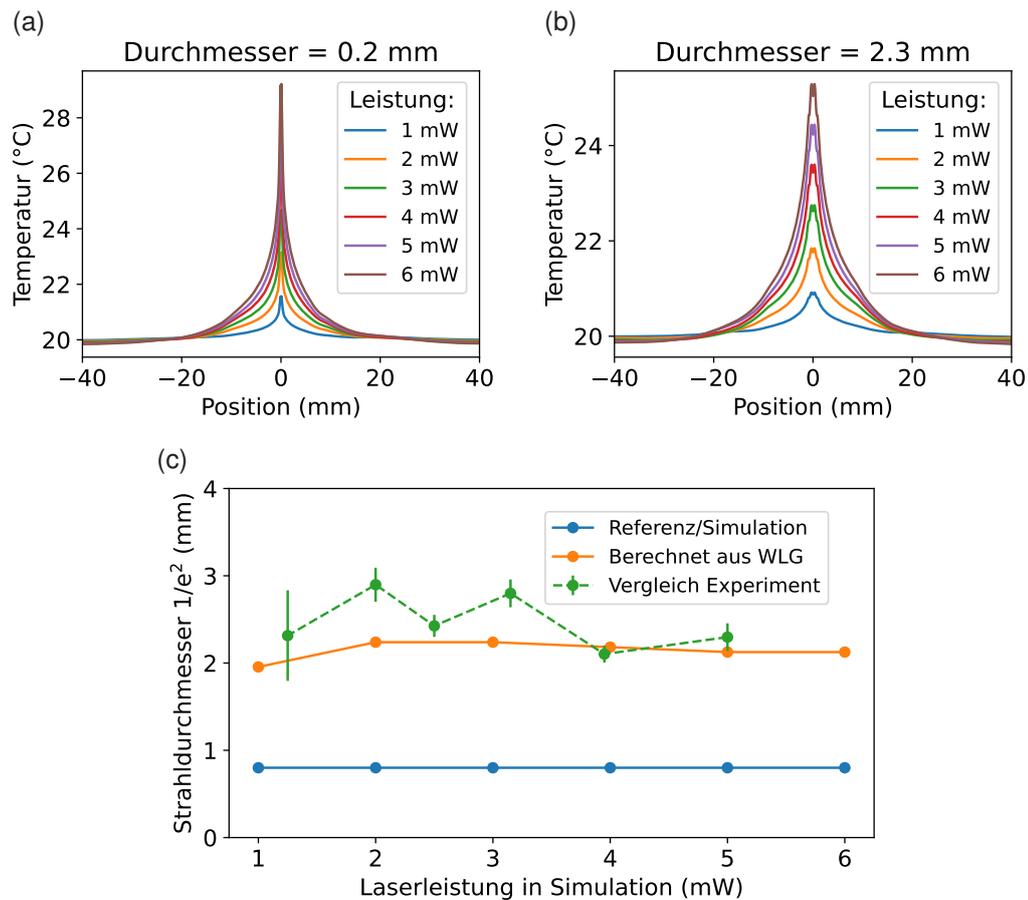
Temperaturprofile mit den gemessenen Temperaturprofilen kann bei den experimentellen Daten bei gleicher Intensität und initialer Strahlgröße, eine spitzere Form und eine höhere maximale Temperatur beobachtet werden.

Zunächst wird die Laserstrahlgröße variiert und die Temperaturverteilung im Temperatursensor-Arrays simuliert. Die Abbildungen 6.17 (a) und (b) zeigen das Temperaturprofil für eine konstante Laserleistung von 5 mW. Beim kleinsten Strahldurchmesser wird der Laserstrahl am stärksten fokussiert, weshalb hier die höchste Temperatur und das am spitzesten zulaufende Temperaturprofil aufweist. Mit zunehmender Strahlbreite kommt es zu einer Verbreiterung im Bereich der Temperaturspitze, wobei ebenfalls die maximale Temperatur abnimmt. Diese Tatsache beruht auf dem Zusammenhang der eingestrahlten Leistung pro Fläche, also der Intensität. Wird das Ergebnis wie in Abbildung 6.17 (b) normiert, äußert sich die zunehmende Strahlgröße in einer allgemeinen Verbreiterung des Temperaturprofils über den gesamten Verlauf. Um die Simulationsergebnisse mit der Messung zu vergleichen, werden die Temperaturverläufe ebenfalls mit durch eine Regressionsanalyse mit der zuvor verwendeten WLG 6.5 ausgewertet. Dazu werden in Schaubild 6.17 (c) die aus der Simulation berechneten Strahlgrößen gegen die Referenz aufgetragen. Als Referenz dient der in *COMSOL* vorgegebene Strahldurchmesser. Zwischen Referenz und berechneter Strahlgröße kann wie beim Experiment ein Versatz festgestellt werden. Beim Vergleich zwischen Simulation und Experiment (siehe Abbildung 6.12) zeigt sich, dass sowohl die bei der Simulation berechnete Strahlgröße als auch der dabei beobachtete Versatz zur Referenz zu einem vergleichbaren Ergebnis führt. Wird mit den simulativ erzeugten Daten eine lineare Regression berechnet und diese mit den experimentellen Messdaten verglichen, ergibt sich lediglich eine mittlere Abweichung von  $\pm 0,14$  mm. Im Gegensatz zum Experiment konnte bei der Simulation bei kleinen Strahlgrößen keine Zunahme beim Versatz festgestellt werden. Diese Tatsache unterstützt die Annahme, dass diese Zunahme beim Sensor auf das limitierte laterale Auflösungsvermögen zurückzuführen ist. Dieser Einflussfaktor spielt bei der Simulation allerdings keine Rolle. Hierbei ist vielmehr die gewählte Netzdichte bei der Simulation und der daraus resultierenden Datenpunktdichte beim Export entscheidend. Der Datenpunktabstand variiert aufgrund der Netzanordnung etwas, liegt aber meist bei unter  $< 0,1$  mm.

Im nächsten Schritt wird die Laserleistung bei gleichbleibendem Strahldurchmesser variiert und ebenfalls die Auswirkungen auf das Temperaturprofil untersucht. Wie beim tatsächlichen Experiment (siehe Kapitel 6.4.2.2), sollte der berechnete Strahldurchmesser unabhängig von der Laserleistung sein. Zunächst sind in den Abbildungen 6.18 (a) und (b) die simulierten Temperaturprofile für einen Strahldurchmesser von 0,2 mm bzw. 2,3 mm dargestellt. Unabhängig von der Strahlgröße skaliert die erreichte maximale Temperatur sowie die Breite des gesamten Profils mit der gewählten Strahlintensität. Wie im Experiment wurde die Strahlgröße mit Hilfe der WLG 6.5 (siehe Kapitel 6.4.1) ermittelt. Beim Vergleich von (a) und (b) zeigt sich die Auswirkung der Strahlgröße hauptsächlich in der Form der Profilspitze sowie in der gesamten Profildbreite. Insbesondere kommt es bei einem Strahldurchmesser von 2,3 mm in der Spitze zu einer plateauartigen Ausprägung, ganz im Gegensatz zu dem spitz zulaufenden Profil bei kleinen Strahldurchmessern. In Abbildung 6.18 (c) ist die berechnete Strahlgröße sowie die bei der Simulation vorgegebene Strahlgröße bei unterschiedlichen Laserleistungen aufgetragen. Als Referenzgröße ist ein konstanter Strahldurchmesser von 0,8 mm gewählt, welcher in etwa der Laserstrahlgröße beim Experiment entspricht. Der berechnete Strahldurchmesser bleibt, abgesehen von einer kleinen Schwankung, konstant und weist einen Mittelwert von  $2,14 \pm 0,10$  mm auf. Werden die Ergebnisse aus dem Experiment hinzugenommen (siehe Kapitel 6.15) und mit dem Mittelwert aller Strahldurchmesser aus der Simulation verglichen, zeigt sich sowohl im Verlauf als auch in der Größenordnung des berechneten Strahldurchmessers eine gute Übereinstimmung. Die mittlere Abweichung zwischen Experiment und Simulation beträgt dabei lediglich  $\pm 0,33$  mm. Allerdings weist die Messung mit dem Temperatursensor-Array eine stärkere Schwankung auf, die bei geringerer Laserleistung zunimmt. Entsprechend kann mit der Einführung eines Korrekturwerts, wie in Kapitel 6.4.2.1 bei der Auswertung der Messergebnisse vorgeschlagen, der Versatz zwischen berechneter Größe und Referenz auch in der Simulation kompensiert werden.



**Abbildung 6.17:** Die Schaubilder zeigen die Simulationsergebnisse zur Abhängigkeit des Temperaturprofils von der Laserstrahlgröße. (a) Bei konstanter Intensität äußert sich die Variation der Strahlgröße in der maximalen Temperatur, sowie in der Breite der Profilspitze. (b) Werden die Temperaturprofile normiert, zeigt sich eine Verbreiterung bei zunehmenden Strahldurchmesser. (c) Um eine Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Messung herzustellen, werden die simulativ ermittelten Temperaturprofile ebenfalls mit Wärmeleitungsgleichung (siehe Gleichung 6.5) analysiert und die berechnete Strahlgröße gegen die Referenzgröße aufgetragen. Als Vergleich sind die experimentell gewonnenen Datenpunkte eingetragen.



**Abbildung 6.18:** Abbildungen (a) und (b) zeigen die simulativ ermittelten Temperaturverläufe für zwei verschiedene Laserstrahlgrößen. Dazu wird die Leistung zwischen 1 mW und 6 mW variiert. Bei konstanter Strahlgröße skaliert die Temperatur mit der gewählten Laserleistung. Werden (a) und (b) verglichen, äußert sich die gewählte Strahlgröße vor allem in der Breite und Form der Temperaturprofils, sowie in der maximal erzielten Temperatur. (c) Das Schaubild zeigt die mit der Wärmeleitungsgleichung (siehe Kapitel 6.4.1) berechneten Strahlgrößen für unterschiedlichen Laserleistungen. Als Simulationseingangsparameter für den Strahldurchmesser wird 0,8 mm gewählt, welcher somit vergleichbar ist zum verwendeten Laser im Experiment. Die Datenpunkte der Messung sind ebenfalls zu Vergleichszwecken im Schaubild dargestellt.

Mit Hilfe der Simulation können somit sowohl das Verhalten des Temperatursensor-Arrays als auch die im Experiment gewonnenen Ergebnisse validiert werden. Dies zeigt sich an einer guten Übereinstimmung der jeweils mit WLG 6.5 berechneten Strahlgrößen bei Simulation und Experiment. Der beobachtete Versatz zwischen berechneter Strahlgröße und Referenz ist in beiden Fällen ähnlich groß. Durch eine Optimierung bzw. bessere Anpassung der WLG 6.5 an das Problem könnte eventuell bereits bei der Regressionsanalyse ein besseres Ergebnis erzielt werden und eine nachträgliche Korrektur überflüssig machen. Bei der Auswertung der Temperaturprofile mit der WLG zeigt sich zwischen Experiment und Simulation eine Diskrepanz im Maß der Übereinstimmung von Regressionsfunktion und Datensatz. Die WLG erzielt bei den experimentellen Messdaten eine sehr gute Übereinstimmung, wobei dies womöglich mit der limitierten lateralen Auflösung des Temperatursensor-Arrays zu erklären ist. Hingegen erreicht die Regressionsfunktion bei den Simulationsdaten, insbesondere bei kleinen Strahldurchmessern, in den Profilspitzen nur eine mäßige Übereinstimmung. Eine Verbesserung des Auswerteverfahrens könnte daher die Messgenauigkeit des Temperatursensor-Arrays im Zusammenhang mit einem Laserstrahl erhöhen.

## 6.5 Zusammenfassung

Für die Entwicklung eines lateral hochaufgelösten Temperatursensor-Arrays werden verschiedene Sensor-konzepte und Materialien ausprobiert. Um die angestrebten Sensordichte zu erzielen wird eine Passiv-Matrix-Struktur verwendet, die sich aufgrund der einfachen Struktur gut für die Herstellung im Druckverfahren eignet. Zur Herstellung wird ein hybrides Herstellungsverfahren entwickelt, welches aus Siebdruck und Aerosol-Jet-Druck besteht. Damit ist nicht nur eine robuste und materialoffene Herstellung möglich, sondern es kann hohes Auflösungsvermögen mit einer schnellen Drucktechnik kombiniert werden. Zur Kontaktierung des Sensorarrays werden im Siebdruckverfahren 25x25 Zuleitungen in Silber gedruckt. Die Herstellung des eigentlichen Sensorarrays erfolgt auf dem Aerosol-Jet-Drucker und ermöglicht sowohl kleine Strukturgrößen als auch eine große Materialauswahl. Dies ist insbesondere bei der Suche nach einem geeigneten Thermistormaterial von Vorteil. In drei Einzelschritten wird die Sensorstruktur aufgebaut, bestehend aus den etwa 60 µm breiten Silberelektroden und der dazwischenliegenden Thermistorschicht. Das hergestellte Temperatursensor-Array besteht aus 625 Sensorelementen auf einer Fläche 12 mm x 12 mm. Zur Charakterisierung wird ein speziell entwickelter Temperaturmessplatz verwendet, der neben der reinen Messung auch die Kalibrierung des Temperatursensor-Arrays ermöglicht. Bei der Kalibrierung wird der mathematische Zusammenhang von Widerstand und Temperatur bestimmt und im Anschluss zur Umrechnung der gemessenen Widerstandswerte in die Temperatur genutzt. Nach erfolgter Kalibrierung beträgt die Abweichungen zwischen berechneter Temperatur und Referenzsensor < 1 °C. Das Temperatursensor-Array kann folglich zur Darstellung eines induzierten Temperaturprofils verwendet werden. Mit Hilfe eines Laserstrahls wird lokal Wärme im Sensorarray induziert und durch Messung der Temperaturverteilung die Strahlgröße des Lasers berechnet. Dazu wird eine Regressionsanalyse unter Verwendung der stationären WLG durchgeführt und die dabei ermittelten Regressionsparameter zur Berechnung und Rekonstruktion des ursprünglichen Laserstrahls genutzt. Um den Zusammenhang zwischen Strahlgröße, Strahlintensität und induziertem Temperaturprofil zu untersuchen, werden die Parameter in einer Messreihe variiert. Dabei lässt sich ein Versatz zwischen dem berechneten Strahldurchmesser und der Referenzgröße festgestellt. Eine Ursache ist vermutlich auf die limitierte Sensorauflösung zurückzuführen und bewirkt bei kleinen Strahldurchmessern eine weitere Zunahme der Abweichung. Durch die Einführung eines Korrekturwertes kann dieser Versatz allerdings kompensiert werden. Unter Berücksichtigung dieses Korrekturfaktors, kann schließlich eine präzise Messung des Strahldurchmessers mit dem Temperatursensor-Array durch die Auswertung des Temperaturprofils erreicht werden. In der Simulationsumgebung *COMSOL* werden die Ergebnisse der Messreihe simulativ überprüft. Dazu wird die Struktur des Sensorarrays in einer leicht vereinfachten Form nachgebaut. Zur Vergleichbarkeit werden die im Experiment gewählten Parameter für die Strahlgröße und -intensität für die Simulation als Parameterraum angenommen. Die Berechnung der Strahlgröße aus den simulativ ermittelten Temperaturprofilen wird ebenfalls mit der stationären WLG durchgeführt und ist somit vergleichbar mit der Vorgehensweise beim Experiment. Bei der Auswertung konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment gefunden werden. Ein ähnliches Verhalten zeigte sich auch bei Abweichung und Versatz zwischen berechneter Strahlgröße und Referenz. Somit ist die präzise Bestimmung des Durchmessers eines Laserstrahls, unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors bzw. einer Korrekturfunktion, möglich. Eine bessere Anpassung der WLG an das Temperatursensor-Array birgt das Potential die Messung weiter zu verbessern und auf eine nachträgliche Korrektur der Ergebnisse verzichten zu können. Grundsätzlich lassen sich aus dem Temperaturprofil nicht nur die Strahlgröße, sondern auch Rückschlüsse auf die Strahlintensität ziehen.

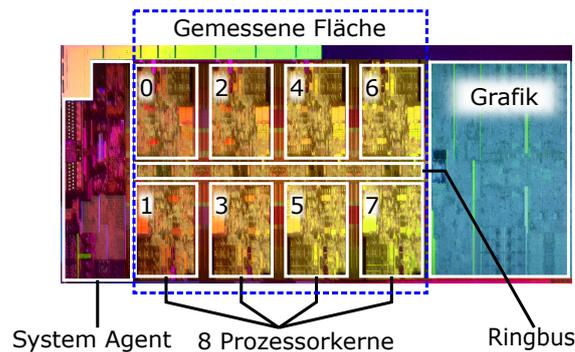
## 7 Untersuchung der Temperaturverteilung eines Mikroprozessors

*Informationen über das Temperaturverhalten eines Computerprozessors geben viel über deren Auslastung, Art der Benutzung und den deren Zustand preis. Aus diesem Grund besitzen heutige Prozessoren bereits integrierte Temperatursensoren. Da die Integration im Siliziumchip teuer ist und Teile des ohnehin limitierten Platz verbraucht, wird die Anzahl der Sensoren auf ein erforderliches Minimum reduziert. In diesem Kapitel soll eine modifizierte Version des vorgestellten vollständig gedruckten Temperatursensor-Arrays zur Detektion der Temperaturverteilung auf einem Computerprozessor genutzt werden. Neben der Anpassung des Sensor, sind kleine Veränderungen am Computersystem notwendig. Die Verwendung des Temperatursensor-Arrays soll die Darstellung einer hochauflösten Temperaturverteilung der Prozessorkomponenten ermöglichen. Die hier präsentierten Ergebnisse beziehen sich auf [1].*

### 7.1 Temperaturüberwachung von Prozessoren/Mikrochips

Die Kombination aus einer hohen Sensordichte, einer flachen Bauweise und der Option zur Messung einer lateralen Temperaturverteilung macht das vorgestellte Temperatursensor-Array prädestiniert zur Überwachung von elektrischen Schaltungen, Prozessoren und Mikrochips. Selbst bei einer nachträglichen Integration des Sensorarrays in ein System sind nur kleine Modifikationen nötig. Außerdem erlauben die eingesetzten Druckverfahren eine einfache Anpassung der Sensorstruktur an die Gegebenheiten der zu vermessenden Elektronik. Bei einer aktuellen Computerprozessor - *Central Processing Unit* (CPU) ist die Temperaturüberwachung aufgrund der hohen Leistungsdichte essentiell für den stabilen und sichern Betrieb geworden. Standardmäßig sind Temperatursensoren fest in neuralgischen Baugruppen einer CPU integriert [152, 153]. Neben der Nutzung zur Leistungsüberwachung und -optimierung gewinnt die Temperaturnachverfolgung auch zunehmend an Bedeutung für die Cybersicherheit. Üblicherweise werden bei der Cybersicherheit Systemparameter, wie Nutzerdaten, Netzwerkkommunikation und Logs erfasst und auf Unregelmäßigkeiten analysiert. Inzwischen spielen aber auch physikalische Parameter wie Laufzeit, Energieverbrauch, Temperatur und elektromagnetische Abstrahlung bei der Erkennung von Cyberattacken ein wichtige Rolle [154, 155, 156]. Dies wird als Seitenkanalanalyse/-attacke (*Side-Channel-Analysis / -Attack*) bezeichnet. Eine schnelle Erkennung von Angriffen, erlaubt das zeitnahe Ergreifen von Gegenmaßnahmen und minimiert dadurch den verursachten Schaden.

Um Informationen über die Temperatur einer CPU zu erhalten, werden neben dem Auslesen der fest verbauten Temperatursensoren, auch Kamerasysteme oder das Kühlverhalten der verbauten Kühleinheit beobachtet [157]. Meist verfügen jedoch nur die Prozessorkerne über integrierte Temperatursensoren. Eine Erhöhung der Anzahl an Sensoren steht erhöhten Herstellungskosten, sowie gestiegenem Platzbedarf im Mikrochip gegenüber. Die räumliche Messauflösung ist somit stark limitiert, wodurch die lokale Erfassung der Temperatur nur ungenau erfolgen kann. Das Auslesen der internen Sensoren erfordert zudem den direkten Zugriff auf das System selbst. Bezogen auf den Aspekt der Cybersicherheit ergibt sich hierdurch die Gefahr, dass die

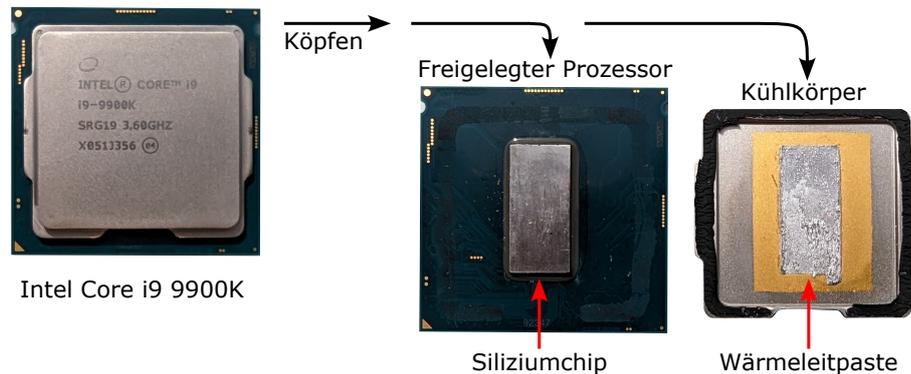


**Abbildung 7.1:** Für die Messung wird ein Intel Core i9 9900K verwendet, der verschiedene funktionale Einheiten im Siliziumchip beinhaltet. Diese sind in getrennten Sektoren auf der CPU angeordnet [158] und erwärmen sich unter Last lokal. In dieser Studie wird die Wärmeentwicklung der Prozessorkerne analysiert. Der gemessene Bereich ist durch einen blauen Kasten markiert. Die Abbildung wurde von [1] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.

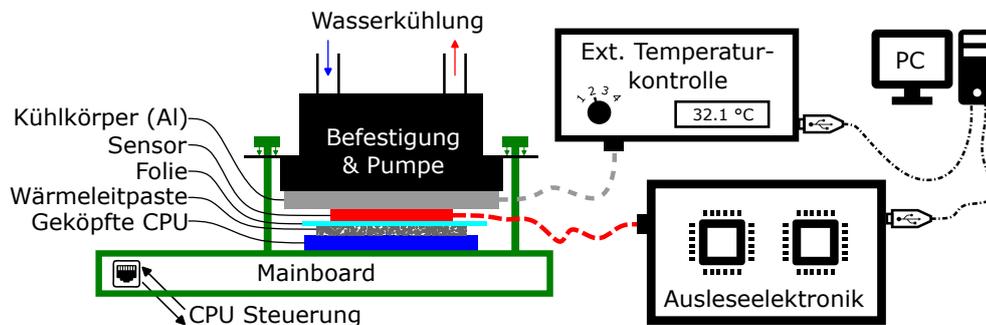
Überwachung ebenfalls manipuliert werden kann. Um eine manipulationssichere Erfassung der Temperaturcharakteristik eines Prozessor zu ermöglichen, sollte die Sensorik deshalb außerhalb der Computerkomponenten verbaut werden. Zur Verbesserung der Messgenauigkeit, muss der Temperatursensors unmittelbar auf dem Prozessor angebracht werden. Jede zusätzliche Materialschicht zwischen der Prozessoroberfläche und dem Sensor führt aufgrund der Wärmeleitung zu einer erhöhten Unschärfe der Temperaturverteilung. Die meisten Prozessoren benötigen für den stabilen Betrieb ein Kühlsystem zum Abführen der Wärme. Den vorhandenen Kühlkörper mit einer entsprechenden Temperatursensorik auszustatten, ist daher eine naheliegende Lösung für dieses Problem. Die kleine Bauform eines gedruckten Temperatursensors erfordert nur kleine Anpassungen an den bereits bestehenden Computerkomponenten, was die Umsetzung vereinfacht. Um die Systemunabhängigkeit zu gewährleisten zu können, wird eine externe Ausleseelektronik verwendet, welche speziell für die Sensorik entwickelt wird. Um die Temperaturüberwachung einer CPU zu realisieren, wird eine modifizierte Version des vorgestellten Temperatursensor-Arrays entwickelt. Der Sensor wird dazu an die Größe des Prozessorchips angepasst und bietet verglichen mit den fest verbaute Temperatursensoren eine stark gesteigerte laterale Auflösung. Hinzu kommt, dass die verwendete Drucktechnik prädestiniert für das Aufbringen der Sensorstruktur auf einem Kühlkörper ist und so eine einfache Systemintegration ermöglicht.

## 7.2 Messplatz und Modifikationen des Prozessors

Die zuvor entwickelte Sensorstruktur (siehe Kapitel 6) soll nun angepasst und zur Messung der Temperaturverteilung eines Computerprozessors genutzt werden. Das Temperatursensor-Array wird dafür speziell an die Maße der CPU angepasst. Eine CPU besteht meist aus einem Rechenwerk, einem Leitwerk, einem Speicher (Register) und den Datenleitungen (Bussen). Moderne Prozessoren verfügen zusätzlich über einen mehrstufigen Pufferspeicher (Cache) und besitzen eine interne Grafikeinheit. Je nach Aufgabenbereich und Leistungsanforderung haben die Einheiten einen stark unterschiedlichen Strombedarf, der sich in der generierten Abwärme widerspiegelt. Die Einheiten sind meist als funktionale Gruppe in abgegrenzten Bereichen auf dem Prozessorchip angeordnet. Um diese lokalisieren zu können, ist ein laterales Auflösungsvermögen notwendig. Für gewöhnlich haben kommerziell erhältliche CPUs einen fest verklebten Kühlkörper (*Heatspreader*), welcher der Kühlung und dem Schutz des Siliziumchips dient. Aufgrund der Wärmeleitung des Kühlkörpers würden beim Aufbringen des Temperatursensor-Arrays die lokalisierten Hitzequellen bei der Messung unscharf dargestellt werden. Aus diesem Grund wird wie in Abbildung 7.2 gezeigt, der original verbaute Kühlkörper von der CPU entfernt. Das sogenannte „Köpfen“ erfolgt mit einer Schraubhalterung. Diese verschiebt den verklebten Kühlkörper gegenüber dem Prozessor und löst somit die Klebeverbindung



**Abbildung 7.2:** Um eine unverfälschte Messung der Temperaturverteilung zu ermöglichen, wird der verklebte Kühlkörper (*Heatspreader*) vom Prozessor entfernt. Dies wird üblicherweise als „Köpfen“, bezeichnet. Im linken Bild ist der vollständige Intel Core i9 9900K CPU zu sehen. Auf dem Kühlkörper ist die Bezeichnung und der Standardbetriebstakt aufgedruckt. Nach dem Köpfen ist der Prozessor vom Kühlkörper getrennt und der Siliziumchip liegt frei. Die auf dem Siliziumchip verbliebene Wärmeleitpaste wird gründlich entfernt, um eine ebene und saubere Messoberfläche zu erhalten. Der Kühlkörper wird nicht mehr weiter benötigt.



**Abbildung 7.3:** Der Computerprozessor wird auf einem handelsüblichen Mainboard mit allen für den Betrieb nötigen Computerkomponenten verwendet. Das Temperatursensor-Array befindet sich unmittelbar auf der Unterseite des Kühlkörpers der Wasserkühlung. Zum Schutz des Sensors wird eine ultradünne Kunststofffolie auf den Sensor gelegt. Auf den Prozessor wird außerdem Wärmeleitpaste aufgetragen, um die Wärmeübertragung zu verbessern. Im Anschluss wird der Kühlkörper zusammen mit dem Sensor und der Folie auf den Prozessor gedrückt. Hierbei verteilt sich die Wärmeleitpaste gleichmäßig über den Siliziumchip. Zum externen regeln der Temperatur sind im Kühlkörper zwei Heizpatronen und ein Referenztemperatursensor eingelassen. Die Steuerung erfolgt über eine angeschlossene Kontrolleinheit. Die Ausleseelektronik ist über ein Flachkabel mit dem Sensor verbunden. Die Verarbeitung der anfallenden Daten und Steuerung des Aufbaus erfolgt an einem externen Computer. *Die Abbildung wurde von [1] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0.*

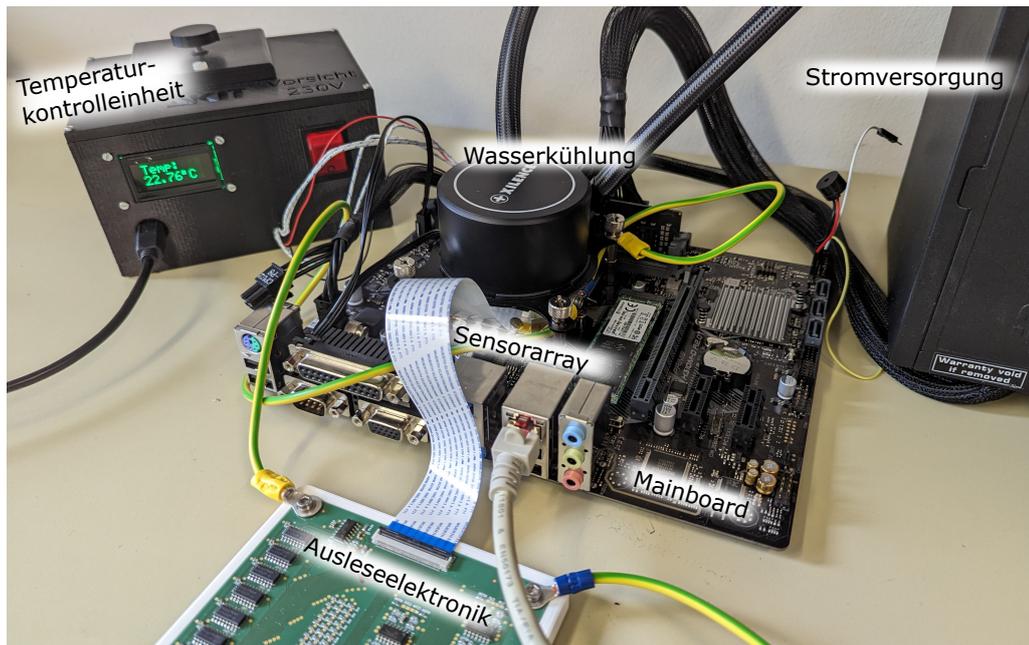
auf. Das Köpfen ist ein üblicher Vorgang um die Kühlung des Siliziumchips bei starker Übertaktung zu optimieren. Für die hier verwendete CPU sind die benötigten Werkzeuge im Zubehörhandel erhältlich. Beim Köpfen sollte der Kühlkörper nur langsam verschoben werden, um den Siliziumchip nicht abzureißen. Im Anschluss muss der freigelegte Siliziumchip in einem Reinigungsschritt gründlich von Überresten der verwendeten Wärmeleitpaste befreit werden. Dies erlaubt die flache, luftabschlussfreie Auflage des Sensorarrays auf dem Prozessor. Der entfernte Kühlkörper wird für die weitere Messung nicht mehr benötigt.

Bei der hier verwendeten CPU handelt es sich um einen Intel Core i9 9900K [159]. Für den Betrieb der CPU werden handelsübliche Computerkomponenten benutzt, die wie in Abbildung 7.3 verbaut sind. Da der normalerweise auf dem Prozessor verbaute Kühlkörper für die Messungen entfernt werden muss, können nicht die vorgesehenen Halteklammern des Mainboards (Prime H310M-D, ASUSTeK Computer Inc.) verwendet werden. Stattdessen wird die CPU über die Kühleinheit in Position gehalten und in die Halterung auf dem

Mainboard gepresst. Für die Durchführung der Messung wird Wärmeleitpaste auf den Prozessorchip aufgetragen um die Wärmeübertragung zum Sensor in den Kühlkörper zu verbessern. Zum Schutz des Sensors und zur Verhinderung von Kurzschlüssen durch den Kontakt mit dem elektrisch leitfähigen Prozessorchip wird eine 1,4 µm dicke Plastikfolie verwendet. Diese ist möglichst dünn, um einen Hitzestau und eine Drosselung des Prozessors zu vermeiden. Der Kühlkörper mit dem aufgedruckten Temperatursensor-Array ist mit der Wasserkühlung verschraubt. Eine detaillierte Beschreibung zum Aufbau und zur Herstellung des Temperatursensor-Arrays auf dem Kühlkörper ist im nachfolgenden Abschnitt 7.3 zu finden. Mithilfe der Befestigung der Wasserkühlung wird der Kühlkörper inklusive Sensor kopfüber auf den geköpften Prozessor gepresst und arretiert. Aufgrund des modifizierten Kühlkörpers muss die Länge der Arretierung angepasst werden. Als Betriebssystem wird die Linux Distribution CentOS 7 verwendet. Für die Messungen wird auf der CPU *UEFI Hyper-Threading* deaktiviert, wobei *Turbo Boost* aktiviert bleibt. Die Ansteuerung der Prozessorkerne erfolgt von einem externen PC über *SSH* in der Kommandozeile. Mithilfe von *stress-ng -matrix -l -t [Dauer in Sekunden] -taskset [ID des Kerns/der Kerne]* können die belasteten Kerne definiert und die Dauer bestimmt werden. Das Temperatursensor-Array wird über ein Flachbandkabel mit der Ausleseelektronik verbunden. Da für die Messung der Temperaturverteilung einer CPU eine hohe Auslesegeschwindigkeit erforderlich ist, wird eine neue angepasste Ausleseelektronik entwickelt. Diese wurde bereits in Kapitel 5.1.2 vorgestellt. Zur Kalibrierung des Temperatursensor-Arrays werden im Kühlkörper zwei Heizpatronen verbaut. Damit lässt sich das Sensorarray gezielt gleichmäßig beheizen. Währenddessen sollte der Prozessor ausgeschaltet bleiben. Die Kalibrierung erfordert einen Referenztemperatursensor (Pt100), der ebenfalls im Kühlkörper eingelassen ist. Im Vergleich zur zuvor verwendeten individuellen Kalibrierung (siehe Kapitel 5.2.1) wird hier eine gemittelte Kalibrierfunktion implementiert. Diese wird ausführlich in Kapitel 5.2.2 erläutert. Die Steuerung der Heizpatronen, sowie das Auslesen des Referenztemperatursensors erfolgt in einer selbst entwickelten externen Kontrolleinheit. Diese und die angepasste Ausleseelektronik sind beide mit einem getrennten Computer verbunden. Auf dem Computer werden die Daten erfasst und weiter verarbeitet, sowie die Steuerung des Messaufbaus vorgenommen. In Abbildung 7.4 ist der tatsächliche Messaufbau mit der benötigten Peripherie dargestellt.

### 7.3 Herstellung auf dem Prozessorkühlkörper

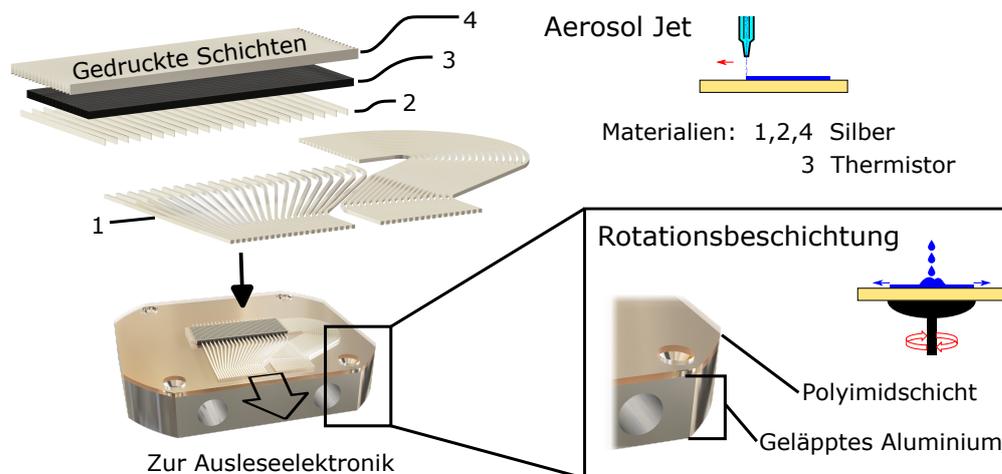
Um die Temperaturentwicklung eines Prozessors mit dem Temperatursensor-Array messen zu können, wird auf Grundlage des zuvor folienbasierten Sensorarrays (siehe Kapitel 6.1) eine speziell angepasste Sensorversion entwickelt. Dazu muss sich das Sensorarray möglichst gut in die in Kapitel 7.2 vorgestellte Messumgebung einfügen. Aus Anwendungs- und Platzgründen bietet sich die Herstellung des Sensorarrays auf dem Kühlkörper an. Für diesen Zweck muss der Kühlkörper jedoch modifiziert werden, um den Referenztemperatursensor und die zwei Heizpatronen für die Kalibrierung aufzunehmen. Gleichzeitig muss der Kühlkörper aber weiterhin mit der verwendeten Wasserkühlung kompatibel sein. Der modifizierte Kühlkörper wird aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit aus Aluminium gefertigt. In Abbildung 7.5 findet sich eine ausführliche Darstellung des Sensoraufbaus. Ein direktes Aufdrucken der Sensorstruktur ist allerdings nicht möglich, da die elektrische Leitfähigkeit des Aluminiums zu Kurzschlüssen im Sensoren führen würde. Des Weiteren sind die eingesetzten Tinten nicht für die Verwendung auf metallischen Oberflächen optimiert. Durch das Aufbringen einer ultradünnen Polyimidschicht unter der Verwendung eines Polyimidpräkursors können beide Probleme gelöst werden. Vorbereitend muss die Aluminiumoberfläche zunächst durch Lappen poliert werden, um ein Durchstoßen der Polyimidschicht durch Unebenheiten zu verhindern und die daraus potentiell resultierenden Kurzschlüsse zu verhindern. Für eine gute Haftung zwischen dem Aluminium und



**Abbildung 7.4:** Dargestellt ist der tatsächlich verwendete Messaufbau mit der zum Betrieb benötigten Peripherie. Zur Rauschreduzierung sind alle messrelevanten Komponenten auf ein gleiches Potential geerdet. Entnommen und angepasst von [1]; CC-BY 4.0

der Polyimidschicht wird der dazugehörige Haftvermittler (VM-651, HD Microsystems GmbH) verwendet. Zunächst wird das Konzentrat mit deionisiertem Wasser auf eine Konzentration von 0,1 % verdünnt. Anschließend wird 1 ml der Lösung auf den Kühlkörper pipettiert, verteilt und für 20 s stehengelassen. Die Lösung wird dann im Rotationsbeschichter bei  $500 \text{ U min}^{-1}$  für 90 s und schließlich bei  $1500 \text{ U min}^{-1}$  für 20 s trockengeschleudert. In Kapitel 3.2 ist eine kurze Beschreibung zur Funktion des Rotationsbeschichters zu finden. Direkt im Anschluss erfolgt die Auftragung des Präkursors (PI2611, HD Microsystems GmbH). Da dieser eine zähflüssige Konsistenz hat, wird mithilfe eines Spatels auf dem Kühlkörper aufgebracht und ganzflächig verteilt. Die Wahl der Rotationsgeschwindigkeit bestimmt maßgeblich die erzielte Schichtdicke. Dazu wird Kühlkörper im Rotationsbeschichter bei  $500 \text{ U min}^{-1}$  für 10 s und anschließend bei  $3500 \text{ U min}^{-1}$  für 30 s geschleudert. Nach dem auftragen der Schicht erfolgt ein zweistufiger Vortrocknungsschritt (*Soft bake*) bei  $90^\circ\text{C}$ , dann bei  $150^\circ\text{C}$  für jeweils 90 s. Im finalen Backschritt (*Hard bake*) wird der Präkursor in die eigentliche Polyimidschicht umgewandelt. Dafür wird die Probe in einem Ofen (LT 15/14, Nabertherm GmbH) mit  $4^\circ\text{C min}^{-1}$  auf  $350^\circ\text{C}$  hochgeheizt und für 30 min konstant gehalten. Die so erzeugte Polyimidschicht weist etwa eine Dicke von  $5 \mu\text{m}$  auf und besitzt eine Rauigkeit von weniger als 500 nm. Die thermische Isolation der Schicht sollte durch eine geringen Dicke möglichst gering gehalten und ein Hitze-stau im Prozessor verhindert werden. Der Kühlkörper mit Polyimidschicht ist schematisch in Abbildung 7.5 dargestellt.

Nach der Vorbereitung des Kühlkörpers folgt der Druck und die Herstellung des Temperatursensor-Arrays. Dieses besteht aus vier nacheinander gedruckten Schichten, die alle mit einem Aerosol-Jet-Drucker (Aerosol Jet 5X System, Optomec, Inc.) schrittweise von unten nach oben aufgebracht werden. Wie in Abbildung 7.5 dargestellt sind die vier Schichten: 1 - Zuleitungen; 2 - Untere Elektrode; 3 - Thermistorschicht; 4 - Obere Elektrode. Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus und der Verwendung des Aerosol-Jet-Druckers ist in Kapitel 3.1.2 zu finden. Im ersten Schritt werden die Zuleitungen zwischen Sensorarray und Flachbandkabel gedruckt. Im Gegensatz zu der folienbasierten Version erfolgt die Herstellung nicht partiell durch Siebdruck, sondern vollständig mittels Aerosol-Jet. Ist der Kühlkörper auf den Prozessor verschraubt, ist der limitierte



**Abbildung 7.5:** Das Temperatursensor-Array ist aus vier nacheinander gedruckten Schichten aufgebaut: 1 - Zuleitungen; 2 - Untere Elektrode; 3 - Thermistorschicht; 4 - Obere Elektrode. Alle Schichten werden mit dem Aerosol-Jet Verfahren aufgebracht. Zuvor muss der speziell angefertigte Aluminiumkühlkörper vorbereitet werden. Durch läppen wird die Oberfläche poliert und dann durch Rotationsbeschichtung mit einer dünnen Polyimidschicht elektrisch isoliert. Entnommen und angepasst von [1]; CC-BY 4.0

Platz zur Kontaktierung des Sensor mit dem Flachbandkabel ein Problem. Der Versuch das Flachbandkabel versenkt in den Kühlkörper einzulassen und zu verkleben, führte zu Rissbildung der Zuleitungen im Übergangsbereich zwischen Kabel und Kühlkörper. Aufgrund dessen wird das Flachbandkabel durch Aufpressen auf die Zuleitungsstruktur verbunden. Hierfür ist es ausreichend das Kabel zunächst mit Klebeband in der Position zu fixieren. Bei der Durchführung muss außerordentlich auf die Ausrichtung der Kontaktflächen von Zuleitungen und Kabel geachtet werden, da es sonst zu Kurzschlüssen zwischen den Leiterbahnen kommt. Im nächsten Schritt wird zunächst das Kabel mit einer Verschraubung auf den Kühlkörper gepresst und auf 100 °C geheizt. Dadurch wird das Kabelmaterial weich und „verbackt“ mit der Polyimidschicht des Kühlkörpers. Im Anschluss kann die Verschraubung gelöst werden, wobei ein zusätzliches Klebeband zur Stabilisierung der Verbindung ausreicht.

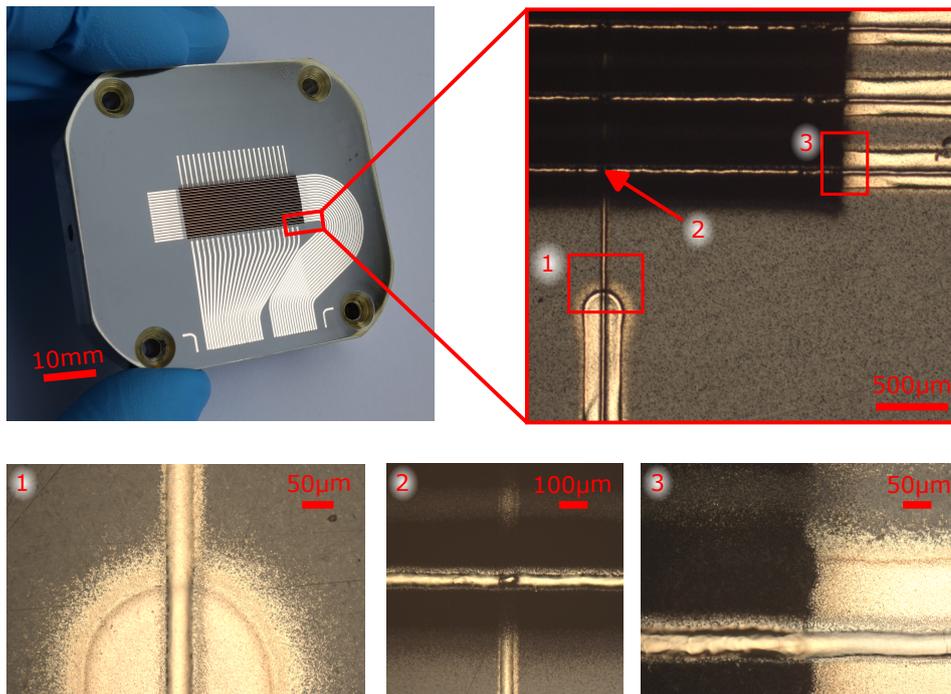
Die Anordnung der Kontaktflächen des Kabels definiert die Position der gedruckten Zuleitungen und die Abstandsperiode von 500 µm zwischen den Leiterbahnen. Außerdem sollen die Zuleitungen einen möglichst geringen Leitungswiderstand aufweisen. Es wird daher eine Linienbreite von < 300 µm angestrebt. Die zu überwachende CPU-Oberfläche weist eine Größe von 9 mm x 22 mm auf. Aufgrund einer limitierten Anzahl an verfügbaren Leiterbahnen (maximal 50 Stück), wird auf der x-Achse des Sensors eine Abstandsperiode von 1 mm und auf der y-Achse von 500 µm für die Elektroden gewählt. Somit weist der Sensor auf der x-Achse 22 und auf der y-Achse 18 Elektroden auf. Somit ergibt sich eine Gesamtzahl von 396 Sensorpixeln. Die Fertigung des Sensorarrays auf dem Prozessorkühler mittels des Aerosol-Jet-Verfahrens orientiert sich an der Produktion der Sensorfolie (siehe Kapitel 6.1). Eine detaillierte Darstellung des Aerosol-Jet-Druckers ist in Kapitel 3.1.2 zu finden. Für die Herstellung der Leiterbahnen kommt im Aerosol-Jet eine nanopartikuläre Silbertinte (JS-A221AE, NovaCentrix [125], siehe Kapitel 4.2.2) zum Einsatz. Um die gewünschte Linienbreite zu erzielen wird eine 600 µm Düse benutzt. Für die Vernebelung wird die Ultraschall-Tintenkartusche eingesetzt, mit 3 ml Silbertinte befüllt und die Ultraschallsonde bei 500 mA betrieben. Der größere Düsendurchmesser erfordert einen hohen Gasstrom, weshalb der Materialgasfluss auf 50 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> und der Hüllgasfluss auf 220 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> gesetzt wird. Der Gasvorbeefeuchtungstank wird mit deionisiertem Wasser gefüllt und auf 28 °C aufgeheizt. Während des Drucks wird die Druckplattform auf 30 °C konstant gehalten. Die Strukturgröße erlaubt eine Druckgeschwindigkeit von 15 mm s<sup>-1</sup>. Unmittelbar nach dem Druck wird die Probe photonisch gesintert (Pulseforge 1200, NovaCentrix). Die Wirkungsweise und die Funktion

des Sinterns ist in Kapitel 3.3.1 beschrieben. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Kühlkörpers sind im Vergleich zum Foliensubstrat für den Sintervorgang höhere Pulsenergien erforderlich. Dazu werden 60 Multipuls-Cluster mit einer Wiederholungsfrequenz von 1 Hz bei 400 V auf den Kühlkörper angewendet. Jeder Clusterpuls besteht aus 20 individuellen Mikropulsen mit jeweils einer Dauer von 10 ms und einer relativen Einschaltzeit (*Duty cycle*) von 50 %. Die fertig hergestellten Linien weisen eine Breite von etwa 230  $\mu\text{m}$  und eine Schichtdicke von ca. 4  $\mu\text{m}$  auf. Da die Linienbreite etwas geringer ausfällt als angestrebt, steht etwas mehr Toleranz bei der Ausrichtung des Flachbandkabels zur Verfügung.

Im zweiten Druckschritt wird, wie in Abbildung 7.5 - 2 dargestellt, die untere Elektrode auf die vertikalen Zuleitungen der x-Achse gedruckt. Zur Kontaktierung überlappen diese sich im Übergangsbereich. Für die untere und obere Elektrode wird jeweils eine Leiterbahnbreite von 60  $\mu\text{m}$  angestrebt, was entsprechenden die erzielte Pixelgröße definiert. Die geringe Linienbreite bedingt die Verwendung einer 200  $\mu\text{m}$  großen Druckerdüse. Da die Elektroden ebenfalls aus der zuvor verwendeten Silbertinte hergestellt wird, können die Druckparameter bis auf die Gasflüsse vom Druckvorgang der Zuleitungen übernommen werden. Die kleinere Druckdüse erfordert eine Reduktion des Materialgasflusses auf 21  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ , sowie des Hüllstroms (*Sheath*) auf 65  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ . Für die Verwendung des aerodynamischen Ventils (*Shutter*) werde die beiden notwendigen Gasströme (*Divert* und *Boost*) auf jeweils 45  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$  gesetzt. Außerdem wird die Druckgeschwindigkeit auf 10  $\text{mm s}^{-1}$  vermindert, damit die erforderliche Schichtdicke erzielt werden kann. Nach dem Druck werden die Strukturen mit den gleichen Parametern wie bei den Zuleitungen photonisch gesintert. In der profilometrischen Messung (Profilometer, DektakXT, Bruker) wird eine Linienbreite von 60 – 80  $\mu\text{m}$  und eine Dicke von 3  $\mu\text{m}$  gemessen.

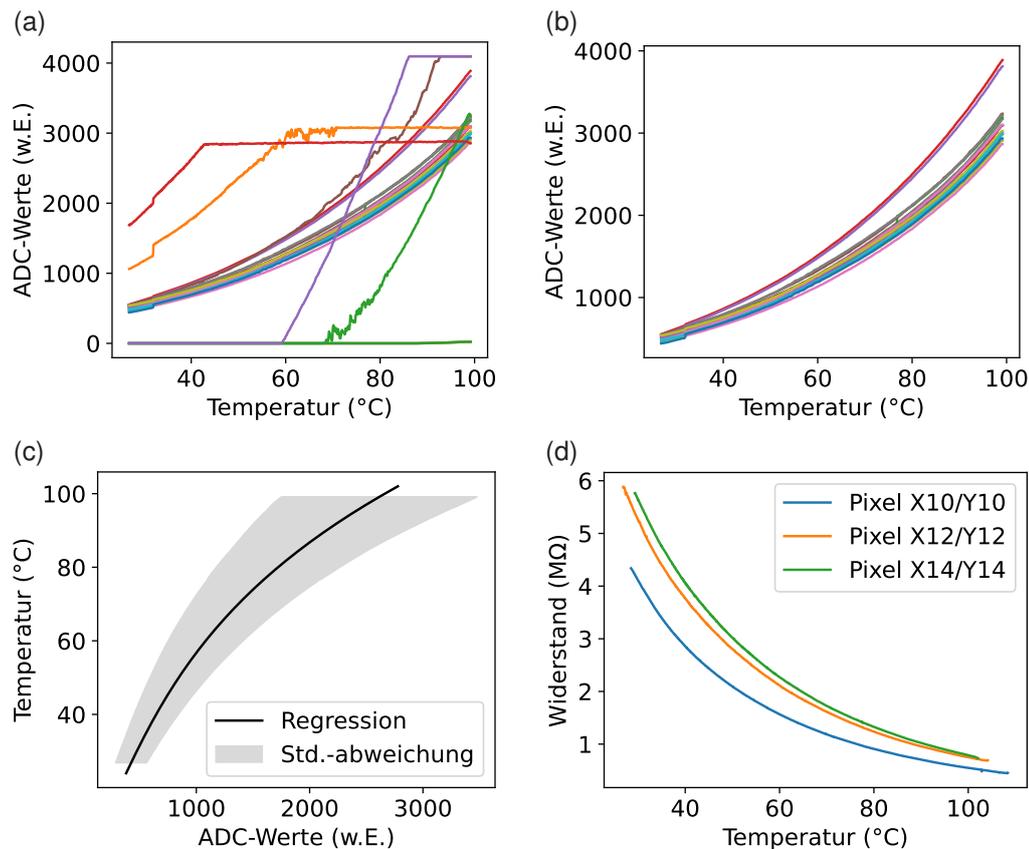
Senkrecht zur unteren Elektrode und somit horizontal ausgerichtet, wird als nächstes die Thermistorlage (siehe Abbildung 7.5 - 3) aufgebracht. Der Druckvorgang dieser Schicht basiert auf dem zuvor präsentierten folienbasierten Temperatursensor-Array, daher stimmt die Vorgehensweise bei der Herstellung, bis auf die Anpassung einiger Druckparameter, überein. Der Druckvorgang wird daher hier in verkürzter Form dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung ist in Kapitel 6.1 zu finden. Die Thermistorschicht bestimmt hauptsächlich die Temperatureigenschaften des Sensorarrays, wobei ebenfalls die auf einem Thermoplast basierende Tinte LOCTITE EDAG PM 404 E&C, Henkel AG & Co. KGaA [128] eingesetzt wird. Damit die Tinte mit dem Aerosol-Jet-Drucker kompatibel ist, muss diese verdünnt werden. Auch die Druckoptimierungen zur Sicherstellung von gleichmäßigen Widerstandswerten der einzelnen Pixel werden von folienbasierten Version übernommen. Die individuellen Linien der Thermistorschicht sollen eine Breite von < 500  $\mu\text{m}$  aufweisen ohne gegenseitig zu überlappen. Die Viskosität der Tinte verlangt die Verwendung der pneumatischen Tintenkartusche (siehe Kapitel 3.1.2) des Aerosol-Jet-Druckers für die Erzeugung des Aerosols. Für den Druck werden 10 ml der Tinte eingefüllt und der Tank auf 28 °C aufgeheizt. Um eine Absetzen der Tinte zu verhindern ist, wird der integrierte Rührer bei 5 V betrieben. Der Gasvorbefeuchtungstank (*Add-back*) ist mit 2-Propanol gefüllt und wird konstant auf 25 °C gehalten. Für den Druck wird eine 600  $\mu\text{m}$  Druckerdüse eingesetzt und eine Druckgeschwindigkeit von 10  $\text{mm s}^{-1}$  gewählt. Zur Erzeugung des Aerosols wird die pneumatische Kartusche sowie der virtuelle Impaktor jeweils mit einem Gasstrom von 1300  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$  beaufschlagt. An die Absaugung des virtuellen Impaktors wird ein Unterdruck von 0,12 psi (8,3 mbar) angelegt, um die überschüssigen Aerosoltröpfchen zu entfernen. Zur Steuerung des aerodynamischen Ventils (*Shutter*) werden die beiden Ströme *Divert* und *Boost* auf 300  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$  gesetzt. Zur Fokussierung des Materialstroms in der Düse wird ein Hüllstrom von 200  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$  gewählt. Während des Drucks wird die Druckplattform konstant auf 70 °C beheizt. Nacheinander wird die Thermistorschicht in 12 einzelnen Lagen in einer Mäanderstruktur auf dem Kühlkörper aufgebracht. Zum Schluss wird die Schicht in einem Ofen (UF55plus, Memmert GmbH + Co. KG) bei 120 °C für 6 h getrocknet. Die Gesamtdicke der Thermistorlinien beträgt etwa 8  $\mu\text{m}$  mit einer Linienbreite von 500  $\mu\text{m}$ .

Mit der obersten Elektrodenschicht (siehe Abbildung 7.6 - 4) wird der Sensor komplettiert. Die Elektroden verlaufen parallel mit der Ausrichtung der darunterliegenden Thermistorlage. Der Druckprozess und



**Abbildung 7.6:** Bild des Temperatursensor-Arrays auf dem CPU-Kühlkörper. Der schwarze, klar abgegrenzte Bereich in der Mitte entspricht dem Sensorbereich. Im unteren Bereich der Zuleitung sind zusätzlich zwei Positioniermarker aufgedruckt. Hierdurch wird die Ausrichtung des Flachbandkabels, welches zum Auslesen des Sensors benötigt wird, vereinfacht. Es sind außerdem mehrere Nahaufnahmen der Sensoroberfläche dargestellt. (1) zeigt den Übergangsbereich der Zuleitungen zur Elektrode. (2) entspricht einem Sensorpixel, welches durch den Kreuzungspunkt der beiden Elektroden definiert wird. (3) zeigt den horizontalen Übergangsbereich, der zusätzlich die Thermistorschicht umfasst. *Entnommen und angepasst von [1]; CC-BY 4.0*

die Druckparameter entsprechen denen für die untere Elektrode. Lediglich der Materialstrom wird auf  $60 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$  reduziert. Beim Sintervorgang kommt es beim Einsatz von hohen Energien zu Rissbildung und/oder zu einer Blasenbildung. Als Folge muss die Blitzenergie reduziert und ein Kompromiss zwischen Elektrodenqualität und Leitfähigkeit gefunden werden. Die Sinterparameter werden außerdem stark von der Schichtdicke sowie der Linienbreite beeinflusst. Im Gegensatz zur unteren Elektrode werden nun lediglich 20 Multipuls-Cluster eingesetzt und die Spannung wird auf 340 V reduziert. Aufgrund der darunterliegenden Thermistorschicht ist die Herstellung der letzten Elektrodenschicht problematisch. Die oberste Elektrode weist eine Schichtdicke von  $2 - 3 \mu\text{m}$  und eine Breite  $< 80 \mu\text{m}$  auf. Um Materialstress abzubauen, wird die Probe zum Abschluss der Herstellung für 24 h bei  $120^\circ\text{C}$  im Ofen gelagert. In Abbildung 7.6 ist das vollständig hergestellte Temperatursensor-Array dargestellt. Um die Ausrichtung des Flachbandkabels auf dem Sensorarray zu vereinfachen, sind rechts und links der gedruckten Zuleitungen Positionsmarker in das Design integriert. Die Nahaufnahmen zeigen die verschiedenen Materialien und Schichten an den Übergängen. In Abbildung 7.6 - 2 ist ein Sensorpixel abgebildet, welches durch die Schnittstelle der unteren und oberen Elektrode definiert wird. Eine Schnittbild des folienbasierten Sensorarrays ist in Abbildung 4.6 zu finden. Da die verwendeten Materialien und der Herstellungsprozess vergleichbar sind, können die Erkenntnisse auf dieses Temperatursensor-Array übertragen werden.



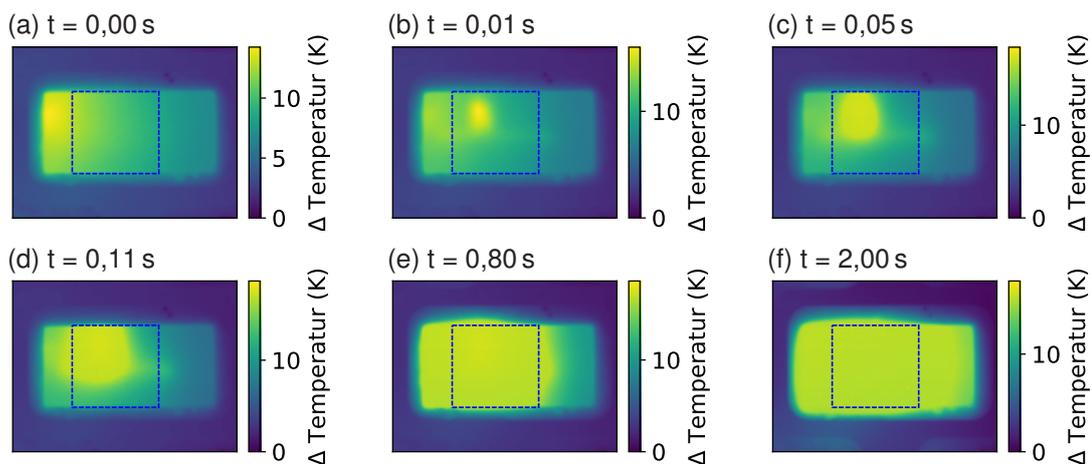
**Abbildung 7.7:** Die Messung der Widerstände der Sensorpixel auf der CPU erfolgt mit der angepassten Ausleseelektronik mithilfe von verbauten Analog-Digital-Wandlern (ADC). (a) Das Schaubild zeigt eine unbearbeitete Messung aller Sensorpixel einer Reihe. Wie am Verlauf sichtbar wird, weisen einige der Pixel ein fehlerhaftes Verhalten auf. (b) Zur Berechnung der Kalibrierfunktion werden fehlerhafte Sensorpixel aussortiert. Bei Betrachtung der verbliebenen Messwerte, lässt sich das gemeinsame Verhalten erkennen. Kleine Fluktuationen bei der Herstellung führen zu leicht unterschiedlichen Widerstandswerten. (c) Aus den selektierten Datensätzen wird eine gemittelte Regressionsfunktion auf Grundlage eines Polynom vierten Grades berechnet. Diese Kalibrierfunktion wird unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors für jedes Sensorpixel zur Umrechnung der Messwerte verwendet. (d) Es wird exemplarisch das Widerstandsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. (c) & (d) wurden von [1] entnommen und angepasst; CC-BY 4.0

## 7.4 Kalibriervorgang des Temperatursensor-Arrays auf dem Prozessor

Das auf dem CPU-Kühlkörper hergestellte Temperatursensor-Array wird mit der entwickelten angepassten Ausleseelektronik, basierend auf der *Zero-Potential-Scanning-Methode*, ausgelesen. Die Hintergründe werden hierzu in Kapitel 5.1.2 beschrieben. Für eine zeitnahe Darstellung der Temperaturverteilung der CPU ist die bereitgestellte Abtastrate von etwa 10 Hz entscheidend. Die angepasste Ausleseelektronik nutzt mehrere Analog-Digital-Wandler - *Analog Digital Converter* (ADC)s zur Digitalisierung der Widerstandswerte der Sensorpixel und stellt diese mit einer Auflösung von 12 Bit als willkürliche Größe dar. Zur Kompensation des nichtlinearen Verhaltens des Sensors und zur Berechnung der Temperatur, muss eine Kalibrierfunktion verwendet werden, welche zunächst bestimmt werden muss. In Kapitel 5.2 werden hierfür zwei Verfahren vorgestellt, wobei nun die gemittelten Kalibrierfunktion (siehe Kapitel 5.2.2) eingesetzt wird. Im Gegensatz zur individuellen Kalibrierung kann der Kalibriervorgang im Computersystem durchgeführt werden und erfordert für eine Rekalibrierung lediglich einen Wertabgleich bei einem Temperaturwert.

Zur Bestimmung der Kalibrierfunktion wird das Temperatursensor-Array über die zwei im Kühlkörper verbauten Heizpatronen auf mindestens 100 °C geheizt. Im Anschluss werden diese abgeschaltet und das Temperatursensor-Array, sowie der Referenztemperatursensor während des Abkühlvorgangs kontinuierlich ausgelesen. In Abbildung 7.7 (a) sind die so gemessenen ADC-Werte einer Sensorreihe dargestellt. Einige der Kurven weisen ein Sättigungsverhalten bei ADC-Werten bei 0 oder 4096 auf, da die gemessenen Widerstände der Sensorpixel außerhalb der Auslegungsgrenzen der Ausleseelektronik liegen. Das Sättigungsverhalten, das bei ADC-Werten von etwa 3000 beobachtet wird, sowie das Zittern der Messwerte ist nach ersten Erkenntnissen auf Probleme mit den Operationsverstärker der betreffenden Spalte der Ausleseelektronik zurückzuführen. Dieses Verhalten kann reihenübergreifend bei den gleichen Spalten beobachtet werden. Die Stufe bei etwa 30 °C ist auf eine Änderung des Kontaktwiderstands zurückzuführen, was beispielsweise durch eine Erschütterung verursacht wurde. Da außerdem das Sensorarray lediglich 18x22 Elektroden aufweist, sind nicht alle Reihen und Spalten belegt. Alle Messkurven bei einem ADC-Wert von 0 sind auf nicht belegte Messkanäle zurückzuführen. Zur Berechnung der gemittelten Kalibrierfunktion werden nur valide Messkurven benutzt, da sich ein fehlerhafter Verlauf andernfalls auf die Kalibrierung aller Sensorpixel auswirken würde. Abbildung 7.7 (b) zeigt die verwendete Auswahl am Beispiel der zugrundeliegenden Reihe aus (a). Die funktionalen Sensorpixel weisen alle ein ähnliches Temperatur-Widerstandsverhalten auf, wobei die Werte aufgrund der Fertigungstoleranzen etwas variieren. Die finale Kalibrierfunktion ist in Abbildung 7.7 (c) dargestellt. Die individuelle Anpassung der gemittelten Kalibrierfunktion an das Verhalten jedes Sensorpixels erfolgt durch die Bestimmung eines Skalierungsfaktors. Dazu wird zu Beginn einer Messung die CPU im Leerlauf belassen und darauf geachtet, dass keine Hintergrundaktivität ausgeführt wird. Währenddessen bildet sich eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung über den gesamten Kühlkörper und das Temperatursensor-Array aus. Im nächsten Schritt werden die Referenzwerte (*Baseline*) bestimmt, indem einmalig alle Sensorpixel ausgelesen und die Referenztemperatur des Kühlkörpers gemessen wird. Die mit dem Referenztemperatursensor gemessene Temperatur wird dann mit den Messwerten des Temperatursensor-Arrays abgeglichen und daraus der Skalierungsfaktor für jeden Pixel berechnet. Eventuelle Temperaturabweichungen der Prozessoroberfläche die während der Referenzmessung bestehen, werden durch diese Rekalibrierung egalisiert. Das Identifizieren von lokalen Wärmequellen wird somit vereinfacht und Temperaturveränderung treten deutlich hervor. Als Folge davon können die mit dem Temperatursensor-Array gemessenen und daraus berechneten Temperaturen jedoch von der Realität abweichen. Zur Überprüfung der tatsächlichen Widerstandswerte des Sensorarrays werden exemplarisch drei Temperatursensorpixel mit einem Multifunktionsmessgerät vermessen und die Ergebnisse in Abbildung 7.7 (d) dargestellt. Beim Vergleich von Abbildung 7.7 (b) und (d) ist der gegensätzliche Kurvenverlauf offensichtlich. Bei der angepassten Ausleseelektronik wird der Widerstand über die Messung des Stroms mit Hilfe einer Transimpedanzschaltung ermittelt. Unter Berücksichtigung des physikalischen Zusammenhangs für den Widerstand  $R = UI^{-1}$ , ergibt sich die Beziehung von Widerstand und ADC-Messwerten mit  $R \propto I^{-1}$ . Die Messung verdeutlicht das nichtlineare NTC-Verhalten des Temperatursensors.

Mit der gemittelten Kalibrierung kann im Vergleich zur individuellen Kalibrierung eine gleichmäßigere Temperaturinterpretation erreicht werden. Da die angepasste Ausleseelektronik anfällig für externe Störungen ist, fallen diese bei der Regressionsanalyse für die individuellen Kalibrierung stark ins Gewicht. Dadurch weisen einzelne Kalibrierfunktionen einen ungleichmäßigen Verlauf auf, sodass die Temperaturwerte einzelner Sensorpixel im Vergleich zur Mehrheit der Temperaturwerte wegdriften. Bei der gemittelten Kalibrierfunktionen werden fehlerhafte Messverläufe vorab selektiert. Bei Anwendung auf zuvor fehlerhafte Sensorpixel können somit dennoch sinnvolle Temperaturwerte ermittelt werden. Die Lokalisierung von Computerkomponenten durch die Temperaturverteilung profitiert von einer störungsarmen Darstellung ist einer möglicherweise weniger exakten Temperaturangabe vorzuziehen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit das Temperatursensor-Array durch die Bestimmung von neuen Skalierungsfaktoren zu rekalibrieren.

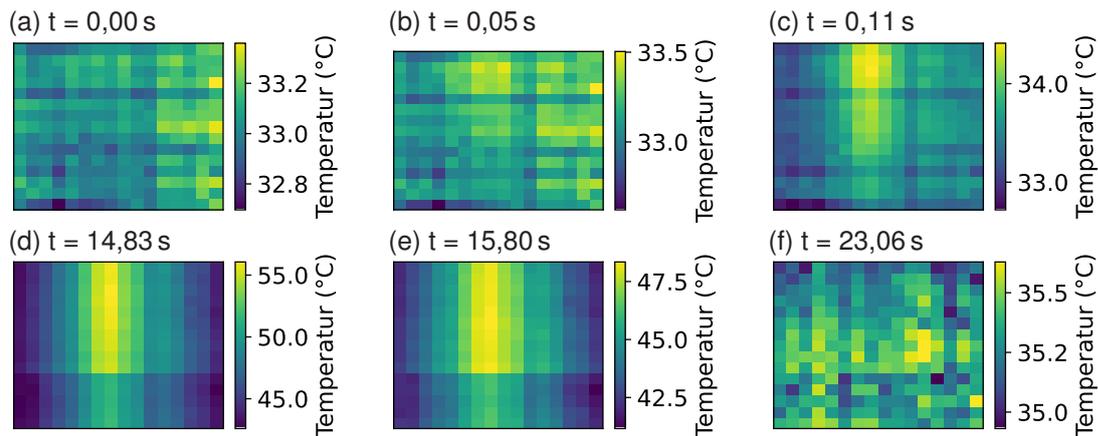


**Abbildung 7.8:** Die Bilderserie (a)-(f) zeigt die Wärmeentwicklung von Prozessorkern 2 unter Last. Die Bilder sind mit einer Infrarotkamera ohne Prozessorkühler aufgenommen. Der blaue Rahmen markiert die ungefähre Position aller acht Prozessorkerne der CPU und den mit dem Temperatursensor-Array überwachten Bereich. Innerhalb von 12,5 ms lässt sich an der Position des Kerns eine stark lokalisierte Hitzeentwicklung erkennen, die sich mit der Zeit über den gesamten Kern ausbreitet. Entnommen und angepasst von [1]; CC-BY 4.0

## 7.5 Zeitliche Temperaturentwicklung

Zunächst wird die zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung eines Prozessorkerns des Intel Core i9 9900K CPU mit einer Infrarotkamera (ImageIR 8300, InfraTec) aufgenommen, um später einen Vergleich mit den Messungen des Temperatursensor-Arrays ziehen können. Die Infrarotkamera erzielt eine Bildwiederholungsrate von 80 Bildern pro Sekunde. Für die Aufnahme muss ein ungehinderter Zugang zu der Chipoberfläche der CPU sichergestellt werden, weshalb die Untersuchung ohne Kühlkörper durchgeführt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken der Oberflächen, wird ein dünnes mattschwarzes Klebeband aufgebracht. Dieses hat eine homogene Abstrahlcharakteristik und ermöglicht eine repräsentative Temperaturdarstellung. Unter Last sorgt der fehlende Kühlkörper für eine Überhitzung und Notabschaltung der CPU. Durch die Verwendung von Kältespray kann die CPU beim Startvorgang und während eines Stresstests allerdings ausreichend gekühlt werden. Für die Aufnahme wird kurzzeitig die Kühlung unterbrochen und der Prozessorkern für 2 Sekunden belastet. Die mit der Infrarotkamera aufgenommene Wärmesignatur kann im Anschluss mit der offiziell veröffentlichten Prozessorarchitektur (siehe Kapitel 7.1) verglichen werden. Dadurch lassen sich einzelne heiße Partien den Chipkomponenten zuordnen. Die Entwicklung wird im Folgenden exemplarisch für den Prozessorkern 2 dargestellt. Die Vergleichsmessungen zeigen, dass sich die übrigen Kerne analog dazu verhalten. Gemäß der Position des belasteten Prozessorkerns variiert auch die Position der Hitzequelle.

Die Abbildungen 7.8 (a)-(f) zeigen die zeitliche Wärmeentwicklung der CPU, wenn Prozessorkern 2 unter Last gesetzt wird. Dabei markiert der blaue Rahmen die ungefähre Position der Prozessorkerne auf der CPU und den mit dem Temperatursensor-Array überwachten Bereich. Wenn sich die CPU im Leerlauf befindet, weist der Bereich mit den Prozessorkernen eine gleichmäßige Temperatur auf. Lediglich im Bereich des *System Agents* (vgl. siehe Abbildung 7.1) lässt sich eine Wärmequelle ausmachen. Sobald Prozessorkern 2 unter Last gesetzt wird, entwickelt sich innerhalb von 12,5 ms eine stark lokalisierte Wärmequelle. Diese breitet sich innerhalb von etwa 2 s über den gesamten Siliziumchip aus. Aufgrund des fehlenden Kühlkörpers kann die Wärme nicht abgeführt werden und verteilt sich somit im Chip selbst. Nach dem Erreichen einer kritischen Temperatur von 90 °C drosselt die CPU zum Selbstschutz die Leistung. Während der zeitlichen Wärmeentwicklung treten die vereinzelter Strukturen der CPU hervor und spiegeln die interne Segmentierung gemäß Abbildung 7.1 wider. In den Bildern 7.8 (b)-(d) lässt sich mittig ein Streifen erkennen, der gut

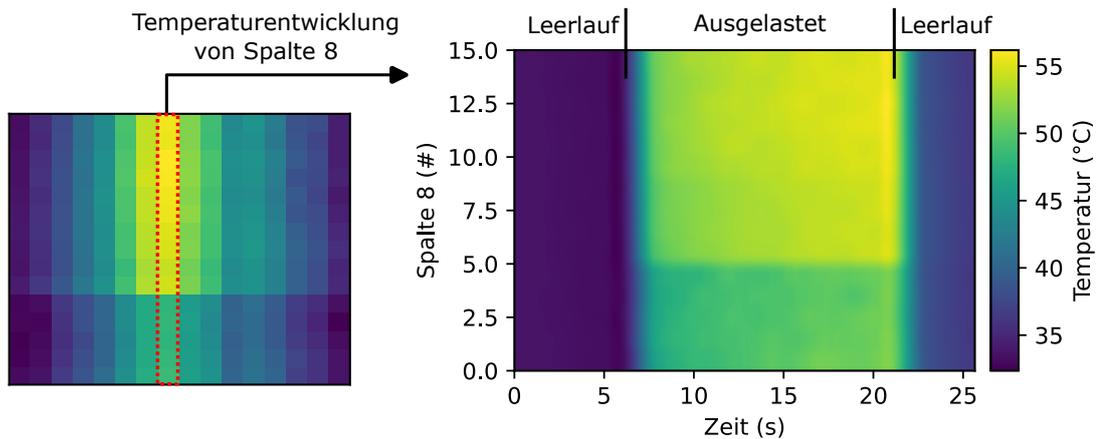


**Abbildung 7.9:** In den Bildern (a)-(f) ist die Messung der zeitlichen Wärmeentwicklung von Prozessorkern 2 mit dem gedruckten Temperatursensor-Array dargestellt. Nach 50 ms lässt sich erstmals in Bild (b) eine Tendenz erkennen. Nach 110 ms ist eine klar lokalisierte Wärmequelle in Bild (c) ersichtlich. Unter persistenter Last bleibt die Temperatur auf  $> 55$  °C begrenzt (siehe Bild (d)) und nimmt sobald die CPU im Leerlauf ist sofort wieder ab (siehe Bild (e)). In Bild (f) erreicht der Sensor kurze Zeit später wieder seine Ausgangstemperatur. Entnommen und angepasst von [1]; CC-BY 4.0

mit der Position des Ring Busses zusammenpasst. In (c) lässt sich außerdem die rechteckige Form des Prozessorkernsegments erkennen, die im zeitlichen Verlauf jedoch verschwindet. Darüber hinaus kommt es zu einer Wärmeübergangsbarriere (e), die vermutlich auf die strukturell stark abgegrenzte Grafikeinheit zurückzuführen ist. Sobald die CPU in den Leerlauf zurückfällt, kühlt sich die CPU aufgrund von Wärmestrahlung und Konvektion langsam ab.

Zum Vergleich wird das Temperatursensor-Array mit dem Kühlkörper auf die CPU montiert, wobei nur der Bereich mit den acht Prozessorkernen überwacht wird. Von den möglichen  $22 \times 18$  Sensorpixel werden lediglich  $16 \times 15$  ausgewertet. Wie zuvor wird der Prozessorkern 2 unter Last gesetzt. Da allerdings der Kühlkörper eine Überhitzung verhindert, ist eine Begrenzung der Belastung auf zwei Sekunden nicht erforderlich. Die mit dem Temperatursensor-Array gemessene zeitliche Abfolge der Wärmeentwicklung ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Zu Beginn in Bild (a), befindet sich die CPU im Leerlauf. Der Temperaturvarianz über den gesamten Prozessorchip beträgt dabei  $< 1$  °C. Sobald der Prozessorkern belastet wird kann innerhalb einer Messiteration bzw. nach 50 ms eine leichte Temperaturerhöhung gemessen werden. Bei genauer Betrachtung von Bild (b) lässt sich außerdem an der Position des Prozessorkerns eine leichte Wärmeentwicklung erkennen. Mit der nächsten Messiteration nach 110 ms beträgt der Temperaturunterschied etwa 1 °C und in Bild (c) manifestiert sich eine klar abgegrenzte Wärmesignatur. Wird dieses anfängliche Wärmeverhalten mit den Wärmebildaufnahmen von 7.8 verglichen, zeigen beide Messmethoden eine vergleichbare Temperaturverteilung. Da die Messung mit der Wärmebildkamera allerdings ohne Kühlkörper erfolgte, wird eine höhere Temperatur erreicht. Besonders die Ausprägung und Position der detektierten Wärmequelle passen sehr gut zusammen. Bei der Detektionszeit hat die Wärmebildkamera einen Vorteil. Dies lässt sich auf drei Punkte zurückführen: 1) Die Wärmebildkamera weist eine erheblich höhere Bildwiederholungsrate auf, weshalb Temperaturänderungen schneller wahrgenommen werden können. 2) Das Temperatursensor-Array, sowie der Kühlkörper weisen eine Wärmekapazität auf, sodass das System verzögert reagiert. 3) Es muss ein Wärmeübertrag von der CPU zum Sensor bzw. zum Kühlkörper erfolgen. Dieser Vorgang wird maßgeblich von der dünnen Schutzfolie und der Wärmeleitpaste beeinflusst.

Bei anhaltender Prozessorauslastung steigt der Temperaturgradient in Bild 7.9 (d) auf  $> 10$  °C und die maximale Temperatur erreicht  $> 55$  °C. Auch in den Randbereichen des Sensors ist ein Temperaturanstieg feststellbar. Dies lässt sich auf ein Erwärmen des gesamten Kühlkörpers zurückführen, was sich auch an der gemessenen Temperatur am Referenzsensor widerspiegelt. Unter persistenter Last bleibt die Wärmeausbreitung auf den Bereich um die Position des Prozessorkerns begrenzt. Dies steht im starken Kontrast



**Abbildung 7.10:** Die Abbildung zeigt die zeitliche Wärmeentwicklung von Prozessorkern 2. Dazu wird die Spalte mit der höchsten Temperatur identifiziert und über die Zeit aufgetragen. Solange sich die CPU im Leerlauf befindet verbleibt die Temperatur über die gesamte Spalte konstant. Mit dem Einsetzen der Last steigt die Temperatur an, wobei sich der Temperaturschwerpunkt auf Höhe des Prozessorkerns befindet. Unter anhaltender Belastung steigt die Temperatur gesamtheitlich an, da sich der Kühlkörper langsam mit erwärmt. Sobald die CPU in den Leerlauf zurückkehrt, nimmt die Temperatur schnell ab und der Temperaturgradient entlang der Spalte verschwindet. *Entnommen und angepasst von [1]; CC-BY 4.0*

zu den Wärmebildaufnahmen von zuvor (siehe 7.8 (e) & (f)). In diesen Aufnahmen kommt es zu einer Wärmedissipation über die gesamte CPU. Dieses Verhalten kann jedoch auf die mangelnde Wärmeabfuhr aufgrund des fehlenden Kühlkörpers zurückgeführt werden. Die maximal gemessene Temperatur an dem Sensorarray nimmt, wie in Bild (e) zu sehen ist, nach dem Abschalten der Last nach 1 s bereits merklich ab. Vergehen weitere 8 s (siehe Bild (f)) erreicht die Maximaltemperatur und die Temperaturverteilung nahezu den Ausgangswert von vor der Messung. Die allgemeine Temperaturvarianz liegt dabei wieder bei  $< 1^\circ\text{C}$ .

Zur besseren Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Temperaturverlaufs wird bei der Messung von Prozessorkern 2 die Spalte mit der höchsten Temperatur identifiziert und diese über die Zeit aufgetragen. In Abbildung 7.10 ist die entsprechende Spalte rot markiert. Die Darstellung der zeitlichen Abfolge offenbart, dass zu Beginn, wenn sich die CPU im Leerlauf befindet, alle Sensorpixel eine einheitliche Temperatur aufweisen. Sobald der Prozessorkern 2 belastet wird, steigt die Temperatur an. Der Temperaturschwerpunkt ist dabei an der Position des Prozessors besonders ausgeprägt. Je länger die Prozessorkernauslastung anhält, desto mehr erwärmt sich der gesamte Aluminiumkühlkörper. Dies spiegelt sich in einer langsam weiter ansteigenden Temperatur der gesamten Spalte wieder. Mit der Rückkehr der CPU in den Leerlauf, fällt die Temperatur unmittelbar ab. Hierbei nimmt der Temperaturgradient entlang der Spalte stetig ab, sodass nach wenigen Sekunden wieder eine gleichmäßige Temperatur herrscht. Aufgrund der Wärmekapazität des Kühlkörpers bleibt die Temperatur leicht erhöht.

Die zeitlich aufgelöste Messung demonstrieren, dass das gedruckte Sensorarray sowohl eine lokal abgegrenzte Wärmequellen darstellen kann, als auch eine zeitliche Änderungen bereits nach 50 ms abbilden kann. Die limitierenden Faktoren sind hierbei hauptsächlich der Versuchsaufbau und die maximale Bildwiederholungsrate der Ausleseelektronik.

## 7.6 Unterscheidbarkeit der einzelnen Prozessorkerne

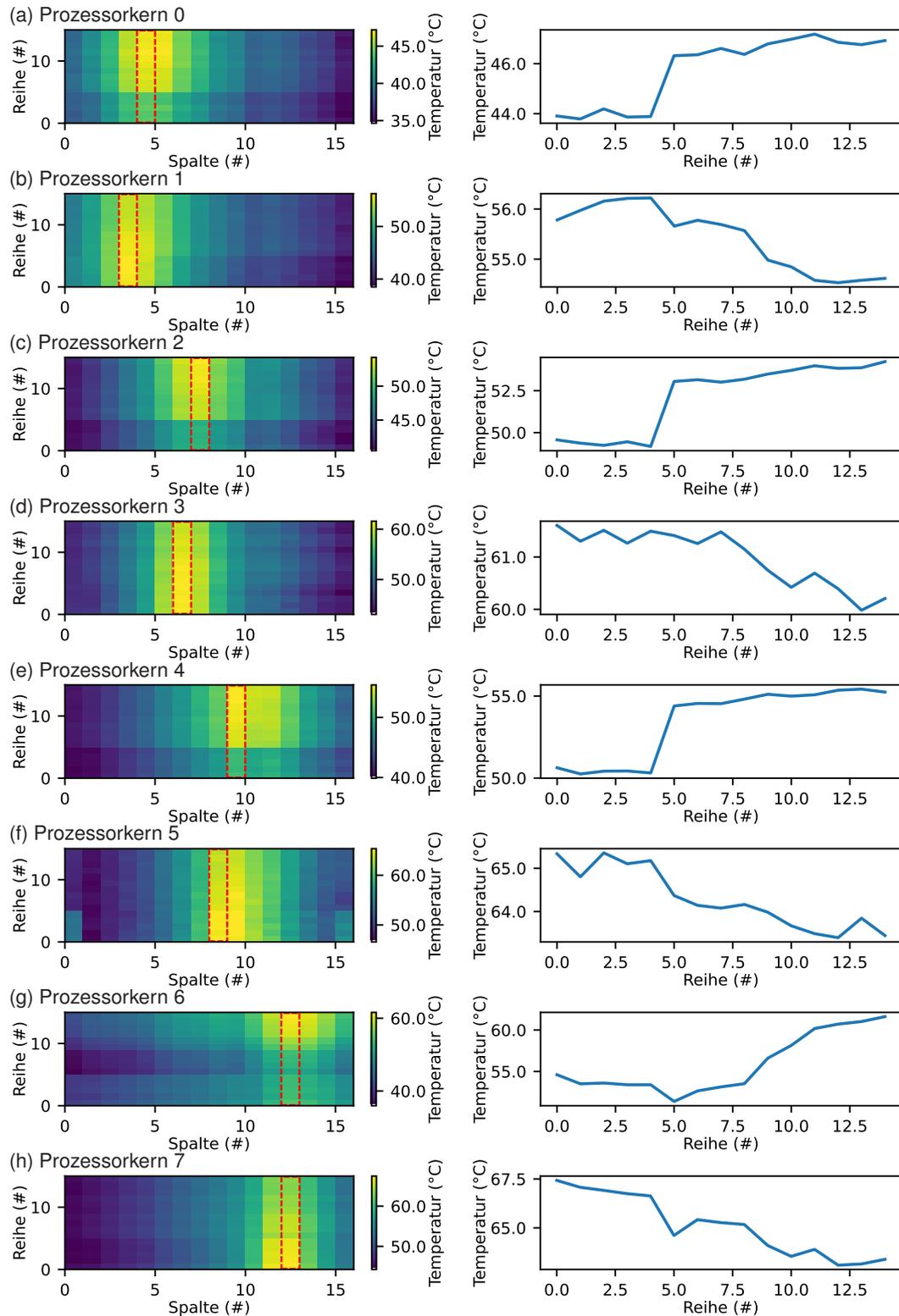
Neben der zeitlichen Auflösung ist die laterale Auflösung für die Prozessorüberwachung von besonderem Interesse. Das präsentierte Temperatursensor-Array ermöglicht durch die hohe Anzahl an Sensorpixeln eine erheblich präzisere Messung der Temperaturverteilung verglichen mit den wenigen direkt im Prozessor verbauten Sensoren. Um das räumliche Auflösungsvermögen zu demonstrieren, wird in Abbildung 7.11 jeder der

acht Prozessorkerne der CPU getrennt nacheinander belastet. Die Wärmeentwicklung wird währenddessen mit dem Sensorarray erfasst. Die Bilder (a)-(h) zeigen die Temperaturverteilung geordnet nach den belasteten Prozessorkernen. Die Spalten, die den höchsten gemessenen Temperaturwert aufwiesen, sind mit einem roten Kasten markiert und werden gesondert im rechts dazu angeordneten Schaubild aufgetragen. Wird die von der CPU veröffentlichte Prozessorarchitektur (siehe Abbildung 7.1) zugrunde gelegt, befinden sich jeweils ein Prozessorpaar in vier getrennten Spalten. Bei Betrachtung der Bilderserie 7.11 können vier Hauptspalten eindeutig identifiziert werden. Es ist jedoch auffällig, dass Prozessorkerne im oberen Reihenabschnitt eine Tendenz nach rechts bzw. die des unteren Reihenabschnitts eine Tendenz nach links aufweisen. Da der Temperaturgradient entlang einer Spalte stellenweise lediglich  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt, ist die genannte Tendenz nach links/rechts neben dem Temperaturverlauf eine zusätzliche Unterscheidungshilfe. Den gemessenen, relativ kleinen Temperaturgradient entlang einer Spalte kann zumindest teilweise den Wärmeleitungseigenschaften der Elektrodenstruktur zugeordnet werden. Der Effekt der Wärmeleitung spielt bei Wärmequellen mit stark begrenzter lokaler Ausdehnung eine größere Rolle und führt zu vermehrter Unschärfe der Messung. Zusätzlich sollte die unterschiedliche Sensorauflösung der Reihen und Spalten berücksichtigt werden. Die Spalten weisen einen Abstand von 1 mm zueinander auf, während die Reihen lediglich einen Abstand von 0,5 mm zueinander aufweisen. Diese Tatsache kann den Eindruck eines räumlichen geringen Temperaturgradienten entlang einer Reihe verstärken. Trotzdem kann auf Grundlage der gezeigten Messungen die Position des belasteten Prozessorkerns bestimmt und mit Kenntnis über die Prozessorarchitektur eindeutig zugeordnet werden.

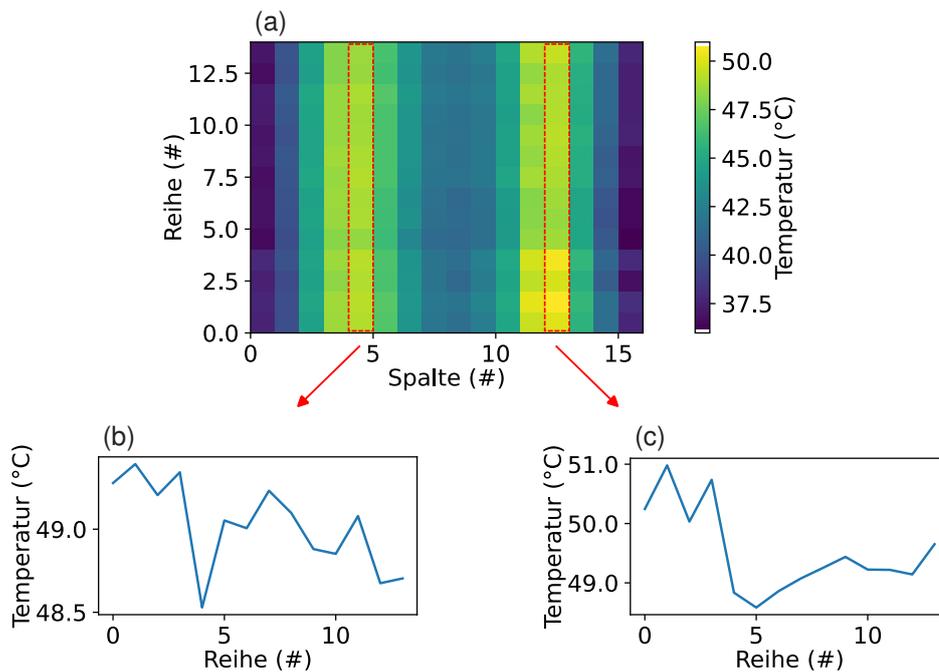
Da Computeranwendung in aller Regel nicht nur auf einzelne Prozessorkerne zugreifen, sondern häufig mehrere Kerne gleichzeitig belastet werden, wird die Funktion des Temperatursensor-Arrays exemplarisch für zwei parallel arbeitende Prozessorkerne demonstriert. Abbildung 7.12 illustriert die gemessene Temperaturverteilung der gleichzeitig belasteten Prozessorkerne 1 und 7. Beide Kerne liegen in der unteren Hälfte der CPU und sind jeweils zum äußeren Rand rechts und links angeordnet. Das Temperatursensor-Array stellt beide Wärmequellen in den jeweiligen Spalten klar separiert dar. Wird die Spaltenposition mit den Ergebnissen der Einzelmessung aus Abbildung 7.11 verglichen, stimmen die Spalten sehr gut überein. Um die exakte Position der Prozessorkerne zu bestimmen, kann zusätzlich die Reihenposition ausgewertet werden. In (b) und (c) wurden jeweils die Temperaturprofile der markierten Spalten aufgetragen. Zum Abgleich werden die Einzelmessungen, die in den Abbildungen 7.11 dargestellt sind, herangezogen. In (b) ist trotz des schwach ausgeprägtem Temperaturgradient eine Tendenz erkennbar und somit eine Zuordnung von Prozessorkern 1 möglich. Die Position von Prozessorkern 7 ist aus dem Temperaturprofil der Spalte in Abbildung 7.12 (c) eindeutig bestimmbar. Das Temperaturprofil spiegelt gut die zuvor dargestellten Einzelmessungen sowie die publizierte Prozessorarchitektur wider. Zur Bestimmung der beteiligten Prozessoren kann zusätzlich die zeitliche Wärmeentwicklung beobachtet werden, da die Ausprägung zu Beginn einer Messung deutlich hervortritt. Im späteren Verlauf der Messung erreicht die maximal Temperatur bis zu  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Durch die erhöhte Abwärme, aufgrund der parallelen Belastung beider Kerne, kann eine geringfügige Drosselung der Prozessorgeschwindigkeit beobachtet werden. Folglich sollte die Abwärmeübertragung vom Prozessor in den Kühlkörper optimiert werden, damit eine Drosselung in Zukunft vermieden wird.

## 7.7 Anwendbarkeit und Entwicklungspotential

Die vorgestellten Messungen am Beispiel einer CPU demonstrieren das Potential von direkt integrierten Temperatursensor-Arrays. Im Gegensatz zu der Verwendung von Thermokameras ist bei diesem Ansatz nur eine geringfügige Modifikation des Computersystems notwendig. Der Betrieb kann somit unter realitätsnahen Bedingungen beobachtet werden. Der hierfür modifizierte Kühlkörper sowie die Anpassungen am



**Abbildung 7.11:** Die Bilderserie zeigt die mit dem Temperatursensor-Array gemessene individuelle Temperaturverteilung der einzelnen Prozessorkerne unter Last. Die Spalte mit der am höchsten gemessenen Temperatur ist durch eine rote Box markiert. Das Temperaturprofil der entsprechenden Spalte ist im Detail daneben dargestellt. Die Bilder demonstrieren, dass die jeweiligen Temperaturverläufe deutlich abgegrenzt sind und in ihrer Position variieren. Ein Vergleich mit der publizierten Prozessorarchitektur (siehe Abbildung 7.1) zeigt eine gute Übereinstimmung. *Entnommen und angepasst von [1]; CC-BY 4.0*



**Abbildung 7.12:** Dargestellt ist die Messung der Temperaturverteilung mit dem Temperatursensor-Array während die Prozessorkerne 1 und 7 gleichzeitig belastet werden. Beide Wärmequellen sind dabei klar separiert und können aufgrund der Position und Ausprägung den Prozessorkernen zugeordnet werden (zum Vergleich siehe Abbildung 7.11).

Computersystem ermöglichen einen stabilen Betrieb der CPU ohne Überhitzung. Mit der speziell entwickelten Ausleseelektronik, konnten mit dem Sensorarray Temperaturänderungen innerhalb von 50 ms detektiert werden. Der Temperaturverlauf kann hierbei von der Entstehung bis zur Rückkehr in den Ausgangszustand mitverfolgt werden. Selbst unter Dauerlast bleibt die Temperaturverteilung auf einen lokalen Bereich begrenzt und breitet sich nicht über den gesamten Prozessorchip aus, wie dies bei Messungen mit einer Infrarotkamera beobachtet wird. Bei der Einzelmessung der Prozessorkerne ist eine klare Identifizierung des belasteten Prozessorkerns möglich. Die Temperaturverteilung sowie die Position der maximal gemessene Temperatur unterscheidet sich für jeden Prozessorkerne sowohl in der Spalten als auch in der Reihe. Durch die Lokalisierung des Temperaturschwerpunkts erfolgt die Zuordnung des belasteten Prozessorkerns bzw. der Prozessorkerne.

Im Bereich der Cybersicherheit kann die lateral hochaufgelöste Temperaturüberwachung in Zukunft einen wertvollen Beitrag liefern. Interessant könnte hierbei die Kopplung des Temperatursensor-Arrays mit einem neuronalen Netz sein. Durch das Trainieren des neuronalen Netzes mit der Temperaturverteilung, könnten nicht nur die verwendeten Prozessorkerne identifiziert werden, sondern auch programmspezifische Temperaturfingerabdrücke angelernt werden. Durch die hohe Abtastrate kann die schadhafte Ausführung von Code zeitnah erfasst und es könnten umgehend Maßnahmen ergriffen werden. Sollten sich Kriminelle Zugang zum Computersystem verschaffen und das System manipuliert werden, kann dies umgehend erkannt und das System sicher heruntergefahren werden. In diesem Zusammenhang wäre nicht nur der Einsatz in Computersystemen denkbar, sondern auch in Gebieten bei denen es in Anwendung zu einer spezifischen Temperaturverteilung kommt. Die Verwendung von Drucktechniken, wodurch kostengünstig individuelle und maßgeschneiderte Lösungen gefunden werden können, erhöhen zusätzlich die Attraktivität dieser Lösung und erweitern das Anwendungsgebiet.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgelegte Arbeit beschäftigte sich mit der Entwicklung vollständig gedruckter Temperatursensorik, die zusätzlich eine räumliche Auflösung zur Darstellung einer Temperaturverteilung bietet. Dazu war die Suche nach einem geeigneten Sensorkonzept sowie die Festlegung auf eine Materialauswahl entscheidend. Daran schloss sich die Entwicklung und Optimierung des Druckprozesses an, um die angestrebte Sensorgröße mit der gewünschten Funktionalität zu vereinen. Für die Charakterisierung des Temperatursensors wurden passende Ausleseelektroniken entworfen und auf Grundlage definierter Messzyklen eine Kalibrierung realisiert. Um das Potential der Sensorumgebung aufzuzeigen, wurden zwei Anwendungsszenarien demonstriert. Durch die Darstellung einer Temperaturverteilung bietet sich das Temperatursensor-Array als Strahlprofilmessgerät an und stellt je nach betrachtetem Spektralbereich, wie beispielsweise im (Fern-)Infrarotbereich, eine ernsthafte Alternative zu etablierten Methoden dar. Auch im Bereich der Computersicherheit und -überwachung ergeben sich neue Möglichkeiten durch die Detektion einer lateral hochaufgelösten Temperaturverteilung von Prozessabläufen und der Auslastung des Computerprozessors.

Mit dem Ziel eine Temperaturmessung mit einer lateralen Darstellung zu realisieren, musste im ersten Schritt ein Sensorkonzept erarbeitet werden, das eine hohe Sensordichte und die Herstellung im Druckverfahren ermöglichte. Eine Passiv-Matrix-Struktur erwies sich in diesem Zusammenhang als geeignet. Diese wurde aus drei Materiallagen aufgebaut: Eine untere Elektrode - ein dazwischenliegende Thermistorschicht - eine obere Elektrode. Die untere und obere Elektrode wurden orthogonal zueinander angeordnet, wobei die Kreuzungspunkte einen Sensorpixel definierten. Die Entwicklung des Sensorlayouts war eng an die Wahl des Druckverfahrens geknüpft. Für die Herstellung wurden Siebdruck und Aerosol-Jet-Druck miteinander kombiniert, wodurch sich die Vorteile beider Verfahren ausnutzen lies. Während das Siebdruckverfahren eine robuste Methode darstellt, um schnell großflächige, hochwertige Strukturen abzubilden, ist der Aerosol-Jet für einen präzisen Druck geeignet. Dadurch können feine Strukturen mit einer Detailauflösung von bis zu 10  $\mu\text{m}$  hergestellt werden. Im Gegensatz zu alternativen Verfahren bietet die Drucktechnologie eine hohe Kompatibilität zu einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien und erlaubt das Bedrucken dreidimensionaler Oberflächen. Mittels Siebdruck wurden bei dem Temperatursensor-Array die großflächigen Zuleitungsstrukturen reproduzierbar und mit einer hohen Leitungsfähigkeit hergestellt. Dabei wurden jeweils an das Druckverfahren angepasste Silbertinten verwendet. Bei der Auswahl wurde auf eine hohe elektrische Leitfähigkeit, eine gute Haftung auf Kunststoffsubstraten sowie auf eine hohe Robustheit gegen äußere Umwelteinflüsse geachtet. Andererseits kam Aerosol-Jet-Druck für die eigentliche Sensorstruktur zum Einsatz, indem diese Schichtweise, mit höchster Präzision und hoher Parameterkontrolle aufgebaut wurde. Als aktive Thermistorschicht wurde eine hochresistive, dielektrische Tinte verwendet, die auf einer Polymermatrix aus einem Thermoplast mit einem Carbon-Black Füllstoff basiert. Schließlich erlaubten die Druckverfahren unter Verwendung der genannten Materialien, die Herstellung eines Temperatursensor-Arrays auf Grundlage eines flexiblen Kunststoffsubstrates. Die Sensorfläche betrug 12 mm x 12 mm mit insgesamt 625 Sensorpixeln in der maximalen Ausbaustufe. Die Sensorpixel selbst wiesen eine Größe von 60  $\mu\text{m}$  x 60  $\mu\text{m}$  auf und besaßen einen Periodenabstand von 500  $\mu\text{m}$  sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung zueinander. Der Widerstand nahm mit der Temperatur nichtlinear, aber stetig ab, was allgemein als NTC-Verhalten bekannt ist. Aufgrund dieser Nichtlinearität variierte der Temperaturkoeffizient des Widerstands (TCR), der ein Maß für die Empfindlichkeit ist, über den Temperaturmessbereich von 0 °C bis 90 °C. Bei 20 °C betrug die Änderung des Widerstands etwa  $-3,6\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  und nahm auf etwa  $-2,4\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  bei 85 °C ab.

Das Auslesen des Temperatursensor-Arrays erfolgte durch zwei speziell entwickelte Ausleseelektroniken. Zu Beginn der Sensorentwicklung wurde eine Ansteuereinheit zum Anwählen der Sensorpixel mit einer SMU kombiniert. Das System lies sich mithilfe eines Messskripts steuern und erlaubte die präzise Bestimmung des Widerstands über einen sehr großen Messbereich von bis zu  $200\text{ M}\Omega$ . Diese hohe Messwertkompatibilität war bei der Materialsuche, Prozessoptimierung und Designentwicklung von Vorteil. Zur Störungsvermeidung wurde die Ansteuereinheit autark mit Energie versorgt und kabellos über WLAN angesteuert. Im weiteren Verlauf der Arbeit war eine echtzeitnahe Temperaturmessung erforderlich. Dazu wurde eine voll integrierte Ausleseelektronik entwickelt und die Auslesezeit von etwa 2 min auf 50 ms pro vollständigem Auslesevorgang reduziert. Beim Design der Platine wurde die sogenannte *Zero-Potential-Scanning*-Methode angewendet, womit sich parasitäre Ströme, die sich bei einer Passiv-Matrix-Struktur ausbilden, effektiv unterdrücken ließen.

Da es sich bei der Temperaturmessung um eine indirekte Messmethode handelt, war für eine akkurate Temperaturbestimmung eine Kalibrierung erforderlich. In einem eigens konstruierten Temperaturmessplatz wurde gezielt ein Temperaturprofil abgefahren, wodurch die Temperatur am Sensor mit einem externen Temperatursensor gemessen (Referenztemperatur) und mit den Sensormesswerten korreliert wurden. Aus dem Datensatz wurde im Anschluss mithilfe einer Regressionsanalyse und unter Verwendung eines Polynom vierten Grades eine individuelle Kalibrierung durchgeführt, indem für jeden Sensorpixel eine eigenständige Kalibrierfunktion berechnet wurde. Auf diese Weise konnte eine Temperaturmessung mit einer Abweichung kleiner  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  über alle Sensorpixel erzielt werden. Vor jeder Messung wurde der Temperatursensor neu kalibriert, um sowohl Störeinflüssen und Kontaktierungsproblemen vorzubeugen, aber auch um die Messwerte aller Sensorpixel wieder zu homogenisieren. Für eine Rekalibrierung erforderte die individuelle Kalibrierung allerdings, dass das Sensorarray erneut im Temperaturmessplatz verbaut werden musste und der Vorgang, je nach Anzahl der Messwiederholungen, mindestens eine Stunde in Anspruch nahm. Aus diesem Grund wurde eine zweite Kalibrierungsmethode entwickelt, bei der für alle Sensorpixel dieselbe, gemittelte Kalibrierfunktion hinterlegt wurde. Um trotzdem dem individuellen Verhalten jedes Sensorpixels Rechnung zu tragen, wurden bei Raumtemperatur (Referenztemperatur) jedes Sensorpixel einmalig ausgelesen und die gemittelte Kalibrierfunktion mit einem individuellen Korrekturfaktor für jeden Pixel angepasst. Eine Rekalibrierung konnte somit unmittelbar im Versuchsaufbau bei Raumtemperatur durchgeführt werden, wobei dies einen Referenztemperatursensor bedingte. Der Kalibriervorgang benötigte damit weniger als einer Minute. Der erzielte Zeitvorteil ging mit einer leicht erhöhten Messwertabweichung von etwa  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Zusammenhang mit dem folienbasierten Sensorarray einher.

Für eine vergleichbare Funktion eines klassischen Strahlprofilmessgeräts auf Grundlage eines Kamerachips, erlaubte die Darstellung der lateralen Temperaturverteilung auf der Sensoroberfläche die Detektion der geometrischen Position eines Lasers und die Bestimmung des Strahldurchmessers. Die eingestrahelte Laserleistung erzeugte im folienbasierten Temperatursensor-Array eine lokale Temperaturerhöhung. Aufgrund von Wärmeleitung im Sensor kam es zu einer Verbreiterung des gemessenen Temperaturprofils, weshalb aus dem Profil nicht unmittelbar auf die Größe des Laserstrahl geschlossen werden konnte. Zur Auswertung wurde daher die Wärmeleitungsgleichung (WLG) für den stationären Fall unter Annahme eines einfallenden gaußförmigen Laserstrahls gelöst und die hergeleitete Funktion mithilfe einer Regressionsanalyse auf das Temperaturprofil angewendet. Die ermittelten Funktionsparameter erlaubten anschließend die Berechnung des Laserstrahldurchmessers. Für das Experiment wurde zur Referenz der Laserstrahldurchmesser mit einem kamerabasiertem Strahlprofilmessgerät analysiert. Hierbei wurde im direkten Vergleich eine Abweichung um einen konstanten Wert festgestellt. Für Strahlgrößen unterhalb des Auflösungsvermögens des Temperatursensor-Arrays von  $500\text{ }\mu\text{m}$  nahm allerdings die Abweichung weiter zu. Im Mittel betrug die Abweichung  $\pm 1,66\text{ mm}$ . Je kleiner der verwendete Laserdurchmesser war, desto entscheidender war die relative Positionierung des Laserstrahls im Temperatursensor-Array und der konkrete Abstand zu den umgebenden Sensorpixeln. Zu Verbesserung der Messung wurde eine Kalibrierung und Korrektur der Abweichung um

einen konstanten Wert bzw. mit einer Funktion vorgeschlagen. Unter Berücksichtigung dieser Korrekturen lies sich mit dem Sensorarray eine hohe Übereinstimmung erzielen, die lediglich eine mittlere Abweichung von  $\pm 0,18$  mm für die lineare Korrektur, bzw.  $\pm 0,02$  mm bei Verwendung einer Korrekturfunktion zwischen Referenzmessung und der Messung mit dem Temperatursensor-Array aufwies. Zusätzlich wurde das Temperaturverhalten des Sensorarrays unter der Einwirkung eines Laserstrahls in einer Simulation überprüft, indem die Messung digital nachgebildet wurde. Um die Vergleichbarkeit zu wahren, wurde das Temperaturprofil aus der Simulation exportiert und ebenfalls mit der zuvor verwendeten WLG ausgewertet. Hierbei zeigte sich zwischen realer Temperaturmessung und Simulation ebenfalls eine gute Übereinstimmung, wobei die Simulation einen gleichmäßigeren Verlauf aufwies, da hier die Sensorauflösung keine limitierende Rolle spielte. Die mittlere Abweichung zwischen experimentellen Messdaten und Simulation betrug  $\pm 0,14$  mm. Auch bei der Simulation wurde ein konstanter Versatz zur Referenz beobachtet, der vergleichbar mit der Temperaturmessung war. Daraus lässt sich folgern, dass die WLG die Realität nicht ausreichend genau repräsentiert und deren Anpassung ein genaueres Messergebnis liefern könnte. Zusätzlich wurde der mit dem Temperatursensor-Array gemessene Laserstrahldurchmesser bei unterschiedlichen Laserleistungen untersucht, wobei die beiden Messgrößen voneinander unabhängig sind. Die Temperaturmessung zeigte hierbei Messwertschwankungen um einen konstanten Strahldurchmesser, was ebenfalls auf die Positionierung des Laserstrahls auf dem Sensorarray zurückzuführen war. Außerdem konnte mit abnehmender Strahlintensität eine Zunahme des Fehlers auf den gemessenen Laserstrahldurchmesser festgestellt werden, da das induzierte Temperaturprofil nur noch schwach ausgeprägt war. Wurden allerdings die Messdaten mit dem zuvor ermittelten konstanten Faktor korrigiert, zeigte sich eine gute Übereinstimmung mit der Referenzmessung, sodass eine mittlere Abweichung von lediglich  $\pm 0,25$  mm erreicht wurde. Auch die Simulation bestätigte die ermittelten Strahldurchmesser nochmals, wobei ein nahezu konstanter Versatz zur Referenzmessung beobachtet wurde. Um die Abweichung zwischen Experiment und Simulation zu bewerten, wurden die Strahldurchmesser für alle Intensitäten aus der Simulation gemittelt und dieser Wert mit den experimentell gemessenen Datenpunkte verglichen. Dabei betrug die mittlere Abweichung  $\pm 0,33$  mm, wobei die Zunahme der Messgenauigkeit bei geringen Strahlintensitäten mit berücksichtigt ist.

Im Bereich der Computersicherheit und Leistungsüberwachung ist die Kenntnis über die Temperaturverteilung und Wärmebelastung des Computerprozessors eine wertvolle Information. Zur direkten Integration des Temperatursensor-Arrays in ein Computersystem wurde der Kühlkörper modifiziert und um zwei Heizpatronen sowie einen Referenztemperatursensor erweitert. Dadurch lies sich die Kalibrierung des Sensors direkt auf dem Prozessor durchführen. Um einen elektrischen Kurzschluss zu vermeiden und eine tintenkompatible Grundlage bereitzustellen, wurde die Aluminiumoberfläche des Kühlkörpers mit einer etwa  $5 \mu\text{m}$  dicken Polyimidlage beschichtet. Anschließend wurde eine speziell an die Größe des Prozessors (Intel Core i9 9900K) angepasste Version des Temperatursensor-Arrays, bestehend aus 396 Sensorpixeln, auf den Prozessorkühler mithilfe des Aerosol-Jet-Druckers gedruckt. Die zuvor verwendete Materialauswahl wurde beibehalten und lediglich die Druckparameter an die neuen Bedingungen angepasst. Um eine Verfälschung der Temperatursignatur durch den fest auf der CPU verbauten Kühlkörper zu vermeiden, wurde dieser entfernt und der darunterliegende Siliziumchip freigelegt. Dadurch kam das auf dem Prozessorkühler aufgedruckte Temperatursensor-Array in direkten Kontakt mit der Siliziumoberfläche. Um das Potential des Sensorarrays zu testen, wurde die unter Belastung erzeugte Abwärme der einzelnen Prozessorkerne genutzt, um sowohl deren Aktivität, als auch deren geometrische Position zu identifizieren. Zunächst wurde die zeitliche Temperaturentwicklung eines belasteten Prozessorkerns mitverfolgt. Dazu wurde zum Vergleich die Messung mit einer Wärmebildkamera durchgeführt und anschließend mit dem Temperatursensor-Array wiederholt. Mit der Wärmebildkamera konnte nach etwa 10 ms das Ausbilden einer lokalen Wärmequelle beobachtet werden. Die Position stimmte dabei mit der von Intel veröffentlichten Prozessorarchitektur überein. Da für die Messung mit der Wärmebildkamera der Prozessorkühler entfernt werden musste, breitete sich die Wärme mit der Zeit über den gesamten Siliziumchip aus. Im Gegensatz dazu war bei der Messung mit dem

Temperatursensor-Array der Kühlkörper montiert. Bei dieser Messung lies sich mit dem Temperatursensor-Array eine erste Tendenz zur Position des belasteten Prozessorkerns nach 50 ms feststellen, welche nach 110 ms voll ausgeprägt war. Die mit dem Temperatursensor-Array gemessene Position der lokalen Wärmequelle stimmte mit der durch die Wärmebildkamera gemessenen Position überein. Da der Kühlkörper die Abwärme effektiv vom Prozessorkern abführte, breitete sich die Wärme nicht über den gesamten Chip aus, sondern war selbst nach 20 s Dauerbelastung klar lokalisiert. Nach Beendigung der Belastung fiel die Temperatur rapide ab und das gesamte Sensorarray erreichte in etwa 3 s wieder eine homogene Temperaturverteilung.

Im nächsten Schritt wurden die einzelnen Kerne separat belastet und hierbei die Temperaturverteilung mit dem Sensorarray mitverfolgt. Die acht Prozessorkerne des Intel Core i9 9900K waren paarweise in vier Spalten angeordnet. Aus der gemessenen Temperaturverteilung wurde die Position eines Prozessorkerns anhand des Temperaturmaximums bestimmt und anschließend einem der acht Kerne zuordnet. Auch bei Belastung von gleichzeitig zwei Kernen konnten diese eindeutig identifiziert werden. Damit erlaubt die Verwendung des Temperatursensor-Arrays die Überwachung von Computersystemen unter realitätsnahen Bedingungen, während nur kleine Modifikationen am System nötig sind. Dieses Verfahren erweist sich heutigen kameragestützten Untersuchungsmethoden als klar überlegen und basiert im Gegensatz zu einer modellierten Temperaturverteilung auf einer realen Messung.

Die in dieser Arbeit präsentierten Anwendungen zeigen das große Potential von gedruckten Temperatursensor-Arrays auf. Für eine noch detailliertere Messung, eine verbesserte Genauigkeit und eine vergrößerte Sensorfläche mit höherer Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen sind zusätzliche Entwicklungsschritte erforderlich.

Im Falle der Laserspotmessung könnte die Messgenauigkeit des Temperatursensors durch mehrere Maßnahmen verbessert werden. Eine Anpassung der Regressionsfunktion (WLG) könnte die beobachtete Abweichung zwischen der Temperaturmessung bzw. dessen Simulation und der Referenzmessung mit dem Profilometer verringern. Eine nachträgliche Korrektur des Laserstrahldurchmessers könnte somit obsolet werden. Weiterhin kann das räumliche Auflösungsvermögen des Temperatursensor-Arrays verbessert werden, indem die Sensorpixeldichte bei gleicher Sensorfläche erhöht wird. Durch eine Anpassung des Sensordesigns könnte dies bereits mit dem Aerosol-Jet umgesetzt werden, sodass eine Pixelgröße von  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$  mit einer Abstandsperiode von  $40\ \mu\text{m}$  erreicht werden könnte. Somit könnte die Sensordichte von  $434\ \text{cm}^{-1}$  auf über  $60000\ \text{cm}^{-1}$  gesteigert werden. Der Wechsel auf andere Druckverfahren, wie beispielsweise hydrodynamisches Drucken oder Hochpräzisionsdispensieren, würde eine noch größere Sensordichte ermöglichen, wobei die Herstellungsprozesse dafür neu entwickelt werden müssten. Mit der Erhöhung der Sensorpixelanzahl könnte außerdem die Sensorfläche vergrößert werden. In diesem Zusammenhang stellt die Druckbarkeit kein Problem dar, allerdings steigen mit der Pixelanzahl die Störeinflüsse durch die Passiv-Matrix-Struktur, sodass vermutlich über eine grundsätzlich neue Sensorstruktur nachgedacht werden müsste. Auch das Anschlusskonzept und die Ausleseelektronik müssten überarbeitet und ausgebaut werden. Bislang konnte mit der Entwicklung einer angepassten Ausleseelektronik auf Grundlage der *Zero-Potential-Scanning*-Methode die Auslesegeschwindigkeit erheblich gesteigert und die parasitären Ströme der Passiv-Matrix-Struktur minimiert werden. Trotzdem ist das entwickelte Temperatursensor-Array anfällig für äußere Störungen. Aus diesem Grund ist auch an dieser Stelle eine weitere Optimierung der Ausleseelektronik sinnvoll. Die Sensorstabilität und die damit einhergehende Messgenauigkeit könnte außerdem durch das Aufbringen einer Verkapselung auf dem Temperatursensor-Array profitieren. Bei der CPU-Messung hätte dies noch zwei zusätzliche Vorteile: Erstens war das gedruckte Temperatursensor-Array fragil und konnte daher beim Kontakt mit dem Siliziumchip schnell beschädigt werden. Eine Versiegelung würde daher für verbesserte mechanische Stabilität sorgen. Zweitens beschädigte, zum Beispiel die aufgebrauchte Wärmeleitpaste den Sensor, weshalb diese damit nicht in Berührung kommen durfte. Bislang wurde dies durch die Verwendungen einer ultradünnen Folie verhindert. Durch das Ersetzen der Folie durch eine Versiegelung des

Sensors würde dieser vor eine Degradation durch eine Kontamination jeglicher Art geschützt werden. Die Versiegelung sollte allerdings nur eine geringe Wärmekapazität und gleichzeitig guter Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Dadurch würde der Einfluss auf die Temperaturmessung durch diese zusätzliche Schicht auf ein Minimum reduziert werden.

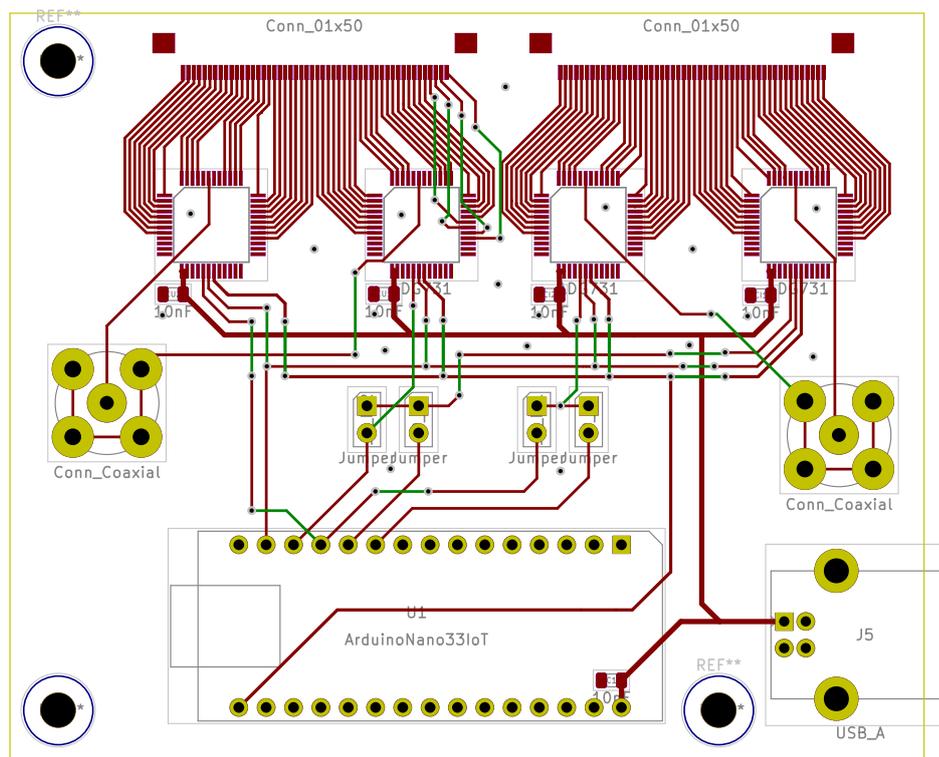
Nachdem in der CPU-Messung die Identifizierung der Prozessorkerne durch die Auswertung der Temperaturverteilung demonstriert wurde, sollten nun die Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Cybersicherheit und Leitungüberwachung durch ein realitätsnahes Experiment gezeigt werden. Die Implementierung eines neuronalen Netzes zur Erkennung von böartigen Zugriffen auf dem Computersystem anhand des thermalen Fingerabdrucks ist dabei der nächste konsequente Schritt.

Mit dieser Arbeit wurde ein vollständig gedruckte Temperatursensor-Array vorgestellt, das aufgrund des lateralen Auflösungsvermögens die Darstellung einer Temperaturverteilung erlaubt. Dabei sind die Anwendungsmöglichkeiten nicht nur auf die zwei gezeigten Beispiele beschränkt, sondern erlaubt durch die Nutzung von vielseitiger Drucktechnologie die Adaption der Temperatursensorik auf viele neue Anwendungsfelder, wie beispielsweise im Gesundheitswesen oder Robotik. Die rasanten Entwicklungen in der Sensorik und Drucktechnologie, sowie die steigende Nachfrage der Industrie lassen vermuten, dass zukünftig gedruckte Temperatursensorik auch den Weg in kommerzielle Produkte finden wird.



# A Anhang

## A.1 Leiterplattenlayout Ansteuerplatine

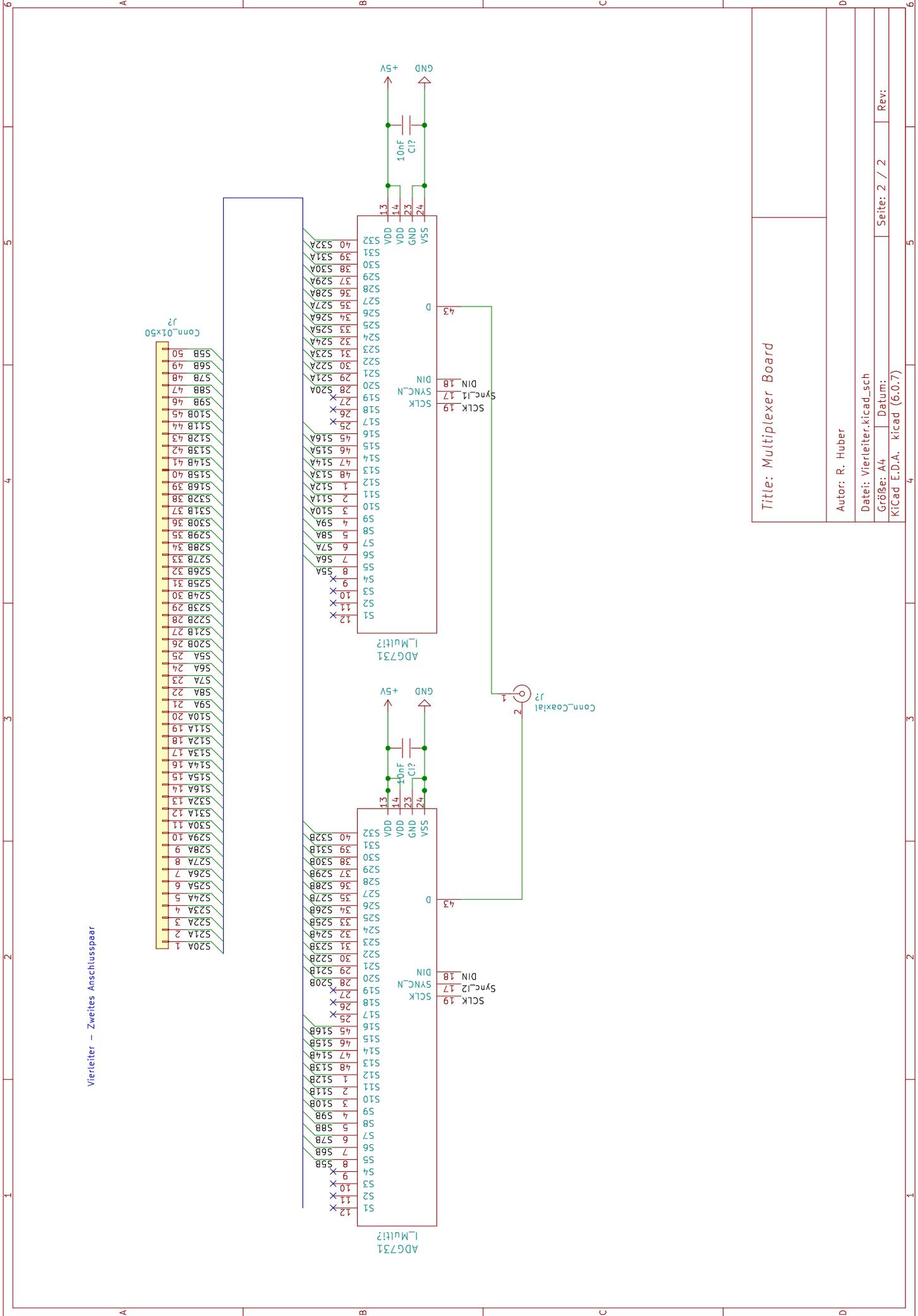


REF\*\*

Abbildung A.1: Darstellung des Leiterplattenlayouts der Ansteuerplatine in der ursprünglichen Vierleiterausführung.

## A.2 Schaltplan Ansteuerplatine





Vierleiter - Zweites Anschlusspaar

Title: Multiplexer Board

Autor: R. Huber

Datei: Vierleiter.kicad\_sch

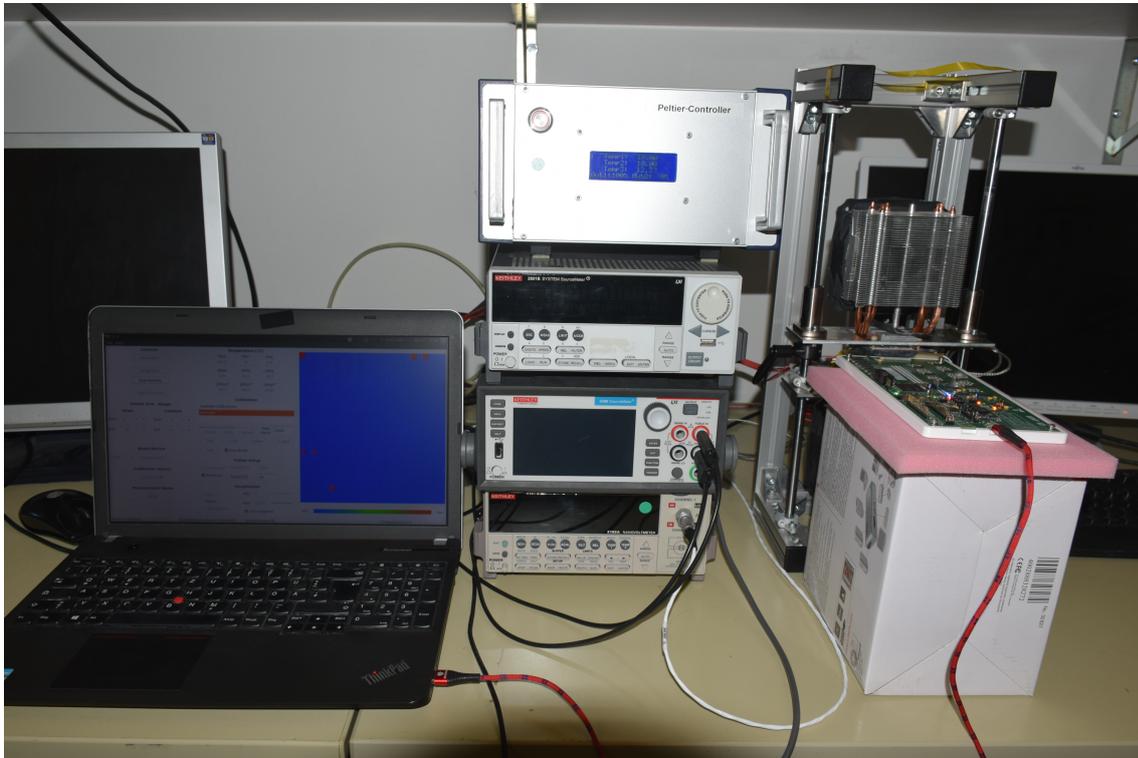
Größe: A4 Datum:

KiCad E.D.A. kicad (6:0.7)

Seite: 2 / 2

Rev:

### A.3 Temperaturmessplatz



**Abbildung A.2:** Foto des Temperaturmessplatzes bei Verwendung der angepassten Ausleselektronik. Die Luftkühlung ist bei der Nutzung der Peltierelemente erforderlich. Sichtbar ist außerdem die SMU, sowie die Temperatursteuereinheit. Die Abbildung wurde aus der Masterarbeit [15] von D. Belles entnommen.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Temperaturabhängigkeit des Aggregatzustands von Stoffen . . . . .	8
2.2	Darstellung des Carnot-Prozesses . . . . .	9
2.3	Schematische Darstellung des Phasendiagramms von Wasser . . . . .	11
2.4	Entscheidungskriterien für die Wahl eines Messverfahrens . . . . .	13
2.5	Vereinfachte Darstellung von gedruckten Temperatursensoren . . . . .	15
2.6	Darstellung einer passiv Matrixstruktur für Temperaturmessung . . . . .	17
2.7	Darstellung einer Aktiv-Matrix-Struktur für Temperaturmessung . . . . .	18
2.8	Schema zur Wärmeleitung . . . . .	19
2.9	Darstellung des Schwarzkörperspektrums . . . . .	22
2.10	Schema des Bändermodells . . . . .	23
2.11	Bändermodell bei dotierten Halbleitern . . . . .	24
2.12	Darstellung des p-n-Übergangs in einer Diode . . . . .	25
2.13	Skizzierte Diodenkennlinie . . . . .	26
3.1	Aufbau und Funktion von Siebdruck . . . . .	30
3.2	Foto des Aerosol-Jet-Druckers . . . . .	31
3.3	Vorstellung des Aerosol-Jet-Druckprinzips . . . . .	32
3.4	Aufbau und Funktion der Druckerdüse . . . . .	33
3.5	Druckeigenschaften des Aerosol-Jet-Druckverfahrens . . . . .	34
3.6	Aufbau und Funktion der Ultraschallkartusche . . . . .	35
3.7	Aufbau und Funktion der pneumatischen Kartusche . . . . .	36
3.8	Sintervorgang von Nanopartikel unter Temperatureinfluss . . . . .	38
3.9	Schematischer Aufbau und Funktion des photonischen Sinterns . . . . .	39
4.1	Schematischer Aufbau eines taktilen Profilometers . . . . .	42
4.2	Schematischer Aufbau eines Weißlichtinterferometers . . . . .	43
4.3	Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops . . . . .	44
4.4	Strukturformel von Polyethylennaphthalat (PEN) . . . . .	46
4.5	Strukturformel von Polyimiden . . . . .	47
4.6	Nahaufnahmen der Materialschichten . . . . .	48
4.7	Strukturformel von PEDOT:PSS . . . . .	50
4.8	Strom-Spannungs-Kennlinie des verwendeten Thermistormaterials . . . . .	51
4.9	Auswirkungen der Variation von Herstellungsparameter auf die Silberlinienqualität . . . . .	54
5.1	Ansteuereinheiten zum Auslesen des Temperatursensor-Arrays . . . . .	57
5.2	Messumgebung mit der Ansteuereinheit und Andeutung der Störeinflüsse . . . . .	58
5.3	Schaltskizze der <i>Zero-Potential-Scanning</i> -Messmethode . . . . .	60
5.4	Abbildung der angepassten Ausleseelektronik auf Grundlage der <i>Zero-Potential-Scanning</i> -Methode . . . . .	61
5.5	Weg von der Herstellung des Sensors bis zum Experiment . . . . .	63
5.6	Datenerfassung und -verarbeitung für die Kalibrierung . . . . .	65
5.7	Generierung der gemittelten Kalibrierung . . . . .	67
5.8	Beispiele für die gemittelte Kalibrierung . . . . .	68
6.1	Entwicklung eines Sensorkonzepts . . . . .	72
6.2	Zweite und optimierte Version des Temperatursensor-Arrays . . . . .	73
6.3	Finale Version des folienbasierten Temperatursensor-Arrays . . . . .	74

---

6.4	Bild eines vollendeten Temperatursensor-Arrays . . . . .	77
6.5	Aufnahme des Temperatursensor-Arrays mit dem Weißlichtinterferometer . . . . .	78
6.6	Schematische Darstellung der Messplatzumgebung . . . . .	79
6.7	Messung zur Kalibrierung des Temperatursensor-Arrays . . . . .	81
6.8	Berechnung der Kalibrierfunktion aus dem Datensatz . . . . .	82
6.9	Validierung der Kalibrierung . . . . .	83
6.10	Vermessung eines grünen Lasers mit dem Temperatursensor-Array . . . . .	87
6.11	Messaufbau zur Analyse der Temperaturverteilung abhängig von Laserstrahlgröße und -intensität.88	
6.12	Gemessener Temperaturverlauf mit des Temperatursensor-Arrays bei unterschiedlichen Laserstrahldurchmessern . . . . .	89
6.13	Strahldurchmesser: Implementierung einer lineare Messwertkorrektur . . . . .	90
6.14	Strahldurchmesser: Implementierung einer verlaufsangepassten Messwertkorrektur . . . . .	91
6.15	Untersuchung der Auswirkungen der Laserstrahlintensität auf die gemessene Temperaturverteilung	92
6.16	Temperaturverhalten des Temperatursensor-Arrays in der Simulation . . . . .	94
6.17	Simulation der Laserstrahlgrößenabhängigkeit des Temperaturprofils . . . . .	96
6.18	Simulation der Laserleistungsabhängigkeit des Temperaturprofils . . . . .	97
7.1	Aufbau eines Computerprozessors . . . . .	100
7.2	Notwendige Modifikation am Computerprozessors . . . . .	101
7.3	Messumgebung - Aufbau der Computerstruktur . . . . .	101
7.4	Foto vom Computermessplatz für die CPU-Messung . . . . .	103
7.5	Aufbau des Temperatursensor-Arrays auf einem Kühlkörper . . . . .	104
7.6	Bild des Temperatursensor-Arrays auf dem CPU-Kühlkörper . . . . .	106
7.7	Charakterisierung des Temperatursensor-Arrays auf der CPU und anschließende Kalibrierung .	107
7.8	Zeitliche Darstellung der Wärmeentwicklung mit einer Infrarotkamera . . . . .	109
7.9	Zeitliche Darstellung der Wärmeentwicklung bei Messung mit dem Temperatursensor-Array . .	110
7.10	Zeitliche Darstellung der Temperaturverteilung eines Prozessorkerns . . . . .	111
7.11	Individuelle Temperaturverteilung der einzelnen Prozessorkerne . . . . .	113
7.12	Temperatursignaturen von zwei gleichzeitig belasteten Prozessorkernen . . . . .	114
A.1	Leiterplattenlayout der Ansteuerplatine . . . . .	121
A.2	Foto des Temperaturmessplatzes . . . . .	124

## Tabellenverzeichnis

1.1	Übersicht über verschiedene gedruckte Temperatursensor-Arrays . . . . .	3
2.1	Liste mit Fixpunkten nach ITS-90 . . . . .	12
2.2	Übersichtstabelle über die Wärmeleitfähigkeit von Materialien . . . . .	20



# Eigene Veröffentlichungen

## Journalartikel

- [1] Robert Huber, D. Belles, T. Bücher, L. Franke, H. Amrouch, und U. Lemmer, “Integrated cpu monitoring using 2d temperature sensor arrays directly printed on heat sinks - under review,” *Advanced Materials Technology*, 2024.
- [2] G. Gramlich, Robert Huber, F. Häslich, A. Bhutani, U. Lemmer, und T. Zwick, “Process considerations for aerosol-jet printing of ultra fine features,” *Flexible and Printed Electronics*, vol. 8, no. 3, p. Article no: 035002, 2023.
- [3] H. Mescher, F. Schackmar, Robert Huber, H. Eggers, M. Zuber, E. Hamann, G. Gramlich, J. Dangelmaier, Q. Zhang, A. G. Rösch, T. Zwick, G. Hernandez-Sosa, U. W. Paetzold, und U. Lemmer, “Origami-inspired perovskite x-ray detector by printing and folding,” *npj Flexible Electronics*, vol. 7, no. 1, p. Article no: 9, 2023. 38.01.02; LK 01.
- [4] Robert Huber, S. Eizaguirre, H. Mescher, C. Willig, Q. Zhang, und U. Lemmer, “Fully printed temperature sensor array comprising  $625\ 60\times 60\ \mu\text{m}^2$  pixels,” *Advanced Sensor Research*, p. 2200031, 2022.
- [5] T. Bücher\*, Robert Huber\*, C. Eschenbaum, A. Mertens, U. Lemmer, und H. Amrouch, “Printed temperature sensor array for high-resolution thermal mapping,” *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2022.
- [6] Y. J. Donie, Y. Yuan, I. Allegro, F. Schackmar, I. M. Hossain, Robert Huber, J. Roger, U. W. Paetzold, G. Gomard, und U. Lemmer, “A self-assembly method for tunable and scalable nano-stamps: A versatile approach for imprinting nanostructures,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 7, no. 6, p. 2101008, 2022.
- [7] G. Gramlich, Robert Huber, U. Lemmer, und T. Thomas Zwick, “Aerosol jet printed millimeter wave interconnects in d-band,” in *2022 52nd European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 298–301, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022.
- [8] Q. Zhang, Q. Jin, A. Mertens, C. Rainer, Robert Huber, J. Fessler, G. Hernandez-Sosa, und U. Lemmer, “Fabrication of bragg mirrors by multilayer inkjet printing,” *Advanced Materials*, vol. 34, no. 33, p. 2201348, 2022.
- [9] S. Okur, M. Sarheed, Robert Huber, Z. Zhang, L. Heinke, A. Kanbar, C. Wöll, P. Nick, und U. Lemmer, “Identification of mint scents using a qcm based e-nose,” *Chemosensors*, vol. 9, no. 2, 2021.
- [10] Q. Jin, Q. Zhang, J. Chen, T. Gehring, S. Eizaguirre, Robert Huber, G. Gomard, U. Lemmer, und R. Kling, “High dynamic range smart window display by surface hydrophilization and inkjet printing,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 7, no. 5, p. 2101026, 2021.

- [11] A. Habermehl, P. Brenner, Robert Huber, A. Mertens, F. Winkler, L. Hahn, M. Guttman, C. Eschenbaum, und U. Lemmer, "Roll-to-roll hot embossing of 1d and 2d photonic nanostructures," *Advanced Engineering Materials*, vol. 21, no. 8, p. 1900110, 2019.
- [12] N. Bolse, Robert Huber, A. Habermehl, R. Eckstein, G. Hernandez-Sosa, A. Mertens, C. Eschenbaum, und U. Lemmer, "A low-cost versatile fluorescence quenching detection system for liquid- and vapor-phase sensing," in *2017 IEEE SENSORS*, pp. 1–3, 2017.

## Konferenzbeiträge

- [13] Robert Huber, Henning Mescher, Georg Gramlich, Qiaoshuang Zhang, Gerardo Hernandez-Sosa, und Uli Lemmer. Fully printed high-density temperature sensor array (conference presentation). In *Organic and Hybrid Sensors and Bioelectronics XV*. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
- [14] Robert Huber, Christian Willig, und Uli Lemmer. Fully printed high-density temperature sensor array (conference presentation). In *Advanced Soft Materials and Processing Concepts for Flexible Printed Optoelectronic Devices and Sensors*. Materials Research Society, MRS, 2022.

## Betreute Abschlussarbeiten

- [15] Daniel Belles. *Entwurf einer integrierten Ausleseelektronik für gedruckte passive Temperatursensormatrizen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [16] Stefan Hirt. *Entwicklung eines Messsystems zur Untersuchung der Auswirkung von Umwelteinflüssen auf die Detektion von Sprengstoffen mittels Fluoreszenzlöschung*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
- [17] Benedikt Haupt. *Validierung eines fluoreszenzbasierten Messprinzips*. Projektarbeit, Hochschule Karlsruhe; Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
- [18] Max Schlichting. *Einsatz maschineller Lernverfahren im Bereich TADF OLEDs*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie; Cynora GmbH, 2019.

## Literaturverzeichnis

- [19] Robert Bogue. Towards the trillion sensors market. 2014.
- [20] Sergey Y Yurish, Nikolay V Kirianaki, und Igor L Myshkin. World Sensors and MEMS Markets: Analysis and Trends. *Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest)*, 62:456–461, 2005.
- [21] INTECHNO CONSULTING. Markets Strategies Technologies International INTECHNO Press Release Major Findings of the New Report on Markets, Strategies, Technologies Sensors Markets 2016 Development of Sensors Markets for the Non-Military, Open World Market until 2016. Technical report, 2012.
- [22] Yasser Khan, Arno Thielens, Sifat Muin, Jonathan Ting, Carol Baumbauer, und Ana C. Arias. A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics. *Advanced Materials*, 32(15):1–29, 2020.
- [23] Hong Wei Tan, Yu Ying Clarrisa Choong, Che Nan Kuo, Hong Yee Low, und Chee Kai Chua. 3D printed electronics: Processes, materials and future trends. 2022.
- [24] Kenjiro Fukuda und Takao Someya. Recent Progress in the Development of Printed Thin-Film Transistors and Circuits with High-Resolution Printing Technology. *Advanced Materials*, 29(25), jul 2017.
- [25] Mark A.M. Leenen, Volker Arning, Heiko Thiem, Jürgen Steiger, und Ralf Anselmann. Printable electronics: Flexibility for the future. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 206(4):588–597, apr 2009.
- [26] Dimitris Barmpakos und Grigoris Kaltsas. A Review on Humidity, Temperature and Strain Printed Sensors-Current Trends and Future Perspectives. 2021.
- [27] Xin-Yi Zeng, Yan-Qing Tang, Xiao-Yi Cai, Jian-Xin Tang, und Yan-Qing Li. Solution-processed OLEDs for printing displays. *Materials Chemistry Frontiers*, 7(7):1166–1196, 2023.
- [28] Huihui Zhu, Eun-Sol Shin, Ao Liu, Dongseob Ji, Yong Xu, und Yong-Young Noh. Printable Semiconductors for Backplane TFTs of Flexible OLED Displays. *Advanced Functional Materials*, 30(20), aug 2019.
- [29] Yi Fei Wang, Tomohito Sekine, Yasunori Takeda, Koji Yokosawa, Hiroyuki Matsui, Daisuke Kumaki, Takeo Shiba, Takao Nishikawa, und Shizuo Tokito. Fully Printed PEDOT:PSS-based Temperature Sensor with High Humidity Stability for Wireless Healthcare Monitoring. *Scientific Reports*, 10(1):1–8, 2020.
- [30] Tomohito Sekine, Alexandre Gaitis, Jun Sato, Kohei Miyazawa, Kosuke Muraki, Rei Shiwaku, Yasunori Takeda, Hiroyuki Matsui, Daisuke Kumaki, Fabrice Domingues Dos Santos, Atsushi Miyabo, Micaël Charbonneau, und Shizuo Tokito. Low Operating Voltage and Highly Pressure-Sensitive Printed Sensor for Healthcare Monitoring with Analogic Amplifier Circuit. *ACS Applied Electronic Materials*, 1(2):246–252, feb 2019.

- [31] Yi Su, Chunsheng Ma, Jing Chen, Huiping Wu, Weixiang Luo, Yueming Peng, Zebang Luo, Lin Li, Yongsong Tan, Olatunji Mumini Omisore, Zhengfang Zhu, Lei Wang, und Hui Li. Printable, Highly Sensitive Flexible Temperature Sensors for Human Body Temperature Monitoring: A Review. *Nanoscale Res Lett*, 15:200, 2020.
- [32] Damien Thuau, Konstantinos Kallitsis, Fabrice Domingues Dos Santos, und Georges Hadziioannou. All inkjet-printed piezoelectric electronic devices: energy generators, sensors and actuators. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(38):9963–9966, 2017.
- [33] Giorgio Mattana und Danick Briand. Recent advances in printed sensors on foil. *Materials Today*, 19(2):88–99, 2016.
- [34] Roberto S Aga, Jack P Lombardi, Carrie M Bartsch, und Emily M Heckman. Performance of a Printed Photodetector on a Paper Substrate. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(3):305–308, 2014.
- [35] Ralph Eckstein, Noah Strobel, Tobias Rödlmeier, Konstantin Glaser, Uli Lemmer, und Gerardo Hernandez-Sosa. Fully Digitally Printed Image Sensor Based on Organic Photodiodes. *Advanced Optical Materials*, 6(5):1701108, 2018.
- [36] B B Narakathu, A Eshkeiti, A S G Reddy, M Rebros, E Rebrosova, M K Joyce, B J Bazuin, und M Z Atashbar. A novel fully printed and flexible capacitive pressure sensor. In *SENSORS, 2012 IEEE*, pages 1–4, 2012.
- [37] Yizong Li, Yuxuan Liu, Shah Rifat Alam Bhuiyan, Yong Zhu, und Shanshan Yao. Printed Strain Sensors for On-Skin Electronics. *Small Structures*, 3(2):2100131, 2022.
- [38] Marco Fattori, Simone Cardarelli, Joost Fijn, Pieter Harpe, Micael Charbonneau, Denis Locatelli, Stephanie Lombard, Christelle Laugier, Laurent Tournon, Stephanie Jacob, Krunoslav Romanjek, Romain Coppard, Herbert Gold, Manfred Adler, Martin Zirkl, Jonas Groten, Andreas Tschepp, Bernhard Lamprecht, Markus Postl, Barbara Stadlober, Josephine Socratous, und Eugenio Cantatore. A printed proximity-sensing surface based on organic pyroelectric sensors and organic thin-film transistor electronics. *Nature Electronics*, 5(5):289–299, 2022.
- [39] Dimitrios K Kampouris, Rashid O Kadara, Norman Jenkinson, und Craig E Banks. Screen printed electrochemical platforms for pH sensing. *Anal. Methods*, 1(1):25–28, 2009.
- [40] Yiheng Qin, Hyuck-Jin Kwon, Ayyagari Subrahmanyam, Matiar M R Howlader, P Ravi Selvaganapathy, Alex Adronov, und M Jamal Deen. Inkjet-printed bifunctional carbon nanotubes for pH sensing. *Materials Letters*, 176:68–70, 2016.
- [41] Jie Dai, Osarenkhoe Ogbeide, Nasiruddin Macadam, Qian Sun, Wenbei Yu, Yu Li, Bao-Lian Su, Tawfique Hasan, Xiao Huang, und Wei Huang. Printed gas sensors. *Chem. Soc. Rev.*, 49(6):1756–1789, 2020.
- [42] Atanu Bag und Nae-Eung Lee. Recent Advancements in Development of Wearable Gas Sensors. *Advanced Materials Technologies*, 6(3):2000883, 2021.
- [43] Yongkun Sui, Lok-kun Tsui, Alfred J Thibodeaux, und Judith M Lavin. An Aerosol Jet Printed Resistance Temperature Detector-Micro Hotplate with Temperature Coefficient of Resistance Stabilized by Electrical Sintering. *Advanced Materials Technologies*, 8(12):2202053, 2023.
- [44] M. D. Dankoco, G. Y. Tesfay, E. Benevent, und M. Bendahan. Temperature sensor realized by inkjet printing process on flexible substrate. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 205:1–5, 2016.

- [45] Vikram S Turkani, Dinesh Maddipatla, Binu B Narakathu, Bradley J Bazuin, und Massood Z Atashbar. A carbon nanotube based NTC thermistor using additive print manufacturing processes. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 279:1–9, 2018.
- [46] Lida Xu, Lanlan Li, Lantian Tang, Yingjun Zeng, Guochun Chen, Chenhe Shao, Chao Wu, Gonghan He, Qinnan Chen, Guicai Fang, Daoheng Sun, und Zhenyin Hai. Rapid Printing of High-Temperature Polymer-Derived Ceramic Composite Thin-Film Thermistor with Laser Pyrolysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(7):9996–10005, feb 2023.
- [47] Yantao Liu, Wei Ren, Peng Shi, Dan Liu, Yijun Zhang, Ming Liu, Zuo-Guang Ye, Weixuan Jing, Bian Tian, und Zhuangde Jiang. A Highly Thermostable In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ITO Thin Film Thermocouple Prepared via Screen Printing for High Temperature Measurements. *Sensors*, 18(4), 2018.
- [48] Md Taibur Rahman, Chih-Yang Cheng, Burcu Karagoz, Mike Renn, Matthew Schrandt, Andrew Gellman, und Rahul Panat. High Performance Flexible Temperature Sensors via Nanoparticle Printing. *ACS Applied Nano Materials*, 2(5):3280–3291, may 2019.
- [49] Dimitra Katerinopoulou, Peter Zalar, Jorgen Sweelssen, George Kiriakidis, Corné Rentrop, Pim Groen, Gerwin H. Gelinck, Jeroen van den Brand, und Edsger C. P. Smits. Large-Area All-Printed Temperature Sensing Surfaces Using Novel Composite Thermistor Materials. *Advanced Electronic Materials*, 5(2):1800605, feb 2019.
- [50] Kyungkwan Kim, Minhyun Jung, Bumjin Kim, Jihoon Kim, Kwanwoo Shin, Oh Sun Kwon, und Sanghun Jeon. Low-voltage, high-sensitivity and high-reliability bimodal sensor array with fully inkjet-printed flexible conducting electrode for low power consumption electronic skin. *Nano Energy*, 41:301–307, nov 2017.
- [51] Md Mofasser Mallick, Leonard Franke, Andres Georg Rösch, Mohamed Hussein, Zhongmin Long, Yolita M Eggeler, und Uli Lemmer. High-Sensitivity Flexible Thermocouple Sensor Arrays Via Printing and Photonic Curing. *Advanced Functional Materials*, page 2301681, 2023.
- [52] Yao Xiao, Shuwen Jiang, Yanrong Li, und Wanli Zhang. Screen-printed flexible negative temperature coefficient temperature sensor based on polyvinyl chloride/carbon black composites. *Smart Materials and Structures*, 30(2):025035, jan 2021.
- [53] Shingo Harada, Kenichiro Kanao, Yuki Yamamoto, Takayuki Arie, Seiji Akita, und Kuniharu Takei. Fully printed flexible fingerprint-like three-Axis tactile and slip force and temperature sensors for artificial skin. *ACS Nano*, 8(12):12851–12857, 2014.
- [54] Tiina Vuorinen, Juha Niittynen, Timo Kankkunen, Thomas M. Kraft, und Matti Mäntysalo. Inkjet-Printed Graphene/PEDOT:PSS Temperature Sensors on a Skin-Conformable Polyurethane Substrate. *Scientific Reports*, 6(1):35289, dec 2016.
- [55] Yingping He, Lanlan Li, Zhixuan Su, Lida Xu, Maocheng Guo, Bowen Duan, Wenxuan Wang, Bo Cheng, Daoheng Sun, und Zhenyin Hai. Electrohydrodynamic Printed Ultra-Micro AgNPs Thin Film Temperature Sensors Array for High-Resolution Sensing. *Micromachines*, 14(8), 2023.
- [56] Mary J Donahue, Ana Sanchez-Sanchez, Sahika Inal, Jing Qu, Roisin M Owens, David Mecerreyes, George G Malliaras, und David C Martin. Tailoring PEDOT properties for applications in bioelectronics. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 140:100546, 2020.
- [57] Klaus [Hrsg.] Irrgang und Lothar Michalowsky, editors. *Temperaturmesspraxis mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen*. Vulkan-Verl., Essen, 2004.

- [58] Peter R N Childs. *Practical temperature measurement*. Butterworth-Heinemann, Oxford [u.a.], 1. publ. edition, 2001.
- [59] Frank Bernhard. *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*, 2014.
- [60] Nikolaus [VerfasserIn] Hannoschöck. *Wärmeleitung und -transport : Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung*, 2018.
- [61] Rudolf [VerfasserIn] Huebener. *Leiter, Halbleiter, Supraleiter : eine kompakte Einführung in Geschichte, Entwicklung und Theorie der Festkörperphysik*, 2020.
- [62] Wolfgang Böge. *Vieweg Handbuch Elektrotechnik : Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*, 2007.
- [63] B Fellmuth und Physikalisch-technische Bundesanstalt. *Die internationalen Temperaturskalen: ITS-90 und PLTS-2000. (January 2007)*, 2019.
- [64] Burcu Arman Kuzubasoglu und Senem Kursun Bahadir. Flexible temperature sensors: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315:112282, 2020.
- [65] Giorgio Mattana, Thomas Kinkeldei, David Leuenberger, Caglar Ataman, Jinyu J Ruan, Francisco Molina-Lopez, Andrés Vásquez Quintero, Giovanni Nisato, Gerhard Tröster, Danick Briand, und Nico F de Rooij. Woven Temperature and Humidity Sensors on Flexible Plastic Substrates for E-Textile Applications. *IEEE Sensors Journal*, 13(10):3901–3909, 2013.
- [66] F Molina-Lopez, A Vásquez Quintero, G Mattana, D Briand, und N F de Rooij. Large-area compatible fabrication and encapsulation of inkjet-printed humidity sensors on flexible foils with integrated thermal compensation. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23(2):25012, jan 2013.
- [67] Shogo Tachibana, Yi Fei Wang, Tomohito Sekine, Ayako Yoshida, Yasunori Takeda, Mai Abe, Reo Miura, Yushi Watanabe, Daisuke Kumaki, und Shizuo Tokito. Flexible printed temperature sensor with high humidity stability using bilayer passivation. *Flexible and Printed Electronics*, 6(3):034002, jul 2021.
- [68] Chun-Chih Huang, Zhen-Kai Kao, und Ying-Chih Liao. Flexible Miniaturized Nickel Oxide Thermistor Arrays via Inkjet Printing Technology. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(24):12954–12959, dec 2013.
- [69] C. Bali, A. Brandlmaier, A. Ganster, O. Raab, J. Zapf, und A. Hübler. Fully Inkjet-Printed Flexible Temperature Sensors Based on Carbon and PEDOT: PSS. In *Materials Today: Proceedings*, volume 3, pages 739–745. Elsevier Ltd, jan 2016.
- [70] Christina Offenzeller, Marcel Knoll, Thomas Voglhuber-Brunnmaier, Marcus A. Hintermuller, Bernhard Jakoby, und Wolfgang Hilber. Fully Screen Printed Thermocouple and Microheater Applied for Time-of-Flight Sensing in Microchannels. *IEEE Sensors Journal*, 18(21):8685–8692, 2018.
- [71] Jong Seok Kim, Dae Yong Kwon, und Byong Deok Choi. High-accuracy, compact scanning method and circuit for resistive sensor arrays. *Sensors (Switzerland)*, 16(2), 2016.
- [72] Bin Bao, Dmitriy D Karnaushenko, Oliver G Schmidt, Yanlin Song, und Daniil Karnaushenko. Active Matrix Flexible Sensory Systems: Materials, Design, Fabrication, and Integration. *Advanced Intelligent Systems*, 4(10):2100253, 2022.

- [73] S R Forrest. *Organic Electronics: Foundations to Applications*. Oxford University Press, 2020.
- [74] W Yang, M Hon, H Yao, und B C K Tee. *An Atlas for Large-Area Electronic Skins: From Materials to Systems Design*. Elements in Flexible and Large-Area Electronics. Cambridge University Press, 2020.
- [75] Giorgio Mattana, Alberto Loi, Marion Woytasik, Massimo Barbaro, Vincent Noël, und Benoît Piro. Inkjet-Printing: A New Fabrication Technology for Organic Transistors. *Advanced Materials Technologies*, 2(10):1700063, 2017.
- [76] Feng Shao und Qing Wan. Recent progress on jet printing of oxide-based thin film transistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(14):143002, feb 2019.
- [77] Boseok Kang, Wi Hyoung Lee, und Kilwon Cho. Recent advances in organic transistor printing processes. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(7):2302–2315, 2013.
- [78] Wikimedia Commons. Heat-flow-wall.svg, 2019.
- [79] G S Ranganath. Black-body radiation. *Resonance*, 13(2):115–133, 2008.
- [80] Peter Böckh. Wärmeübertragung : Grundlagen und Praxis, 2017.
- [81] A Marti, J L Balenzategui, und R F Reyna. Photon recycling and Shockley’s diode equation. *Journal of Applied Physics*, 82(8):4067, 1997.
- [82] Frank Thuselt. Physik der Halbleiterbauelemente : Einführendes Lehrbuch für Ingenieure und Physiker, 2011.
- [83] Josef Lutz. Halbleiter-Leistungsbaulemente : Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit, 2012.
- [84] Zheng Cui. *Printed Electronics*. Wiley, Singapore, jun 2016.
- [85] Katsuki Saganuma. Introduction to Printed Electronics, 2014.
- [86] D E Riemer. The Theoretical Fundamentals of the Screen Printing Process. *Microelectronics International*, 6(1):8–17, jan 1989.
- [87] W Hainke, H D Voss, und J Weichardt. *Siebdruck: Technik, Praxis, Geschichte*. DuMont Taschenbücher. DuMont, 1979.
- [88] J van Duppen. *Handbuch für den Siebdruck*. Verlag Der Siebdruck, 1986.
- [89] Nathan Zavanelli und Woon-Hong Yeo. Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics. *ACS Omega*, 6(14):9344–9351, apr 2021.
- [90] Ethan B Secor. Principles of aerosol jet printing. *Flexible and Printed Electronics*, 3(3):35002, 2018.
- [91] OPTOMECA Inc. AEROSOL JET ® FLEX SYSTEM For Conformal Printed Electronics Applications, 2023.
- [92] Kurt K. Christenson, Michael J. Renn, Jason A. Paulsen, John David Hamre, Chad Conroy, und James Q. Feng. Shuttering of aerosol streams, nov 2018.
- [93] Sebastian Binder, Markus Glatthaar, und Edda Rädlein. Analytical Investigation of Aerosol Jet Printing. *Aerosol Science and Technology*, 48(9):924–929, sep 2014.

- [94] Guang Chen, Yuan Gu, Harvey Tsang, Daniel R Hines, und Siddhartha Das. The Effect of Droplet Sizes on Overspray in Aerosol-Jet Printing. *Advanced Engineering Materials*, 20(8):1701084, aug 2018.
- [95] James Q Feng, Alex Ramm, und Michael J Renn. A quantitative analysis of overspray in Aerosol Jet® printing. *Flexible and Printed Electronics*, 6(4):45006, 2021.
- [96] C. Rodes, T. Smith, R. Crouse, und G. Ramachandran. Measurements of the size distribution of aerosols produced by ultrasonic humidification. *Aerosol Science and Technology*, 13(2):220–229, 1990.
- [97] N J Wilkinson, M A A Smith, R W Kay, und R A Harris. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(11):4599–4619, 2019.
- [98] Aurelio Agliolo Gallitto, Roberto Zingales, Onofrio Rosario Battaglia, und Claudio Fazio. An approach to the Venturi effect by historical instruments. *Physics Education*, 56(2):25007, 2021.
- [99] Niranjana Sahu, B Parija, und S Panigrahi. Fundamental understanding and modeling of spin coating process: A review. *Indian Journal of Physics*, 83(4):493–502, 2009.
- [100] Ronald G Larson und Timothy J Rehg. Spin Coating BT - Liquid Film Coating: Scientific principles and their technological implications. pages 709–734. Springer Netherlands, Dordrecht, 1997.
- [101] H J Levinson. *Principles of Lithography*. Online access with subscription: SPIE Digital Library. Society of Photo Optical, 2005.
- [102] Wei Wu. *Printed Electronics Technologies*. The Royal Society of Chemistry, jul 2022.
- [103] G. L. Allen, R. A. Bayles, W. W. Gile, und W. A. Jesser. Small particle melting of pure metals. *Thin Solid Films*, 144(2):297–308, 1986.
- [104] E. Ide, S. Angata, A. Hirose, und K. F. Kobayashi. Metal-metal bonding process using Ag metallo-organic nanoparticles. *Acta Materialia*, 53(8):2385–2393, 2005.
- [105] Jin Ding, Jun Liu, Qingyong Tian, Zhaohui Wu, Weijing Yao, Zhigao Dai, Li Liu, und Wei Wu. Preparing of Highly Conductive Patterns on Flexible Substrates by Screen Printing of Silver Nanoparticles with Different Size Distribution. *Nanoscale Research Letters*, 11(1):412, 2016.
- [106] Jeff West, Michael Carter, Steve Smith, und James Sears. Photonic sintering of silver nanoparticles: comparison of experiment and theory. In *Sintering-Methods and Products*, pages 173–188. InTech, 2012.
- [107] Robert Abbel, Tim van Lammeren, Rob Hendriks, Jeroen Ploegmakers, Eric J Rubingh, Erwin R Meinders, und Wilhelm A Groen. Photonic flash sintering of silver nanoparticle inks: a fast and convenient method for the preparation of highly conductive structures on foil. *MRS Communications*, 2(4):145–150, 2012.
- [108] S Magdassi und A Kamyshny. *Nanomaterials for 2D and 3D Printing*. Wiley, 2017.
- [109] Giuseppina Polino, Santhosh Shanmugam, Guy J P Bex, Robert Abbel, Francesca Brunetti, Aldo Di Carlo, Ronn Andriessen, und Yulia Galagan. Photonic Flash Sintering of Ink-Jet-Printed Back Electrodes for Organic Photovoltaic Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(3):2325–2335, jan 2016.

- [110] Masahiro Tosa. Compendium of Surface and Interface Analysis. *Compendium of Surface and Interface Analysis*, pages 679–682, 2018.
- [111] Chin Y. Poon und Bharat Bhushan. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler. *Wear*, 190(1):76–88, 1995.
- [112] Dong Hyeok Lee und Nahm Gyoo Cho. Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer. *Measurement Science and Technology*, 23(10), 2012.
- [113] Wilfried Bauer, Mark Weber, und Sirichanok Chanbai. *White Light Interferometry*, pages 4115–4127. Springer US, Boston, MA, 2013.
- [114] James C. Wyant. "White light interferometry. *Fibre Optics '90*, 1314(2002):307, 1990.
- [115] Yasuyuki Okano. Compendium of Surface and Interface Analysis, 2018.
- [116] Kalsoom Akhtar, Shahid Ali Khan, Sher Bahadar Khan, und Abdullah M Asiri. *Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization*, pages 113–145. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [117] L A Giannuzzi und F A Stevie. A review of focused ion beam milling techniques for TEM specimen preparation. *Micron*, 30(3):197–204, 1999.
- [118] R M Langford und A K Petford-Long. Preparation of transmission electron microscopy cross-section specimens using focused ion beam milling. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 19(5):2186–2193, 2001.
- [119] Jon Orloff, Mark Utlaut, und Lynwood Swanson. *High resolution focused ion beams : FIB and its applications ; the physics of liquid metal ion sources and ion optics and their application to focused ion beam technology*. Kluwer Academic, Plenum Publ., New York, NY [u.a.], 2003.
- [120] Tejin DuPont Films. Teonex Product Information. 2318:1–2, 2004.
- [121] DuPont. DuPont™ Kapton® TDS, 2021.
- [122] Robert G Bryant. Polyimides. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, pages 1–27. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [123] HD Microsystems. PI2600series Low Stress Polyimide TDS. (July):1–4, 2020.
- [124] LOCTITE Henkel AG & Co.KGaA. TDS LOCTITE ECI 1010 E&C, March-2018. 2018.
- [125] NovaCentrix. Metalon Conductive Inks for Printed Electronics - Metalon JS-A221AE. 2011.
- [126] Kuan Sun, Shupeng Zhang, Pengcheng Li, Yijie Xia, Xiang Zhang, Donghe Du, Furkan Halis Isikgor, und Jianyong Ouyang. Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(7):4438–4462, 2015.
- [127] Xi Fan, Wanyi Nie, Hsinhan Tsai, Naixiang Wang, Huihui Huang, Yajun Cheng, Rongjiang Wen, Liujia Ma, Feng Yan, und Yonggao Xia. PEDOT:PSS for Flexible and Stretchable Electronics: Modifications, Strategies, and Applications. *Advanced Science*, 6(19), 2019.
- [128] LOCTITE Henkel AG & Co.KGaA. TDS LOCTITE EDAG PM 404 E&C. 2014.
- [129] Jinliang He. *Metal Oxide Varistors: From Microstructure to Macro-Characteristics*. 2019.

- [130] Jinliang He, Chenlu Cheng, und Jun Hu. Electrical degradation of double-Schottky barrier in ZnO varistors. *AIP Advances*, 6(3), 2016.
- [131] Jules D. Levine. Theory of Varistor Electronic Properties. *C R C Critical Reviews in Solid State Sciences*, 5(4):597–608, 1975.
- [132] Hidayet Cetin und Enise Ayyildiz. Temperature dependence of electrical parameters of the Au/n-InP Schottky barrier diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 20(6):625–631, 2005.
- [133] Mohammad Mohiuddin und Suong Van Hoa. Electrical resistance of CNT-PEEK composites under compression at different temperatures. *Nanoscale Research Letters*, 6(1):419, 2011.
- [134] S A Sergienko. THERMAL DEPENDENCE OF ELECTRIC CONDUCTIVITY IN THERMOPLASTIC COMPOSITES t. *Mekhanika Kompozitnykh Materialov*, 31(4):526–532, 1995.
- [135] Chris Phillips, Awadh Al-Ahmadi, Sarah Jane Potts, Tim Claypole, und Davide Deganello. The effect of graphite and carbon black ratios on conductive ink performance. *Journal of Materials Science*, 52(16):9520–9530, aug 2017.
- [136] Cheng Zhang, Chun An Ma, Ping Wang, und Masao Sumita. Temperature dependence of electrical resistivity for carbon black filled ultra-high molecular weight polyethylene composites prepared by hot compaction. *Carbon*, 43(12):2544–2553, oct 2005.
- [137] Yihu Song und Qiang Zheng. Effect of voltage on the conduction of a high-density polyethylene/carbon black composite at the NTC region. *Composites Science and Technology*, 66(7-8):907–912, jun 2006.
- [138] M Narkis, A Ram, und Z Stein. Electrical properties of carbon black filled crosslinked polyethylene. *Polymer Engineering & Science*, 21(16):1049–1054, 1981.
- [139] Jiyun Feng und Chi Ming Chan. Double positive temperature coefficient effects of carbon black-filled polymer blends containing two semicrystalline polymers. *Polymer*, 41(12):4559–4565, jun 2000.
- [140] Min Kang Seo, Kyong Yop Rhee, und Soo Jin Park. Influence of electro-beam irradiation on PT-C/NTC behaviors of carbon blacks/HDPE conducting polymer composites. *Current Applied Physics*, 11(3):428–433, may 2011.
- [141] Pritesh Gokhale, Dana Mitra, Enrico Sowade, Kalyan Yoti Mitra, Henrique Leonel Gomes, Eloi Ramon, Ammar Al-Hamry, Olfa Kanoun, und Reinhard R Baumann. Controlling the crack formation in inkjet-printed silver nanoparticle thin-films for high resolution patterning using intense pulsed light treatment. *Nanotechnology*, 28(49):495301, 2017.
- [142] Cameron Crump, Vincens Gjakaj, Brian Wright, John Papapolymerou, John D Albrecht, und Premjeet Chahal. UV Flash Sintering of Aerosol Jet Printed Silver Conductors for Microwave Circuit Applications. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 11(2):342–350, 2021.
- [143] David Prutchi und Mircea Arcan. Dynamic contact stress analysis using a compliant sensor array. *Measurement*, 11(3):197–210, 1993.
- [144] Jian Feng Wu. Scanning Approaches of 2-D Resistive Sensor Arrays: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 17(4):914–925, 2017.

- 
- [145] Akio Tanaka, Shouhei Matsumoto, Nanao Tsukamoto, Shigeyuki Itoh, Kazuhiro Chiba, Tsutomu Endoh, Akihiro Nakazato, Kuniyuki Okuyama, Yuichi Kumazawa, Minoru Hijikawa, Hideki Gotoh, Takanori Tanaka, und Nobukazu Teranishi. Infrared focal plane array incorporating silicon IC process compatible bolometer. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 43(11):1844-1850, 1996.
- [146] Lin Shu, Xiaoming Tao, und David Dagan Feng. A new approach for readout of resistive sensor arrays for wearable electronic applications. *IEEE Sensors Journal*, 15(1):442-452, 2015.
- [147] Tommaso D'Alessio. Measurement errors in the scanning of piezoresistive sensors arrays. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 72(1):71-76, 1999.
- [148] Hong Liu, Yuan Fei Zhang, Yi Wei Liu, und Ming He Jin. Measurement errors in the scanning of resistive sensor arrays. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 163(1):198-204, 2010.
- [149] Amir Karim und Jan Y. Andersson. Infrared detectors: Advances, challenges and new technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 51(1), 2013.
- [150] Antoni Rogalski. Infrared detectors: An overview. *Infrared Physics and Technology*, 43(3-5):187-210, 2002.
- [151] Antoni Rogalski. Infrared detectors, 2011.
- [152] Ori Bass und Joseph Shor. A Miniaturized 0.003 mm<sup>2</sup>PNP-Based Thermal Sensor for Dense CPU Thermal Monitoring. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 67(9):2984-2992, 2020.
- [153] Joseph Shor. Compact Thermal Sensors for Dense CPU Thermal Monitoring and Regulation: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 21(11):12774-12788, 2021.
- [154] Shahid Anwar, Jasni Mohamad Zain, Mohamad Fadli Zolkipli, Zakira Inayat, Suleman Khan, Bokolo Anthony, und Victor Chang. From intrusion detection to an intrusion response system: Fundamentals, requirements, and future directions. *Algorithms*, 10(2), 2017.
- [155] Lília De Sá Silva, Adriana C. Ferrari Dos Santos, José Demisio S. Da Silva, und Antonio Montes. A neural network application for attack detection in computer networks. *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*, 2:1569-1574, 2004.
- [156] L. Vokorokos und A. Baláž. Host-based intrusion detection system. *INES 2010 - 14th International Conference on Intelligent Engineering Systems, Proceedings*, pages 43-47, 2010.
- [157] David Paul-Pena, Prashanth Krishnamurthy, Ramesh Karri, und Farshad Khorrami. Process-aware side channel monitoring for embedded control system security. *IEEE/IFIP International Conference on VLSI and System-on-Chip, VLSI-SoC*, 2017.
- [158] Press Intel. Intel Announces World's Best Gaming Processor: New 9th Gen Intel Core i9-9900K | Intel Newsroom | Deutschland, 2020.
- [159] Intel. Intel Core i9 9900K Specifications, 2018.



# Danksagung

Die letzten Seiten dieser Arbeit möchte ich nutzen, um Danke zu sagen...

Mit dem Ende meiner Promotion kann ich inzwischen auf einige Jahr am LTI zurückschauen und freue mich, dass ich solange Teil dieser Geschichte sein durfte. Ich habe mich immer sehr wohl gefühlt und das gute Miteinander auch über die verschiedenen Arbeitsgruppen sehr geschätzt. In dieser Zeit konnte ich nicht nur viele wissenschaftliche Themen kennenlernen, sondern ich bekam die Gelegenheit mit vielen unterschiedlichen Menschen zusammenzuarbeiten. Dabei kann ich mich glücklich schätzen, dass aus einigen dieser Begegnungen inzwischen auch Freundschaften geworden sind. In diesem Zusammenhang möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Uli Lemmer meinen tiefsten Dank aussprechen und ich würde auch soweit gehen, ihm die „Schuld“ für gerade dieses gute Arbeitsklima am LTI geben. Durch das entgegengebrachte Vertrauen, hatte ich von Anfang an die Chance mich frei zu entwickeln, eigene Ideen nachzuverfolgen und diese mit den bereit gestellten Mitteln auch umzusetzen. Gab es mal Zweifel an einem Weg, kam der notwendige Schubs und bei Problemen, stand er mir immer mit Rat und Tat beiseite. Ich würde mich auch in Zukunft freuen, wenn wir mal das eine oder andere Freitagsabendbier trinken könnten.

Darüber hinaus, danke ich Prof. Dr. Hussam Amrouch, der sich bereit erklärt hat das Korreferat zu übernehmen - auch wenn mein Dissertation in Deutsch verfasst wurde. Auch dieser Kontakt besteht bereits seit einigen Jahren und beruht zunächst nur der Anfrage, ob wir am LTI Temperatursensoren herstellen können. Gegen Ende war dies ein erfolgreiche Kooperation und ich hoffe, dass diese auch noch eine Zukunft am LTI hat.

Zu Beginn meiner Promotion kam ich im Rahmen eines Stipendiums in die KSOP. Natürlich neben der finanziellen Unterstützung, konnte ich in der Graduierten Schule an vielen interessanten Veranstaltungen teilnehmen und über den eigenen (wissenschaftlichen) Tellerrand rausschauen.

Noch bevor ich selbst im Laufe meiner Promotion ins Druckerbusiness eingestiegen bin, hatte ich immer wieder die Gelegenheit am Innovation Lab (iL) in die Thematik zu schauen. Mit dem alten Kammann Siebdrucker ging damals alles los. Unserer LTI Arbeitsgruppe am iL möchte ich hiermit nochmals für die unregelmäßig Zuflucht danken. Hier möchte ich vor allem den frisch gebackenen Prof. Dr. Gerardo Hernandez-Sosa nennen, der dank der Mitorganisation der MRS in Hawaii diese Reise ermöglichte. Nicht zu vergessen, dass Guacamole ohne Knoblauch zubereitet wird.

Um auf das LTI zurückzukommen: Zunächst möchte ich nochmals allen Kollegen:innen für ihr Engagement und Einsatz danken. Einige möchte ich in diesem Rahmen allerdings erwähnen:

- Das Sekretariat war bei bürokratischen Hürden am KIT immer eine große Hilfe. Trotz der vielen Aufgaben konnte man immer mit einem offenen Ohr und auch mit dem einen oder anderen Gespräch rechnen. Vielen Dank für euren Einsatz Astrid Henne, Claudia Holeisen und Nicole Klöfer.
- Bei jeglichen technischen oder auch administrativen Probleme im und um das LTI , möchte ich hiermit nochmals besonders Christian Kayser und Felix Geislhöringer danken. Somit war sowohl die Durchführung wissenschaftlicher Experimente gesichert, sondern auch für das leibliche Wohl an der Kaffeemaschine gesorgt.

- Bei ausgefallenen Wünschen an Bauteilen und Haltern, war die LTI-Werkstatt immer eine gute Anlaufstelle. In diesem Zusammenhang möchte ich dem Werkstattteam Mario Süttsch, Hans Vögele und Jochen Ochs danken.
- Außerdem möchte ich den verschiedenen IT-Admins in Laufe meiner Zeit am LTI danken. Ich weiß wie viel Arbeit es kostet das Netzwerk und die Infrastruktur am Laufen zu halten. Daher geht mein Dank an Carsten Eschenbaum, Dominik Theobald, Jonathan Lehr und Mohamed Hussein Ahmed.

Besonders meine Bürokollegen waren immer für eine gute Pause mit Eis oder Kaffee zu haben. Auch wenn mal was nicht geklappt hat, habt ihr mir immer geholfen die entstanden Motivationsdellen zu überwinden. Natürlich hatte ihr auch immer ein Ohr für Probleme in jeglicher Hinsicht und meistens auch eine gute Lösung parat. Durch die gemeinsame Zeit, ich denke das kann man bedenkenlos sagen, sind wir zu Freunden geworden. Vielen Dank für gute Zeit in Raum 014: Nico Bolse, Anne Habermehl, Adrian Merstens (Schwertl), Qiaoshuang Zhang, Jan Feßler, Hankun Yang und Weimu Xu. Besonders möchte ich an dieser Stelle Carsten Eschenbaum erwähnen, der mich zu Beginn der Promotion und auch während der Masterarbeit als Gruppenleiter unter seine Fittiche genommen hat.

Hervorzuheben sind Henning Mescher, Dominik Theobald und Fabian Denk, die mit mir durch dick und dünn gegangen sind. Durch Aktivitäten auch jenseits der Uni, wie Biken, Wandern, Biergärten, etc. ist eine Freundschaft entstanden, die hoffentlich auch nach LTI Zeiten weiter Bestand haben wird. Und nicht zu vergessen Georg Gramlich, der als Aerosol-Jet-Leidensgenosse ähnliche Qualen wie ich erleiden musste. Immerhin konnte der Konferenzaufenthalt in Hawaii etwas dafür entschädigen.

Die letzten Zeilen möchte ich nun meinen Eltern Hildegard und Gustav, sowie der Familie widmen. Vielen Dank, dass ihr mich so intensiv und ausdauernd auf meinem Weg unterstützt habt. Ohne eure Rückendeckung wäre ich heute nicht an dieser Stelle. Ihr habt meine Entscheidungen immer bedingungslos mitgetragen und hatte so ein sorgenloses Studium. In guten Zeiten habt ihr mit mir gefeiert, aber auch wenn es mal schwierig wurde, konnte und kann ich mich auf euch verlassen - und das ist unbezahlbar. Für all das und noch viel mehr möchte ich mich von Herzen bedanken!

Im Laufe der Promotion kam noch eine Schwiegerfamilie dazu: Auch an euch meinen herzlichsten Dank für die vielen neuen Aspekte, die ihr in mein Leben gebracht habt. Ich freue mich das ihr alle Teil meines Lebens geworden seid.

*Last but not least* möchte ich mich bei meiner Partnerin und inzwischen Ehefrau (man sind wir alt geworden) Larissa für die Geduld, dein Verständnis und Vertrauen bedanken! Inzwischen sind wir durch einige gemeinsame Jahre gegangen und ich denke immer wieder gerne an die Zeit zurück. Deine Zuversicht und gute Laune hilft mir jedes Mal im Stress und unter Anspannung am Boden zu bleiben. Liebe Larissa, ich bin sehr froh dich an meiner Seite zu wissen...

Vielen lieben Dank euch allen!