

Projektträger für das



Schlussbericht vom 10.12.2025

zum IGF-Vorhaben FKZ: 01IF22632N

Thema

InlineSense – Dünnschichtsensoren und -aktoren zur Inline-Steuerung von schmelzeführenden Kanälen

Berichtszeitraum

01.11.2022 bis 31.08.2025

Forschungsvereinigung

Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V. (FGK)
Haardtring 100
64295 Darmstadt

Forschungseinrichtung(en)

TU Dortmund – Lehrstuhl für Konstruktion und Produktentwicklung (LKP)
(vormals: Fachgebiet Maschinenelemente)
Leonhard-Euler-Straße 5
44227 Dortmund



TU Dortmund – Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT)
Leonhard-Euler-Straße 2
44227 Dortmund



Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Heißkanalanforderungen und Konstruktion.....	4
1.2	Arbeitspaket 2: Auswahl der Beschichtungswerkstoffe	20
1.3	Arbeitspaket 3: Synthese der Dünnschichten / Sensoren (aus ZB1).....	23
1.4	Arbeitspaket 4: Kalibrierung und Funktionstest der Sensoren	30
1.5	Arbeitspaket 5: Evaluation und Praxisversuche	43
1.6	Arbeitspaket 6: Evaluierung der Schichteigenschaften	46
1.7	Arbeitspaket 7: Labortest und Festigkeitsversuche.....	50
2	Verwendung der Zuwendung.....	56
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	57
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	58
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft	60
6	Durchgeführte Transfermaßnahmen.....	61
7	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	62
8	Literaturverzeichnis	63

1.1 Arbeitspaket 1: Heißkanalanforderungen und Konstruktion

Zu Beginn des Forschungsvorhabens InlineSense wurden zunächst die Anforderung an das zu entwickelnde Hotend formuliert. Die Anfertigung der Anforderungsliste erfolgte dabei in engem Austausch mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, um praxisnahe Anforderungen und reale Belastungsszenarien in den Entwicklungsprozess einfließen zu lassen. Es wurde festgelegt, ein Hotend für einen Filamentdurchmesser von 2,85 mm zu realisieren. Diese Entscheidung wurde damit begründet, dass das Hotend auch für High-Flow-Anwendungen einsetzbar sein soll. Um neben Standardthermoplasten wie PLA und PET-G auch Werkstoffe mit höheren technischen Eigenschaften wie PEEK oder PA12 verarbeiten zu können, soll die Temperaturfestigkeit des Hotends bei mindestens 300°C liegen. Ebenso wurde entschieden, das Hotend mit marktüblichen Düsen und Heatbreaks auszustatten, um günstige und gut verfügbare Standardkomponenten zu verwenden.

Als weitere geometrische Anforderungen an das Hotend ergeben sich grundsätzlich, dass funktionale Kontaktierungsmöglichkeiten für die zu entwickelnden Dünnschicht-Sensoren und –Aktoren vorgesehen werden müssen und das Bauteil möglichst kompakt und leicht konstruiert werden soll. Aus dem Ziel, den Heißkanal mittels PVD-Verfahren geometrisch bestimmt zu beschichten, ergibt sich zudem, dass das Hotend in einer geteilten Ausführung zu konstruieren ist. Die applizierten Dünnschichten müssen dabei elektrisch untereinander und zum Rest des Hotends elektrisch isoliert sein, um eine korrekte Ansteuerung und ein Auslesen der Messsignale zu ermöglichen. Für die notwendige Betriebssicherheit ist es außerdem unabdingbar, dass das Hotend dicht ist. Aufgrund der geteilten Ausführung ist dieser Aspekt von besonderer Bedeutung, da sich im Gegensatz zu konventionellen Hotends weitere Spalte ergeben, durch die schmelzflüssiger Kunststoff entweichen kann.

Eine Gesamtübersicht der für die Entwicklung des Hotends aufgestellten Anforderungsliste ist nachfolgend dargestellt.

Table 1: Anforderungsliste an das zu konstruierenden Hotend

1.	Geometrie	
1.1	Heißkanal für 2,85mm Filament ausgelegt	F
1.2	Anschlussmöglichkeit für Düse und Heatbreak vorgesehen	F
1.3	Geteiltes Design für Zugänglichkeit beim Beschichten	F
1.4	Kontaktierungsmöglichkeiten für Sensoren/Aktoren vorhanden	F
1.5	Abmessungen möglichst gering	W
1.6	Geringes Gewicht	W
2.	Energie/Signale	
2.1	Funktionsschichten untereinander elektrisch isoliert	F
2.2	Funktionsschichten zum Substrat elektrisch isoliert	F
2.3	Heizwendelbetrieb im Niedervoltbereich <50 V	F
2.4	Temperaturmessung mit Thermoelement Typ J oder Typ K	F
2.5	Druckmessung im Hotend ermöglichen	W

3.	Stoff	
3.1	Substratwerkstoff im PVD-Verfahren beschichtbar	F
3.2	Geringe Unterschiede bei Wärmeausdehnungskoeffizienten von Substrat und Beschichtungsstoffen	W
3.3	Hohe Wärmeleitfähigkeit des Substrats	W
3.4	Elektrische nicht-Leitfähigkeit des Substrats	W
3.5	Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten möglich	W
4.	Fertigung	
4.1	Normteile/Zukaufteile verwenden	F
4.2	Einfache Fertigung mit konventionellen Anlagen möglich	W
4.3	Eindeutige Montage	W
4.4	Einfache/günstige Maskierungen verwenden	W
5.	Gebrauch	
5.1	Dichtigkeit des geteilten Hotends im Betrieb	F
5.2	Hohe Arbeitssicherheit	F
5.3	Temperaturfestigkeit bis 300°C	F
5.2	Einfache (De-)Montage	W
5.3	Geringer Verschleiß	W
5.4	Wartungsarm	W
5.6	Hohe Funktionssicherheit	W
5.7	Temperaturfestigkeit bis ca. 450°C	W

W: Wunsch; F: Forderung

Aus den durchgeführten Voruntersuchungen für das vorliegende Projekte lässt sich ableiten, dass das Substratmaterial einen erheblichen Einfluss auf die Schichtqualität besitzt. Von Relevanz ist beispielsweise die Wärmedehnung des Substratmaterials. Beim Aufheizen des Hotends im Betrieb, aber auch beim Beschichtungsvorgang selbst, kommt es zu einer hohen Wärmeentwicklung und somit -ausdehnung. Wenn Dünnschicht und Substratmaterial eine zu große Differenz hinsichtlich ihrer Wärmeausdehnung aufweisen, kann es zu Rissen und Abplatzungen der Beschichtung kommen. Weiter muss das Hotend-Material für den gegebenen Anwendungsfall eine ausreichend hohe thermische Leitfähigkeit besitzen. So kann eine homogene Wärmeverteilung im Hotend erzielt sowie ein schnelles Ansprechverhalten der Regelstrecke gewährleistet werden. Aus diesem Grund wurden für das Forschungsvorhaben mehrere Substratmaterialien auf Grundlage ihres spezifischen mittleren Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit ausgewählt. Dabei wurden zwei vergleichbare austenitische Stähle 1.4404 (AISI 316L) und 1.4301 (AISI 304), Messing, eine Aluminium-Legierung AlMg4,5Mn (AW5083, 3.3547) sowie Aluminiumnitrid (AlN) vorausgewählt. Das AlN ist vor allem aufgrund der geringen Wärmeausdehnung sowie zusätzlich geringen elektrischen Leitfähigkeit interessant. Hierdurch kann theoretisch die elektrisch isolierende PVD-Schicht zwischen den Funktionsschichten und dem Substrat entfallen.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt angemerkt, ist zur Aufbringung der Funktionsschichten eine Teilung des Heißkanals notwendig. Das PVD-Verfahren arbeitet nach einem Sichtlinien-Prinzip, laut dem zu beschichtende Flächen direkt zugänglich sein müssen (siehe Abbildung 2). Deutlich wird hier links, dass die Strukturen im Innern eines Kanals bzw. einer Bohrung nicht wie gewünscht beschichtet werden (violett). Bei der geteilten Ausführung, bei der die Heißkanalkontur radial zugänglich ist, kann dagegen eine Beschichtung der gewünschten Flächen (grün) erfolgen. Dennoch treten hier durch die Materialstärke der verwendeten Maskierung (dunkelgrau) Abschattungseffekte auf, die einer optimalen Beschichtung entgegenstehen. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, wird das Bauteil (hellgrau) in der Beschichtungskammer vor dem Target, der Quelle des Beschichtungsstoffs, (Kreis) rotiert. Zusätzlich soll eine möglichst dünne Maskierung verwendet werden, um die Abschattungseffekt so weit wie möglich zu reduzieren.

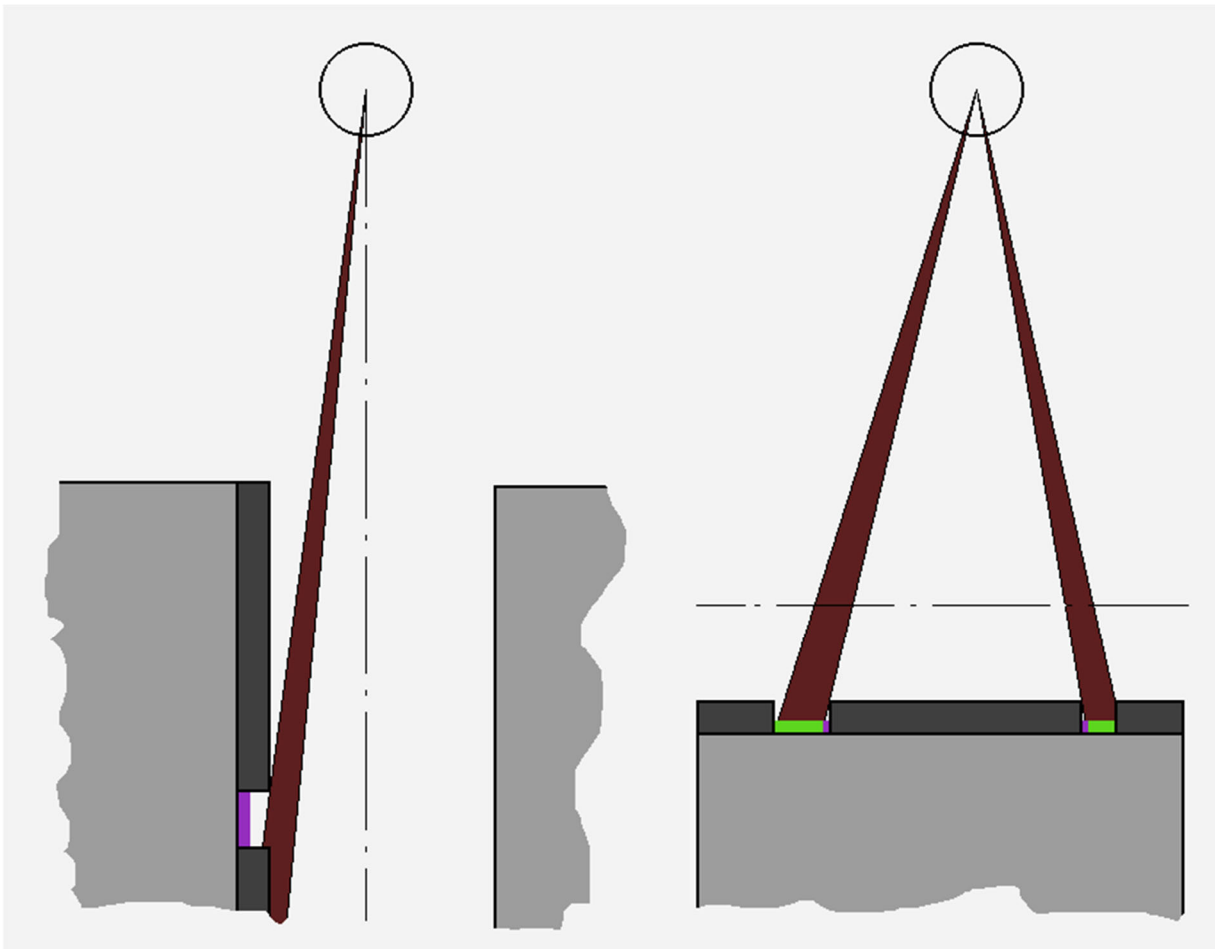


Abbildung 2: Prinzip der Sichtlinien im PVD-Prozess (Hellgrau: Substrat, Dunkelgrau: Maskierung, violett: nicht beschichtete Bereiche, grün: beschichtete Bereiche)

In der Beantragung des Projektes wurde bereits die Skizzierung eines geteilten Heißkanals vorgenommen. (Abbildung 3) Hierbei wurde allerdings noch keine Anbringung von Düse und Heatbreak und auch kein Dichtungskonzept berücksichtigt, sodass die Skizzierung keine umsetzbare Lösung darstellt. Im Laufe des Projekts musste daher für die angesprochenen Aspekte Lösungen erarbeitet und erprobt werden. Im Folgenden werden die im Entwicklungsprozess zu berücksichtigenden Hauptaspekte für eine bessere Lesbarkeit in Unterkapitel unterteilt. Dennoch bedingen sich unterschiedliche Gestaltungsaspekte gegenseitig, sodass oftmals Querverweise auf andere Untersuchungen und Ergebnisse verwendet werden.

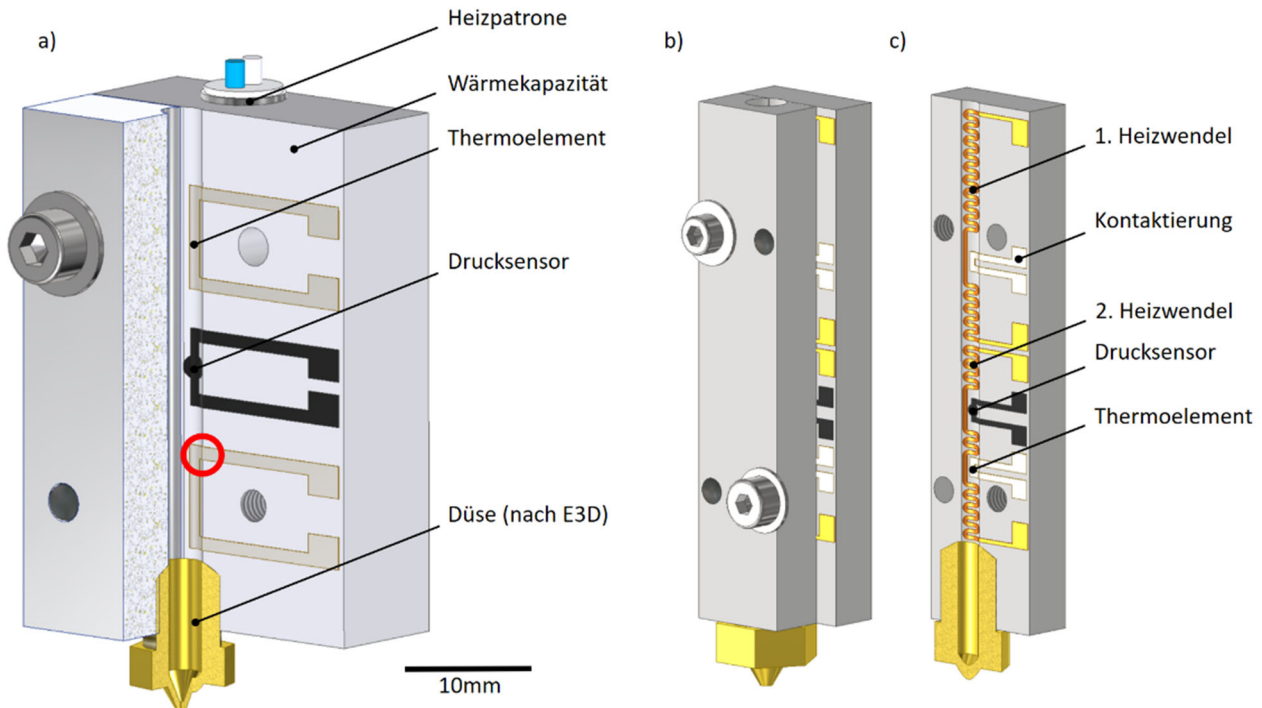


Abbildung 3: Erstkonzeptionierung eines geteilten Hotends aus der Projektbeantragung

Heißkanalaufbau und Dichtungskonzept

Durch die formulierten Anforderungen in Tabelle 1 wird deutlich, dass die zu verwendende Dichtung einerseits bei hohen Temperaturen stabil sein muss, andererseits resistent gegen chemische Einwirkungen durch die Kunststoffschmelze. Auch darf der auftretende Innendruck im Heißkanal nicht zu einer Beschädigung der Dichtung führen. Insbesondere durch die hohen Temperaturen in der Heißkanaldüse, wird die Verwendung einer Weichmetall-Dichtung (Kupfer oder Aluminium) angestrebt. Übliche polymere Dichtungsmaterialien wie NBR, Papier, PTFE oder Silikon, sind nicht in der Lage über eine längere Zeit die auftretenden Belastungen auszuhalten. Auch andere, bei thermischer Belastung beständigere Dichtungsmaterialien wie eine Graphitschnur, Glimmer oder Flüssigdichtmittel wurden aufgrund geringer Beständigkeit oder einer nicht-schädigungsfreien Demontagemöglichkeit zunächst ausgeschlossen. Als vielversprechendste Lösung zeigte sich zu Projektbeginn der Einsatz von Weichmetalldichtungen aus Aluminium oder Kupfer. Bei der Verwendung dieser Materialien ist allerdings die Korrosion der Dichtungen und eine eventuelle Abgabe von Cu-Ionen in den im Prozess aufgeschmolzenen Kunststoff zu berücksichtigen.

In einer ersten Iteration des Hotends wurde der Schmelzkanal analog dem Konzept aus dem Projektantrag entlang seiner Achse geteilt. Entlang dieser Achse wurden parallel zum Schmelzkanal verlaufende Kupferdichtschnüre in passend dafür ausgelegte Nuten eingelegt. Die Ansicht einer entsprechend konzipierten Hotendhälfte mit eingelegter Kupferdichtschnur nach erfolgter Montage und erneuter Demontage ist in der Abbildung 4 zu sehen.

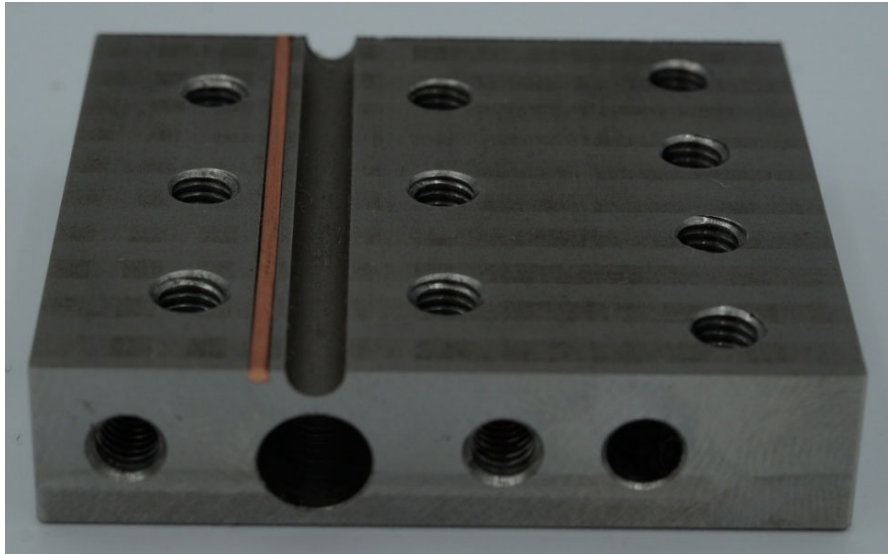


Abbildung 4: Entlang des Schmelzekanals geteiltes Hotend mit in Nut eingelegter Kupfer-Dichtschnur nach erfolgter Demontage

Durch den Wunsch, zukaufbare Standardprodukte für die Düse und Heatbreak der Firma E3D zu verwenden, muss an beiden Enden des Heißkanals ein Anschraubpunkt für die genannten Bauteile vorgesehen werden. Da eine Schraubverbindung nur geringe Toleranzen hinsichtlich axialem und radialem Versatz zwischen beiden Partnern erlaubt, ist eine Ausrichtung von in diesem Fall drei Partnern, Düse bzw. Heatbreak und den zwei Heißkanal-Hälften, zueinander mit keinem sinnvollem Fertigungsaufwand erzielbar. Eine Verklemmung der Anbauteile zwischen den beiden Hälften bei gleichzeitiger Abdichtung der Verbindungsstelle ist in der Handhabung ebenfalls nicht oder nur schwer möglich. Eine Lösung für dieses Problem stellt die Nutzung von zusätzlichen Flanschen auf beiden Seiten des Heißkanals dar. Diese Flansche können durch Verschraubungspunkte, die jeweils nur in einer der beiden Hälften liegen, mit einer ausreichenden Anpresskraft an die Hotendhälften gebracht werden. Positioniertoleranzen der Hälften zueinander können durch Durchgangsbohrungen im Flansch ausgeglichen werden. In diesen Flansch kann, fluchtend zum Heißkanal, über ein passendes Gewinde die Düse oder die Heatbreak befestigt werden. Die Abdichtung zwischen Flansch und Heißkanal wird durch einen konzentrisch zum Schmelzekanal eingebrachten metallischen Dichtring realisiert. Das entsprechende Verbindungs- und Dichtungskonzept für diese erste Hotend-Iteration ist in einem Dreiviertelschnitt in der folgenden Abbildung 5 sichtbar.

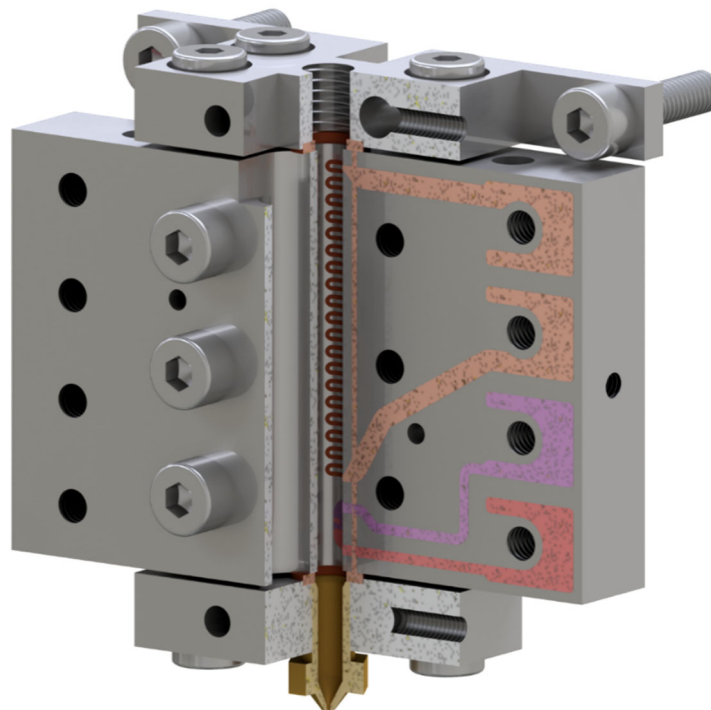


Abbildung 5: Erstes Hotendkonzept mit Dichtschnüren entlang des Schmelzkanals und Dichtringen unter den Flanschen

Versuche zur Untersuchung der Dichtigkeit der ersten Iteration und des entwickelten Dichtungskonzepts wurden erfolgreich durchgeführt und sind in AP 5 näher beschrieben.

Im Projektverlauf zeigte sich, dass die Beschichtung eines Halbzylinders bzw. einer Halbschale, wie es im vorliegenden Konzept notwendig ist (siehe erste Hotend-Variante in Abbildungen 4 und 5), nicht zufriedenstellend möglich ist (vgl. hierzu AP 3) und auch die Schichthaftung im Übergangsbereich zwischen der Halbschale und dem flachen Bereich der Hotend-Hälfte unzufriedenstellend ist. Aus diesem Grund wurde in einer zweiten Iteration ein abgewandeltes Konzept erarbeitet, bei dem keine konturierte Oberfläche von zu beschichtenden Teilen vorliegt. In dieser zweiten Iteration ist nun noch ein flaches Substratbauteil zu beschichten, wie es auch in den anderen grundlegenden, erfolgreich durchgeführten Beschichtungsversuchen vorlag (vgl. AP 3). Um weiterhin einen Schmelzkanal zur Förderung von Kunststoff zu bilden, werden zwischen den Hotend-Hälften so bezeichnete Dichtleisten eingesetzt, die gemeinsam mit den beiden Heißkanal-Hälften den nun rechteckigen Schmelzkanal bilden. Das bereits vorhandene Dichtungskonzept kann hierfür übernommen werden. Durch die neuen, sich ergebenden Spalte zwischen den Bauteilen, sind nun allerdings vier Bereiche abzudichten. Dies wurde zunächst mit vier Dichtschnüren umgesetzt, die in Nuten in den Dichtleisten eingesetzt werden. Später wurden auch an den Außenkanten der Dichtleisten vier weitere Dichtungen eingesetzt, um ein Verkippen der Dichtleisten bei der Montage zu vermeiden. Auch mit diesem adaptierten Dichtkonzept wurden analog zur vorherigen Hotend-Iteration Dichtigkeitsuntersuchungen durchgeführt, die in AP 5 beschrieben sind. Grundsätzlich zeigte sich auch diese entwickelte Iteration als Öl-dicht, sodass auch von einer Dichtigkeit bei Kunststoffschmelzen ausgegangen wird. Das gesamte angepasste Hotend in der Iteration 2 mit zwei Dichtleisten und vier Dichtschnüren ist in der Abbildung 6 zu sehen.

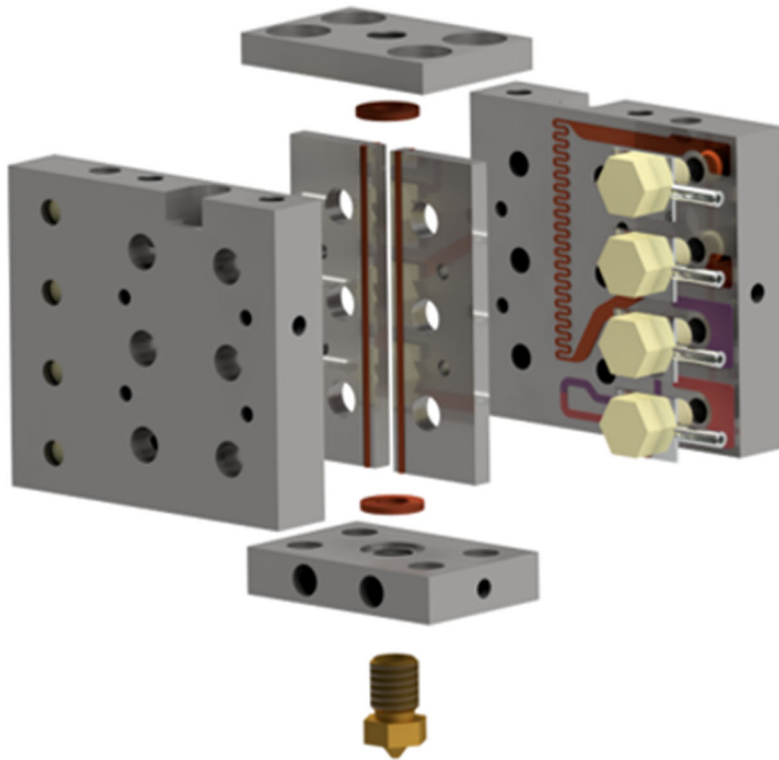


Abbildung 6: Iteration 2 des Hotends mit 4 Dichtschnüren in den Dichtleisten in einer Explosionsansicht

Da sich im weiteren Projektverlauf unterschiedliche Herausforderungen in der Haltbarkeit des entwickelten Schichtaufbaus und auch bei der Kontaktierung (vgl. AP 4) zeigten, wurde eine dritte Hotend-Iteration konzipiert, die die weiteren aufgetretenen Herausforderungen adressiert. Hauptgrund für die Entscheidung zu einem gänzlichen neuen Konzept war, dass eine Beschichtung von Keramikbauteilen statt metallischer Substrate weiterverfolgt werden sollte. Da ein von den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses formuliertes Ziel des Projektes die möglichst günstige Umsetzung des Hotends ist, sollte zunächst auf die Übertragung des vorhandenen Konzepts mit gleichen Hotend-Hälften aus Keramik verzichtet werden. Eine Preisrecherche bei Herstellern ergab geschätzte Kosten von etwa 800 € für die Rohfertigung von zwei Hotend-Hälften. Es wurde daher ein Konzept erarbeitet, das ein kleineres, deutlich günstigeres, beschichtbares Keramikteil einsetzt, ohne an Funktionalität einzubüßen. Bei diesem dritten Konzept wird ein zu beschichtendes Keramik-T-Stück in einen geteilten Hotend-Körper eingesetzt (vgl. Abbildung 7). Neben der Kostenersparnis (T-Stück ca. 60 €, Hotend-Komponenten in-house fertigbar) ergibt sich bei dieser Konzeptionierung zusätzlich der Vorteil, dass mit dem mittig in der Schmelze liegenden T-Stück eine Messung der Schmelztemperatur im Kern der Schmelze (dem kältesten Teil) [9] möglich ist. Auch kann durch ein mittig in der Schmelze hineinragendes Heizelement eine bessere und homogenere Erwärmung des Kunststoffes erfolgen, ähnlich dem Konzept von E3D's CHT-Technologie. Die Abdichtung bei dieser Variante kann nicht mehr wie in den vorherigen Iterationen umgesetzt werden. Hier wird nun hochtemperaturbeständiges Dichtpapier (laut Hersteller hitzebeständig bis 250 °C) zwischen die beiden Hotend-Komponenten und das T-Stück eingelegt. Durch die diagonale Verschraubung werden die Komponenten gleichmäßig in beiden Trennebenen aneinandergepresst, um so die Dichtigkeit herbeizuführen. Die Düse kann, da im unteren Teil keine Teilung vorliegt, einfach in die größere Hotend-Komponente eingeschraubt werden, die Anbringung der Heatbreak erfolgt wie bisher über eine Flanschverbindung.

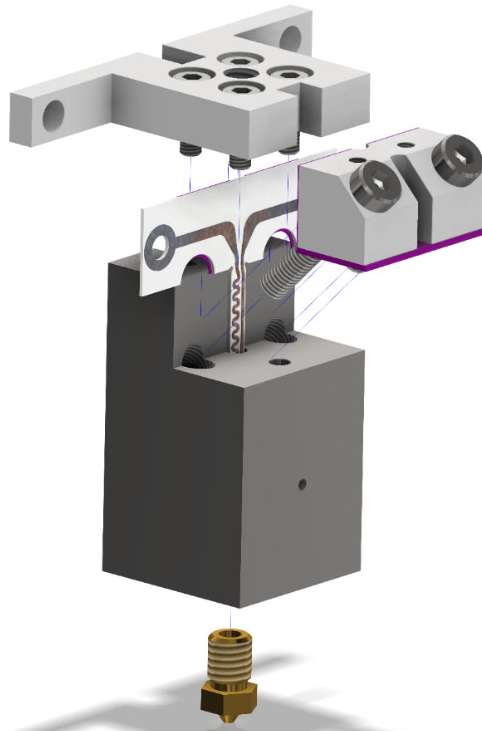


Abbildung 7: Drittes Heißkanal-Design mit eingelegtem keramischen T-Stück

Bei der praktischen Erprobung der dritten Hotend-Iteration zeigte sich, dass das keramische T-Stück für die im Prozess auftretenden Kräfte keine ausreichende Festigkeit aufweist. Mehrere Versuche mit einem montierten Hotend führten im Montageprozess oder bereits nach kurzer Betriebszeit zu einem Bruch des T-Stücks im Übergangsbereich von den Schenkeln zum Steg. Auch war die Dichtigkeit bei dieser dritten Iteration nicht vollständig gegeben, sodass dieses dritte Konzept wieder verworfen wurde. Ein dauerhafter Einsatz des Dichtpapiers bei 250 °C führte zu einer Verkohlung und einer Anhaftung des Papiers am T-Stück. Es zeigte sich, dass diese dritte Variante zur Lösung des Problems schlechter geeignet ist, als die bisherigen Iterationen. Verkohltes, angehaftetes Dichtpapier an einem gebrochenen T-Stück mit Heizwendel ist in der Abbildung 8 zu sehen. Ebenso ist hier ein gebrochenes keramisches T-Stück mit beschichtetem Thermoelement zu sehen.



Abbildung 8: Gebrochenes T-Stück mit angehaftetem Kunststoff (PLA) entlang des Heißkanals und verkohltem Dichtungspapier auf der rechten Schulter (links) und mehrfach gebrochenes T-Stück mit beschichtetem Thermoelement

Da sich das dritte Konzept als nicht praxistauglich erwiesen hat, wurde final das zweite Konzept mit keramischen Hälften, trotz der hohen Kosten hierfür, weiterverfolgt. Hierfür wurden die metallischen Hotend-Hälften der zweiten Iteration konstruktiv angepasst. Gewinde in den Hotend-Hälften wurden durch Durchgangslöcher ersetzt, um einerseits die Kosten in der externen Herstellung deutlich zu senken und auch, da Untersuchungen zur Kontaktierung (vgl. nachfolgender Abschnitt *Kontaktierung*) zeigten, dass keramische Gewinde keinen hohen Anzugsmomente standhalten, wie sie zur Gewährleistung der Dichtigkeit benötigt werden. Das so angepasste Hotend ist in der Abbildung 9 dargestellt.

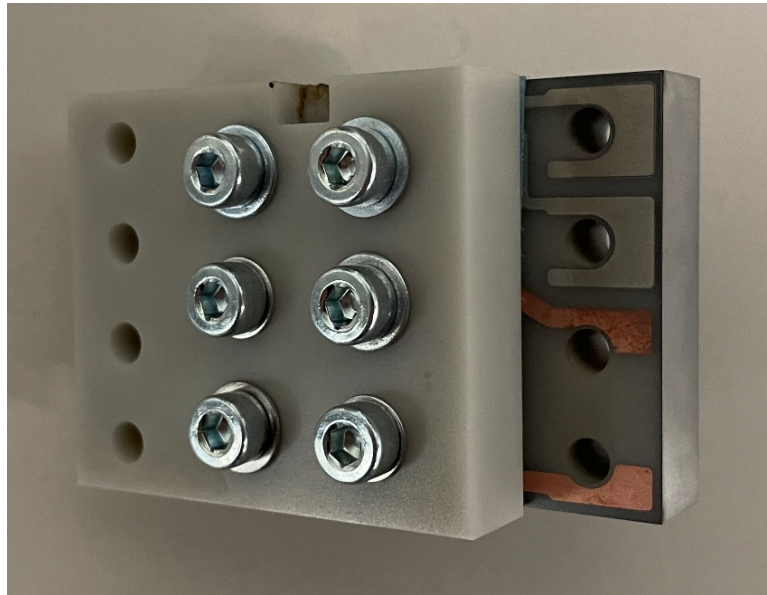


Abbildung 9: Zusammengebaute Iteration 4 des Hotends aus Keramik mit beschichteter Heizwendel und Thermoelement

Mit dem angepassten Hotend aus keramischen Hälften konnte auf die elektrische Isolierschicht zwischen Substrat und Funktionsschichten verzichtet werden. Da Untersuchungen zur Schichthaltbarkeit und auch der Austausch mit KUZ Leipzig zu den Ergebnissen des Projektes Thermo-KonSens (Projektunterlagen durch Auflösung der KUZ Leipzig nicht mehr verfügbar) zu der Erkenntnis führten, dass auch die Verschleißschutzschicht oberhalb der Funktionsschichten zu einer schlechten Haltbarkeit der Schichten führte, sollte auf diese auch gänzlich verzichtet werden. Um eine elektrische Kontaktierung zwischen Funktionsschicht und den Kupferdichtungen dennoch zu vermeiden, wurden zunächst die oben bereits genannten Hochtemperatur-Papierdichtungen eingesetzt. Die Verkohlung der Dichtungen bei einem Einsatz bei 250 °C sollte dabei zunächst unbeachtet bleiben.

Ein mit den Papierdichtungen in Betrieb genommenes Hotend zeigte sich allerdings als nicht dicht, sodass eine Alternativlösung gefunden werden musste. Als verbleibende Option wurde daher eine hochtemperaturbeständige Silikondichtmasse beschafft, die eine Temperaturfestigkeit bis 305 °C verspricht und dauerelastisch aushärtet. Einsatz findet diese Dichtmasse oftmals im Ofenbau. Nachteilig ist hierbei die erschwerte und ggf. nicht schädigungsfrei durchführbare Demontage des Hotends, wie auch die ebenfalls nur eingeschränkte Temperaturfestigkeit im Vergleich zur Anforderungsliste. Aus Mangel an verbleibenden Alternativmöglichkeiten sollten diese Nachteile in Kauf genommen werden.

Kontaktierung

Neben der grundsätzlichen Entwicklung eines in einem PVD-Prozess beschichtbaren und zusätzlich dichten Schmelzekanalkonzepts, lag eine weitere konstruktive sowie gestalterische Herausforderung dieses Projekts in der Kontaktierung der Funktionsschichten. Zur Kontaktierung der abgeschiedenen Funktionsschichten auf den eingesetzten Edelstahlsubstraten wurden verschiedene Möglichkeiten erprobt. Alle Varianten zeigten jedoch unterschiedliche Hemmnisse, sodass keine der genannten Varianten eine in der Praxis vollumfänglich sinnvoll einsetzbare Lösung darstellt.

Verschrauben

Eine einfache Verschraubung von marktüblichen Kabelschuhen oder vergleichbaren, marktüblichen Kontakten auf dem beschichteten Edelstahl-Substratkörper ist nicht umsetzbar. Durch die Verschraubung und den dabei entstehenden elektrischen Kontakt zwischen der Funktionsschicht über den Kabelschuh und die Schraube mit dem Hotend-Körper werden die Dünnschichtsysteme unbrauchbar. Eine Abhilfe kann hier die Nutzung von nicht leitfähigen Schrauben schaffen. Dabei sind Kunststoffschrauben für den vorliegenden Anwendungsfall nicht einsetzbar, da ihre Einsatztemperatur weit unter der angestrebten Temperatur des Hotends liegt. Andere nicht leitfähige aber temperaturbeständigen Schrauben sind solche aus Keramik (Abbildung 10).



Abbildung 10: Verschraubung von Kontakten auf einem Edelstahl-Hotend mit Keramikschrauben

Keramikschrauben sind allerdings in ihrer Anschaffung teuer und gehen damit konträr zum Ziel eines möglichst günstigen Produkts. Zusätzlich können die Keramikschrauben auch nur mit einem geringen Anzugsmoment festgezogen werden. Hierbei sitzt der Kabelschuh noch nicht fest auf dem Hotend auf. Dabei können Relativbewegungen zwischen Kabelschuh und Funktionsschicht entstehen, die zweite beschädigen. Wird zusätzlich die Isolationsschicht zwischen Funktionsschicht und Substrat angekratzt, entsteht hierbei wieder eine leitfähige Verbindung zum Substrat, die zum Defekt des Schichtsystems führt. Wird die Keramikschraube wiederum zu fest angezogen, bricht diese schnell.

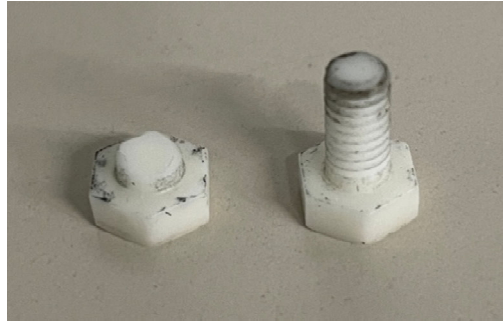


Abbildung 11: Gebrochene Keramikschaube neben einer intakten Schraube

Löten

Lötverbindungen sind etablierte Möglichkeiten zur dauerhaften Verbindung von Leitungen an Kontaktpunkten. Eingesetzt werden sie auch in diversen Anwendungen mit Dünnschichtsensoren etwa von Konopka et al. und Cheng et al. [3, 6]. Problematisch ist im vorliegenden Anwendungsfall die nur geringe Temperaturfestigkeit von weich gelöteten Kontaktstellen. Bei Einsatztemperaturen ab etwa 200 °C, wie sie im vorliegenden Fall erreicht werden sollen, erweichen und lösen sich die gelöteten Kontakte, sodass ein Einsatz von Weichlot keine geeignete Lösung darstellt.



Abbildung 12: Lötstelle auf einem Edelstahlrundsubstrat, deutlich wird, dass durch den Lötversuch die Funktionsschicht angegriffen wird und das Kabel nicht auf der Kontaktfläche haftet

Eine höhere Einsatztemperatur erlauben dahingegen hartgelötete Verbindungen. Hier sind Einsatztemperaturen von über 400°C möglich, ohne dass die Kontaktstellen erweichen. Als schwierig zeigte sich aber die Erzeugung einer haltbaren Hartlötverbindung auf den Dünnschichten. Die Nutzung eines Gasbrenners zur Erzeugung einer hart gelöteten Kontaktstelle führte wiederholt zu einer Zerstörung des Dünnschichtsystems. Grund hierfür ist augenscheinlich die lokal zu starke Wärmeeinbringung in das dünne und empfindliche Schichtsystem. Auch griffen verschiedene, beim Löten verwendete Flussmittel die Kontaktstelle chemisch an (siehe Abbildung 12) was zur Korrosion und einem Ablösen der Dünnschichten führte.

Zur Reduzierung des hohen Temperaturgradienten zwischen Lötstelle und dem restlichen Bauteil wurde alternativ die Herstellung einer Hartlötverbindung durch ein gleichmäßiges, langsames Erwärmen des Substrats in einem Brennofen untersucht (siehe Abbildung 13). Die hierbei hergestellten Lötverbindungen zeigten sich als sehr spröde und brachen bei kleinsten Bewegungen des Kabels. Beim Ablösen bzw. Abbrechen

der Lötstelle wurde zudem das Dünnschichtsystem beschädigt. Lötverbindungen sind auf Grund der experimentell gewonnenen Ergebnisse für die Kontaktierung von PVD-beschichteten Sensoren im vorliegenden Anwendungsfall nicht einsetzbar und daher als Lösungsoption auszuschließen.



Abbildung 13: In einem Ofen hergestellte, spröde Hartlötverbindung zwischen einem Kabel und einem beschichteten Rundsubstrat.

Schweißen

Ähnlich dem Hartlöten zeigte sich auch ein (Mikro-)Schweißen von Kabelverbindungen auf dem Schichtsystem als nicht umsetzbar. Der Schweißprozess zerstört die dünnen Funktionsschichten und auch die darunterliegende Isolierschicht aus Aluminiumoxid (siehe Abbildung 14). Dadurch findet ein Verschweißen des Kabels mit dem Substratmaterial statt mit der Funktionsschicht statt. Die hergestellte Kontaktierung ist dadurch unbrauchbar. Ein Verschweißen von Kabelverbindungen auf den Dünnschichten ist als Lösung ebenfalls auszuschließen.

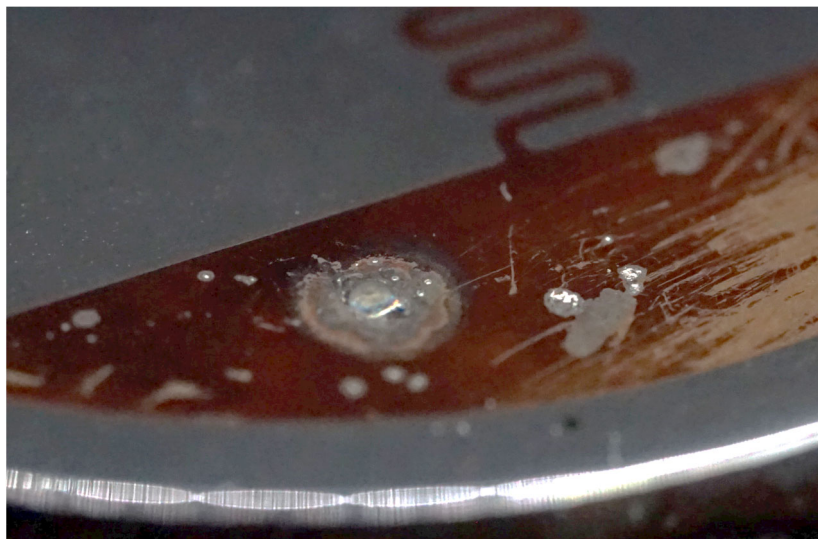


Abbildung 14: Kontaktstellen zum Mikroschweißen auf einem Rundsubstrat, deutlich wird hier die Schädigung an mehreren Stellen der Dünnschicht, insbesondere an der großen kraterförmigen Kontaktstelle in der Mitte

Bonding

Ebenfalls erprobt wurde das sogenannte Drahtbonden. Dieses oft in der Mikroelektronik verwendete Kontaktierverfahren [4, 8] verbindet dünnste Drähte (wenige μm im Durchmesser) mit empfindlichen elektronischen Bauteilen, z.B. Leiterplatten oder Microchips. Hierzu wird der Bondingdraht auf die zu kontaktierende Fläche gedrückt und durch kurzzeitig eingebrachte Ultraschallschwingungen mit dem Substrat verschweißt. Die bei solchen dünnen Drähten übertragbaren Ströme liegen allerdings nur im Milli-Ampere-Bereich, sodass eine ausreichende Bestromung der Heizwendel nicht möglich ist. Eine Kontaktierung mittels Dickdrahtbonden, wobei ein wesentlich dickerer Draht Anwendung findet, konnte im Rahmen des Projekts nicht erprobt werden, da die Einsatzfähigkeit eines an der TU Dortmund vorhandenen Dickdraht-Bonding-Geräts nicht gegeben war. Auch für die Kontaktierung der Thermoelemente ist das Drahtbonden mit den vorhandenen Gegebenheiten nicht sinnvoll. Ohne eine Kaltstellenkompensation ist die Kontaktierung von Thermoelementen und das Auslesen der Daten mit den verwendeten Gold-Kabeln nicht möglich. Dass eine Kontaktierung der PVD-Dünnschichten mittels Drahtbonden grundsätzlich möglich ist, konnte im Rahmen des Projektes allerdings nachgewiesen werden. Deutlich wird dies exemplarisch in der nachstehenden Abbildung 15.



Abbildung 15: Hergestellte Bonding-Verbindung mit Gold-Drähten auf einer PVD-Kupferschicht

Kleben

Das Kleben von Kabelleitungen zur Kontaktierung von Dünnschichtsensoren wurde beispielsweise von Bartz et al. erfolgreich eingesetzt [1]. Die bei der Untersuchung von Wälzlageringern auftretenden Temperaturen sind allerdings deutlich geringer als die angestrebte Einsatztemperatur im vorliegenden Projekt, weshalb ein hochtemperaturfester Klebstoff eingesetzt werden muss. Zur Erprobung einer Klebverbindung wurde daher der hochtemperaturfeste Keramikkleber (Omegabond® - CC High Temp) erprobt. Dieser sollte beim Auflegen eines Kabelkontakts auf der beschichteten Fläche als Vergussmasse genutzt werden, die für eine feste Verbindung zwischen beiden Bauteilen sorgt. Mehrere Kontaktierversuche mit der keramischen Vergussmasse führten jedoch zu keiner leitfähigen Verbindung, was darauf schließen lässt, dass die Vergussmasse beim

Aushärten zwischen den Kontakt und die PVD-Schicht fließt und dort eine isolierende Schicht zwischen beiden Komponenten bildet oder den zu verbindenden Kontakt minimal von der Dünnschicht abhebt. Zusätzlich ist die hierbei hergestellte Verbindung nicht schädigungsfrei lösbar. Ein Verkleben der Kontakte mit einem für hohe Anwendungstemperaturen geeigneten Kleber ist daher ebenfalls keine Option für die zu entwickelnde Heißkanaldüse. Ein Kontaktversuch mit der keramischen Vergussmasse auf einem Keramiksubstrat mit beschichteter NiCr-Wendel ist in der Abbildung 16 zu sehen.

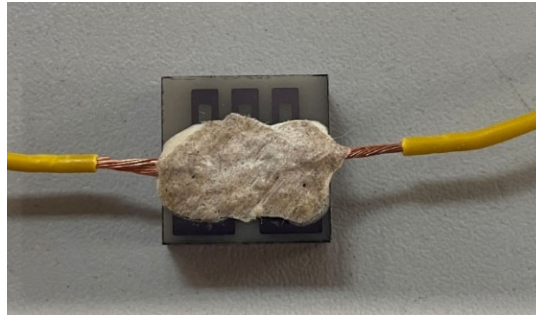


Abbildung 16: Mit keramischer Vergussmasse hergestellte, feste, nicht-leitfähige Verbindung von Kabeln auf einem PVD-beschichteten Bauteil

Klemmen

Analog zu den Kontaktierungsansätzen des Kunststoffzentrums Leipzig aus dem Projekt Thermo-KonSens (Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages Reg.-Nr.: MF150033) ist die Klemmung von Kontakten auf dem Dünnschichtsystem eine weitere Lösungsansatz. In dem genannten Projekt, das sich mit der Temperierung von Werkzeugwänden beschäftigt hat, wurden zur Kontaktierung Kunststoffklemmen mit dem Werkzeug verschraubt, mit denen Kupferstäbchen auf die Kontaktflächen gedrückt wurden. [7] Da die Einsatztemperatur im vorliegenden Projekt InlineSense deutlich über denen des Werkzeugs aus dem Projekt Thermo-KonSens liegen, ist eine Verwendung der gleichen Kunststoffklemmen nicht möglich. Alternativ bietet sich als temperaturbeständiges und nicht leitfähiges Material eine Keramik an. Um die hohen Kosten für extern gefertigte, angepasste Keramik-Klemmen zu vermeiden, wurden vergleichbare Klemmen aus Ton in-house gebrannt. Diese Klemmen können nur mit groben Toleranzen gefertigt werden und sind etwas spröder als Keramikkomponenten von anderen Anbietern. Mit Ihnen kann das Dünnschichtsystem allerdings zuverlässig kontaktiert werden (vgl. Abbildung 17).

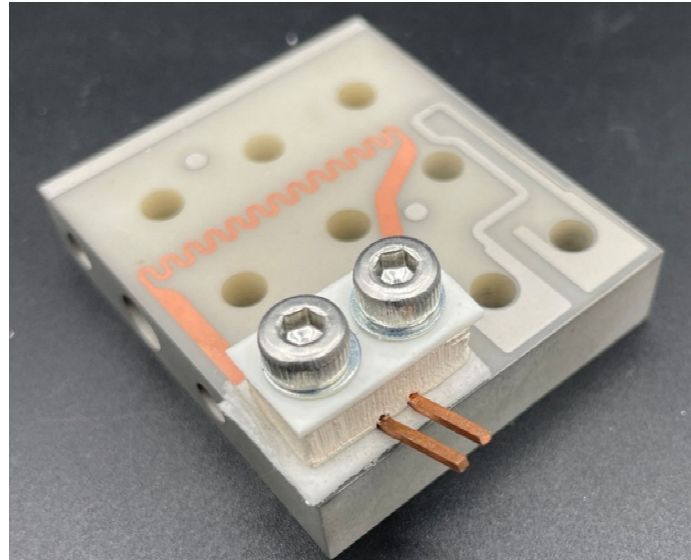


Abbildung 17: Kontaktierung eines beschichteten Hotends mit Ton-Klemme und Kupferkontakten.

Dennoch sind auch mit diesen Klemmen kleinste Relativbewegungen zwischen dem Kupferkontakt und der Dünnschicht möglich, sodass bei der Handhabung äußerst vorsichtig vorgegangen werden muss. Die Lösung mit den Ton-Klemmen ist daher als Behelfslösung geeignet, für einen dauerhaften Einsatz oder häufiges Montieren und Demontieren allerdings aufgrund des vorhandenen Fehlerpotentials nicht empfehlenswert.

Da sich alle bisher erprobten Kontaktierungsmöglichkeiten als nicht oder nur mit Einschränkungen umsetzbar herausgestellt haben, ist die bereits angesprochene Nutzung von einem elektrisch nicht-leitfähigen Substratmaterial für die Hotend-Variante 4 in höchstem Maße interessant. Mit einem solchen Substratmaterial kann eine feste Verschraubung von Kontakten ermöglicht werden. Auch ist eine minimale Schädigung der Funktionsschichten unter dem Kabelschuh weniger problematisch, da keine Schädigung der Isolationsschicht zwischen Funktionsschicht und Substrat und somit kein Durchkontaktieren möglich ist. Neben der Haltbarkeit des Schichtsystems ist daher die Kontaktierung der Dünnschichtsensoren und -aktoren ein weiterer Aspekt, der die Entscheidung für ein Keramiksubstrat bestärkt hat.

Kühlung des Systems

Für einen robusten Prozess ist die Erzeugung eines definierten Übergangs zwischen Heiß- und Kaltteil eines 3D-Druck-Verarbeitungssystems wichtig. Erst durch den definierten Wärmeübergang wird ein sauberes Extrudieren und Retracten des Filaments gewährleistet. Ist die Übergangszone zwischen Heiß- und Kaltteil nicht ausreichend definiert, besteht die Gefahr, dass Kunststoff an der zu kalten Heißkanalwand wieder erstarrt und zu einem Verstopfen, dem sogenannten Clogging, führt oder bereits zu weich wird und nicht mehr vorgeschoben werden kann. Um diesen definierten Wärmeübergang oberhalb des Eintritts in den Heißkanal zu positionieren, ist einerseits eine homogene Temperaturverteilung im Hotend notwendig. Die Temperatur an der Eintrittsstelle des Filaments darf nicht zu gering werden. Andererseits muss die entstehende Wärme abgeführt werden, um zu gewährleisten, dass das Filament in der Fördereinheit noch nicht erweicht. Dieser definierte Wärmeübergang wird durch die Heat-Break erreicht. Dieses Bauteil, zumeist aus dünnwandigem Titan oder Edelstahl, soll möglichst wenig der entstehenden Wärme im Hotend weiterleiten und das heiße Hotend von der kalten Kühleinheit trennen.

Die Verwendung einer Standard-3D-Druck-Luftkühlung zeigte sich in Praxisversuchen als nicht anwendbar. Durch die im Vergleich zu anderen 3D-Druck-Hotends deutlich größere thermische Masse des Hotends ist eine leistungsstarke Wärmequelle zum Aufschmelzen des Kunststoffes nötig. Eine Standardkühlung schafft es nicht mehr, die entstehende, aufsteigende Wärme abzuführen, sodass sämtliche Förderversuche mit den Prototypen beim Einsatz einer konventionellen Kühlung mit Lüfter zu einem Aufschmelzen von Kunststoff in der Heatbreak und so zu einem Verstopfen des Extrusionssystems führten.

Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde eine einfache Wasserkühlung für das Hot-End konzipiert, die eine deutlich größere Kühlleistung aufweist. Durch die gesteigerte Kühlleistung trat nun erneut ein Verstopfen des Systems ein, nun allerdings durch Materialanhaftung im Heatbreak-Flansch. Um das Erkalten von Material in diesem zu vermeiden, wurde in den Flansch, analog zum Flansch der Düse, in diesen eine Heizpatrone eingesetzt, um hier zusätzlich Wärme einzubringen und den Übergangspunkt von warm zu kalt aus dem Flanschbereich herauszuheben. Mit dieser neuen Kühlung konnte mit den Hot-End-Prototypen erfolgreich Material ohne ein Verstopfen des Systems gefördert werden.

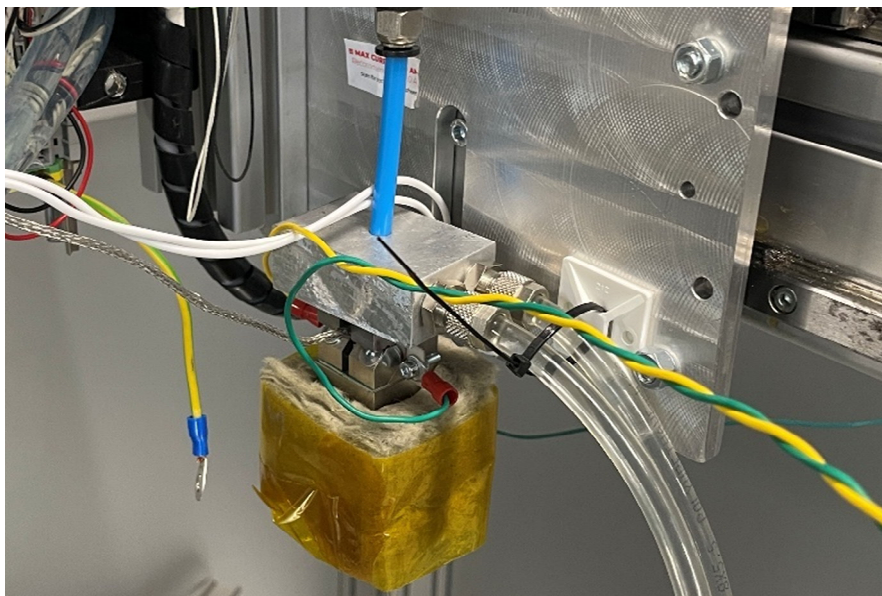


Abbildung 18: Wasserkühlblock oberhalb des Hotends der 3. Iteration

Das entwickelte Hotend wurde im Rahmen des Projekts auf einer bestehenden 3D-Druck-Anlage erprobt, die eigens für diesen Zweck umgebaut wurde. Hier konnte der Druckkopf über eine Portal-Kinematik in der x- und y-Richtung verfahren werden und das Druckbett in z-Richtung. Der Versuchsstand wurde über eine Twin-CAT-Steuerung mit Steuerkarten der Firma Beckhoff Automation betrieben. Hierdurch konnten unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich Sensorik und Aktorik eingesetzt und unterschiedliche Temperatur-Regelkreise gesteuert werden. Die Karten der Firma Beckhoff erlaubten dabei eine gezielte Ansteuerung der beschichteten Heizwendel sowie ein Auslesen der Daten von Thermoelement und ggf. einer Drucksensorik in Echtzeit.

1.2 Arbeitspaket 2: Auswahl der Beschichtungswerkstoffe

Für die ersten Maskierungs- und grundlegenden Schichtuntersuchungen wird hauptsächlich 1.4404 verwendet. Der Einfachheit halber finden diese Untersuchungen zudem auf Rundsubstraten statt. Grund hierfür ist die schnelle Verfügbarkeit sowie Handhabbarkeit dieser Probengeometrie. Die Standard-Rundsubstrate haben einen Durchmesser von $\varnothing 40$ mm und $\varnothing 20$ mm sowie eine Dicke von 5 mm. In einem ersten Versuch wurden die Substratmaterialien mit einem kompletten Multilagenaufbau (siehe Abbildung 19) beschichtet, um in erster Linie ihre Beschichtbarkeit sowie Haftung zu testen.

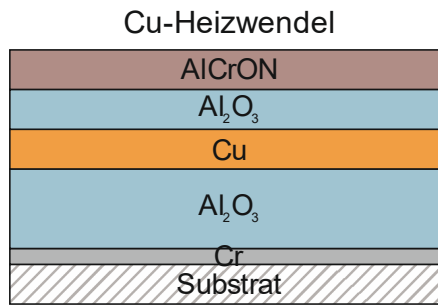


Abbildung 19: Schichtaufbau der Cu-Heizwendel

In Abbildung 20 sind die verschiedenen $\varnothing 20$ mm Substrate mit dem beschichteten Multilagenaufbau abgebildet. Bereits augenscheinlich ist zu erkennen, dass die Beschichtung auf allen Substratvarianten haftet. Lediglich die Al-Legierung AW5083 zeigt deutliche Abplatzungen. Als Ursache wird der relativ hohe Wärmeausdehnungskoeffizient vermutet. Bereits im Beschichtungsprozess ist das Material erhöhten Temperaturen ausgesetzt. Durch die anschließende Abkühlung kann es zu einer großen Differenz in der Ausdehnung zwischen Substrat und Beschichtung kommen und folgend zu Schichtabplatzungen führen. Somit scheidet die Al-Legierung AW 5083 für weitere Untersuchung aus.

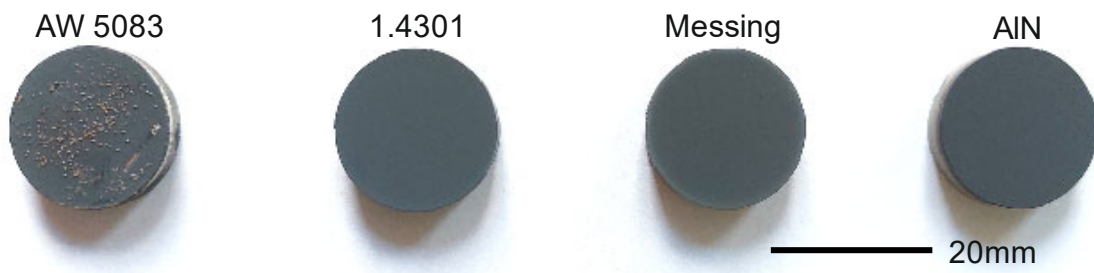


Abbildung 20: Cu-Schichtsystem auf den verschiedenen Substraten

Bei der Auswahl der Beschichtungsmaterialien werden die jeweilige Funktion und die benötigten Eigenschaften der jeweiligen Schicht betrachtet. Vorgesehen ist eine elektrisch-isolierende Schicht, ein Kraftsensor, eine Heizschlange sowie eine chemisch beständige und tribologisch-schützende Deckschicht (siehe Abbildung 21).

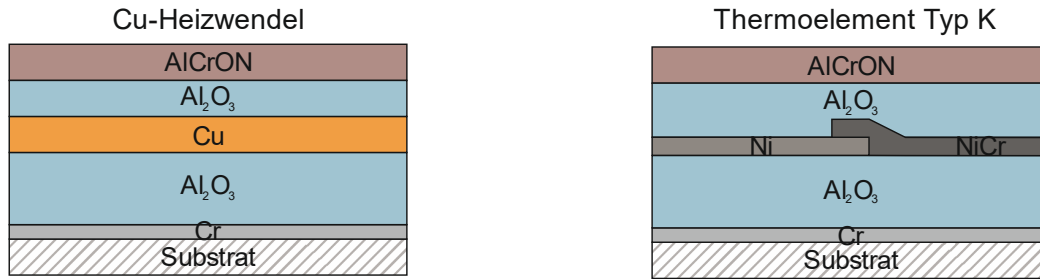


Abbildung 21: Schematischer Aufbau der PVD-Schichten für die Heizwendel (links) und das Thermoelement (rechts)

Die elektrisch-isolierenden Schichten sollen einen Kurzschluss zwischen den Leiterbahnen verhindern. Für die geforderten Eigenschaften eignet sich Aluminiumoxid (Al₂O₃). Für eine verbesserte Haftung wird zunächst eine 200 nm dicke Chrom (Cr) Dünnschicht appliziert. Um eine ausreichende Durchschlagsfestigkeit bei geringer Schichtdicke zu erreichen, wurde die Schichtdicke von Al₂O₃ zwischen 1,0 µm, 2,5 µm und 5,0 µm variiert und getestet. Die Durchschlagfestigkeit wurde mittels eines stufenlos regelbaren Netzteils im DC-Modus ermittelt. Da die Sensorschicht im Niederspannungsbereich von <50 V betrieben wird, muss die Isolierschicht diesem Wert mindestens standhalten. Die Schichtuntersuchung wurde hier auf dem 1.4404 Stahl durchgeführt.

Ein bewährtes Material für Heizelemente ist Kupfer (Cu), welches auch hier für die Abscheidung der Heizwendel verwendet werden soll. Dabei wird zunächst eine Cu-Schicht von 1 µm Dicke abgeschieden und geprüft.

Bei den Thermoelementen wurde sich auf Typ K (Nickel - Nickel-Chrom – Ni-NiCr) und den in der Kunststoffindustrie gängigen Typ J (Eisen - Kupfer-Nickel – Fe-CuNi) geeinigt (siehe Tabelle 2). Der Typ K wurde bereits erfolgreich in der vorangegangenen Forschungsarbeit umgesetzt, sodass die Prozessparameter hier übernommen werden können. Bei Typ J muss getestet werden, ob das Abscheiden von Fe möglich ist. Da für die PVD-Schichtabscheidung die Magnetron Kathodenzerstäubung, welche mithilfe von Permanentmagneten agiert, genutzt wird, kann das magnetische Verhalten des Fe-Targets den Prozess beeinflussen. Die Schichten werden zunächst mit einer Stärke von 1 µm auf der ausgewählten Al₂O₃-Schicht auf 1.4404 (Ø40 mm) abgeschieden und auf ihre Haftung überprüft. Anschließend werden die Leiterbahnen mittels Maskierung auf die 15×15 mm² AlN, Messing und 1.4301 beschichtet.

Tabelle 2: Ausgewählte Thermoelementpaarungen

Typ	Materialpaarung	Temperaturbereich [°C]	Fehler [°C]
J	Fe-CuNi	20-700	± 1,7
K	Ni-NiCr	0-1100	± 2,2

Als Deckschicht wird Aluminium-Chrom-Oxinitrid (AlCrON) verwendet, da es sich dabei um eine chemisch inerte Zusammensetzung mit vielversprechenden tribo-mechanischen Eigenschaften handelt. Diese Deckschicht wird über die zweite Isolationsschicht beschichtet und schützt das unterliegende Schichtsystem vor Verschleiß und chemischer Reaktion mit der Kunststoffschmelze.

Die PVD-Schichten wurden anschließend mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) in ihren morphologischen und topographischen Strukturen analysiert sowie hinsichtlich ihrer Hafteigenschaften zum Substrat mit der Rockwell-Eindringprüfung und dem Scratch-Test geprüft und bewertet.

Dünnschicht-Drucksensoren sind in ihrer Realisierung technisch anspruchsvoll. Die Messung mechanischer Belastungen erfordert entweder einen komplexen strukturellen Aufbau oder eine aufwendige elektrische Verschaltung. Da im vorliegenden Projekt zunächst das Ziel verfolgt wird, überhaupt eine messbare Druckänderung zu detektieren, wurde nach alternativen Konzepten gesucht, die sich einfacher umsetzen lassen. In mehreren Studien zeigte sich, dass insbesondere Cr-Schichten neben ihrer Temperaturabhängigkeit auch auf mechanische Belastungen reagieren können [2, 5]. Dieses Verhalten legt nahe, dass bestimmte metallische Dünnschichten zur qualitativen Erfassung von Druckänderungen geeignet sein könnten. Dafür sollen metallische Werkstoffe in Form von Mäanderstrukturen auf das Substrat aufgebracht und deren Widerstandsänderung unter mechanischer Belastung zu untersucht werden. Als Materialien wurden Ni, NiCr, Cr sowie CuNi ausgewählt. Die Strukturierung erfolgt auch hier mittels lithographischem Ätzen. Da Ni- und NiCr-Schichten bereits als Temperatursensorelemente auf den Hotends eingesetzt werden, bietet sich die Möglichkeit, ihre potenzielle Druckempfindlichkeit zusätzlich zu prüfen. Gleichzeitig könnte dies den Fertigungsprozess vereinfachen und ggf. ein zusätzlicher Beschichtungsschritt entfallen. Am Ende hatte sich die NiCr Schicht als vielversprechend erwiesen.

1.3 Arbeitspaket 3: Synthese der Dünnschichten / Sensoren (aus ZB1)

Hinsichtlich der Beschichtungsvorbereitung zeigt sich insbesondere für die zweite Hotend-Variante eine bereits angesprochene Schwierigkeit: Die Problematik einer konturfolgenden Maskierung zur Abscheidung geometrisch bestimmter Sensoren und Aktoren insbesondere im Nutbereich.

Nach der Präparation durch Polieren mit einer $3\mu\text{m}$ -Diamantsuspension verrunden sich die Nutübergänge. Ein erster Versuch, die isolierende Al_2O_3 -Schicht auf die Hotend-Hälften abzuscheiden, resultierte zudem in Abplatzungen in der Nut sowie um die Bohrungen. Es ist anzunehmen, dass durch die Bearbeitung und Präparation die Materialspannungen in diesen Probenbereichen erhöht sind sowie die geometriebedingten Materialstärken eine unterschiedliche Abkühlung begünstigen und durch die verschiedenen Wärmeausdehnungen die Schichthaftung verschlechtert wird.

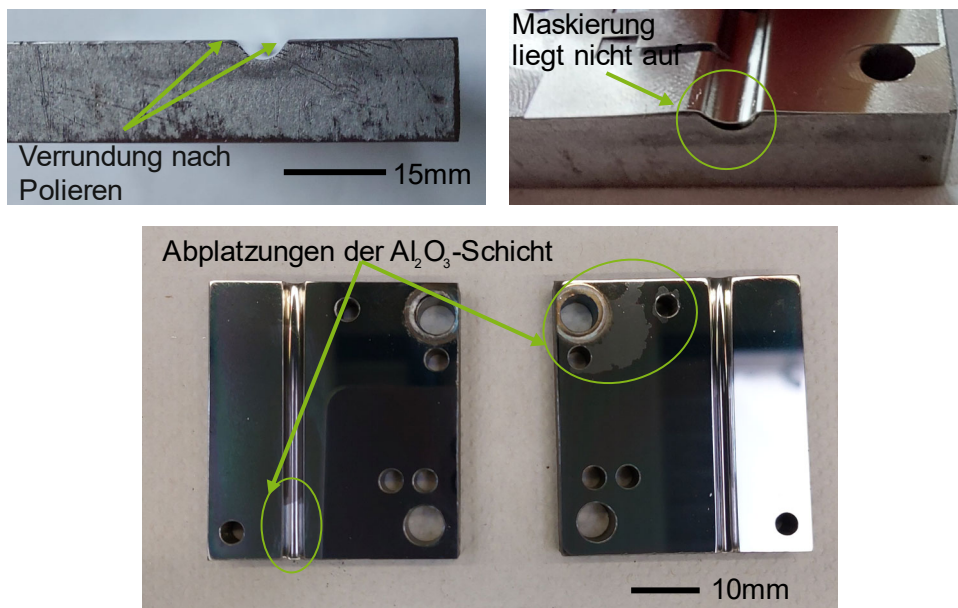


Abbildung 22: Problematiken des HotEnd-Designs mit Nut

Als mögliche Alternative zur Beschichtung im Inneren der Nut bietet sich für einige Beschichtungsmaterialien das Fotolithographie-Verfahren an. Hierbei wird das gesamte Bauteil mittels PVD-Verfahren mit Kupfer beschichtet. Im Anschluss erfolgt das selektive Ätzen dieser Beschichtung. Hierzu wird die Wendelkontur als Negativ auf einer Fotomaske aufgebracht und diese auf das mit Fotolack versehene Bauteil gelegt. Unter der Einwirkung von UV-Licht härtet der nicht von der Fotomaske verdeckte Lack aus. Der nicht entwickelte Lack kann in der Folge abgelöst werden. Die nun ungeschützten Bereiche können weiterbearbeitet werden. Im vorliegenden Fall wird die überflüssige Kupferschicht in einem Ätzbad abgelöst. Zurück bleibt die gewünschte Cu-Wendelkontur.

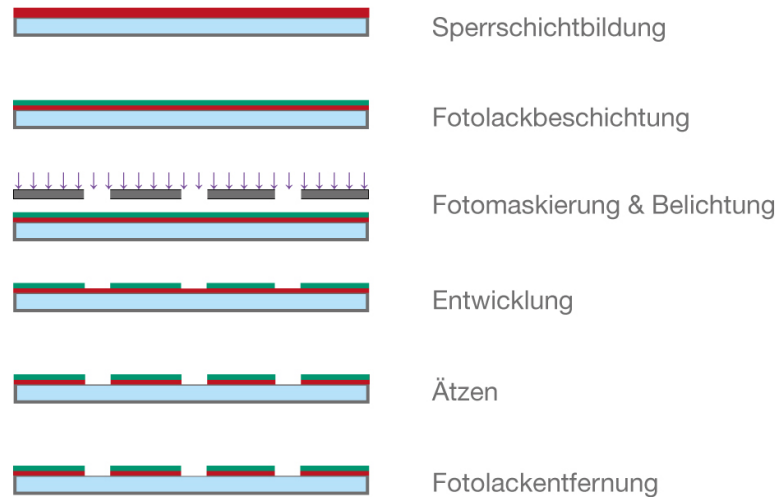


Abbildung 23: Schematischer Ablauf beim Lithographie-Verfahren

Das Beschichten der Thermoelemente in der Halbschale stellt im Gegensatz zur feinen Struktur der Wendel ein geringeres Problem dar. Obwohl auch hier aus genannten Gründen weitere Abschattungseffekte auftreten, reicht es, eine einfache Kontaktstelle der beiden Metalle herzustellen. Der zur Messung von Temperaturen genutzte Seebeck-Effekt tritt auch dann auf und kann genutzt werden.

Für die grundlegenden Untersuchungen wird zunächst 1.4404 als Substratmaterial verwendet, da sich dieser Werkstoff durch gute Beschichtbarkeit und thermische Stabilität auszeichnet. Vor der Abscheidung der Sensorschichten werden die Substrate mit einer 2,5 µm dicken Al₂O₃-Schicht beschichtet. Für die Beschichtung der Thermoelement-Schenkel auf die quadratischen Flachsubstrate (15×15 mm²) werden bestehenden Probenhalter und Maskierungen verwendet. Für die jeweiligen Leiterbahnen wird eine eigene Maske zur Abscheidung genutzt, welche auf dem Probenhalter fixiert wird. Zunächst wird der Fe- bzw. Ni-Schenkel mittels der Maske A synthetisiert und anschließend die Maske gegen den Typ B gewechselt und der CuNi bzw. NiCr-Schenkel abgeschieden (siehe Abbildung 24).

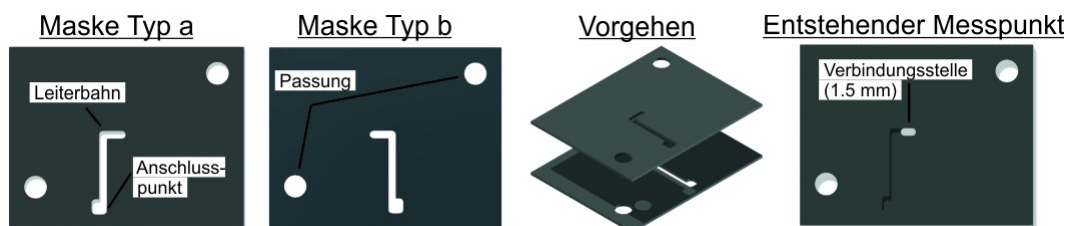


Abbildung 24: Maskierung zur Abscheidung der Thermoelement-Leiterbahnen

Für die Applikation der Wendelgeometrie werden 1.4404 Stahlproben (Ø40 mm) verwendet. Da Abschattungseffekte mit zunehmender Blechdicke der Maskierung verstärkt werden und gleichzeitig eine ausreichende Steifigkeit der Maskierung erreicht werden muss, damit diese plan auf der Probenoberfläche aufliegt, wird diese auf 0,2 mm reduziert. Da weiterhin Abschattungen erwartet werden, werden unterschiedlich feine Wendelgeometrien getestet (siehe Abbildung 25). Um einen kompletten Schichtaufbau, wie er auf dem Hottend abgeschieden werden soll, nachzustellen, wird eine zusätzliche Abschattungs-Maske eingesetzt, um eine Beschichtung der Kontaktierungsflächen durch die Isolier- und Schutzschicht zu verhindern. Die vorab mit Al₂O₃ beschichteten Substrate werden in den Probenhalter eingesetzt, die Maskierung aufgelegt und fixiert.

Die Maskierung wird mithilfe von speziell gefertigten Aufsatzringen, die als eine Art Niederhalter fungieren, geklemmt und damit befestigt.

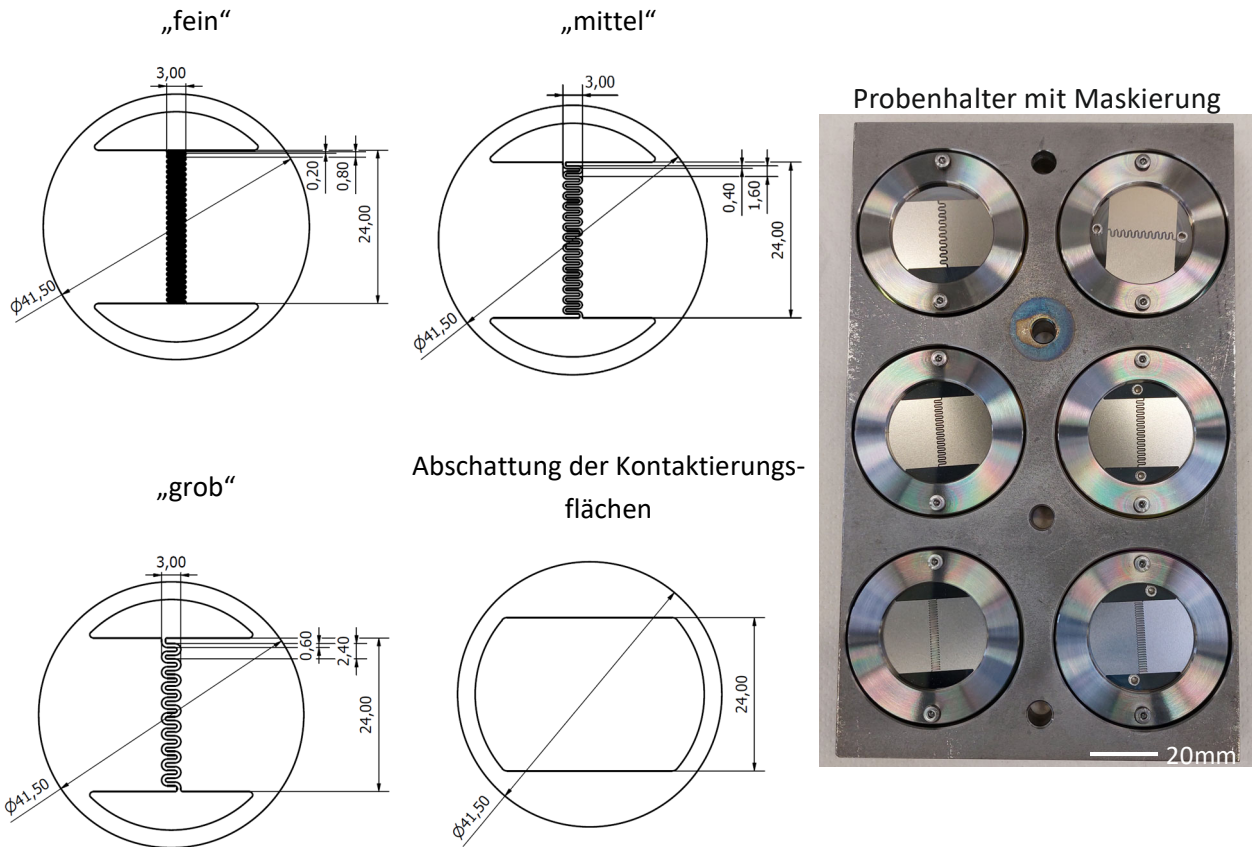


Abbildung 25: Technische Zeichnungen der Wendelmaskierung mit verschiedenen Mäandergeometrien sowie der Abschattungs-maskierung der Kontaktierungsflächen und maskierte Rundsubstrate im Probenhalter

Für die Cu-Heizwendel ist von besonderer Wichtigkeit, dass die Dünnschicht zusammenhängend appliziert wird und die Wendel eine ausreichend scharfe Geometrie aufweist. Für den ersten Versuch wird eine Cu-Wendel mit einer Schichtdicke von 1 μm abgeschieden und anschließend auf ihre Heizleistung getestet.

In Abbildung 26 sind die beschichteten Substratmaterialien mit den Leiterbahnen sowie REM- und Energie-dispersive Röntgenspektroskopie (EDX) Aufnahmen der Überlappungs- bzw. Messstelle des Thermoelements Typ K dargestellt. Mithilfe der Maskierungen gelingt die Überlappung der Leiterbahnen. Allerdings ist die Maskierung des NiCr-Schenkels auf dem AlN-Substrat oder aber das Substrat selbst während des Prozesses wahrscheinlich infolge von Wärmeausdehnung verrutscht und die Leiterbahngeometrie unscharf. Demnach ist das Optimieren der Probenhalter erforderlich.

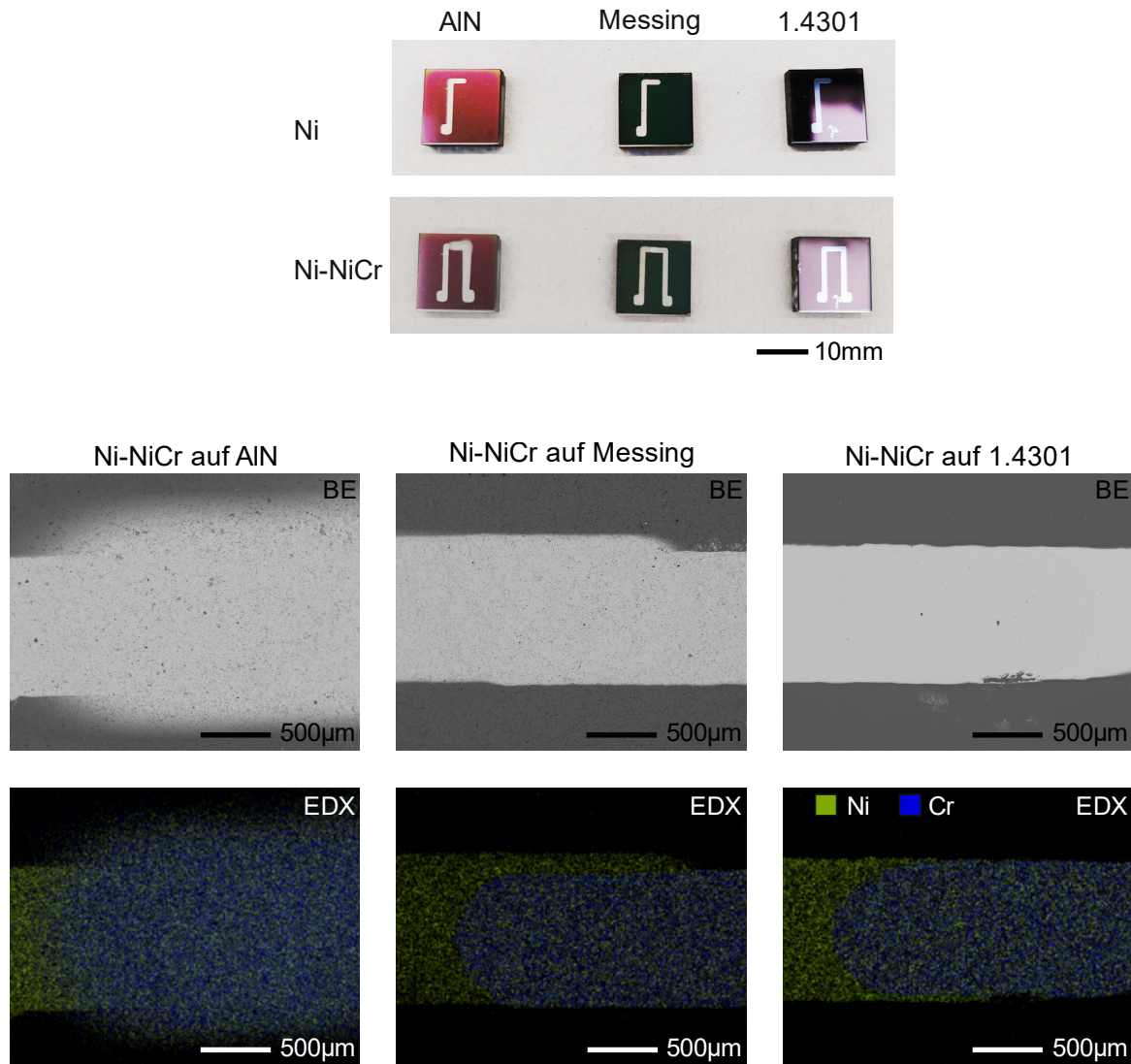


Abbildung 26: Beschichtete Thermoelemente Typ K auf verschiedenen Substraten mit $2,5 \mu\text{m}$ Al_2O_3 -Beschichtung sowie REM- und EDX-Aufnahmen der Messstelle

Die Beschichtung der Cu-Wendel mit dem entwickelten Maskierungssystem hat im Allgemeinen funktioniert. Ähnlich wie bei der Abscheidung der Thermoelement-Leiterbahnen zeigt sich auch hier ein Verrutschen der Maskierung während des Prozesses. Demnach wird auch hier die Probenhalterung angepasst. An den REM- und EDX-Aufnahmen in Abbildung 27 werden die Abschattungseffekte deutlich. Je feiner die Wendelgeometrie, desto unschärfer werden die Konturen. Dies kann damit begründet werden, dass die Maskierung weiterhin nicht plan genug aufliegt sowie diese durch Verschiebung infolge des Wärmeeintrages im Prozess bewegt wird. Dadurch entsteht eine unscharfe Kontur. Dies führt dazu, dass anstatt von der gewünschten Mäanderform eine teilweise zusammenhängende Fläche entsteht, die die gewünschten Heizeigenschaften ändern und beeinträchtigen kann. Dies ist besonders gut bei der feinen Maskierung zu erkennen. Die grobe Wendel hingegen besitzt ausreichend große Abstände zwischen den Bahnen, sodass hier keine Beeinträchtigungen erwartet werden.

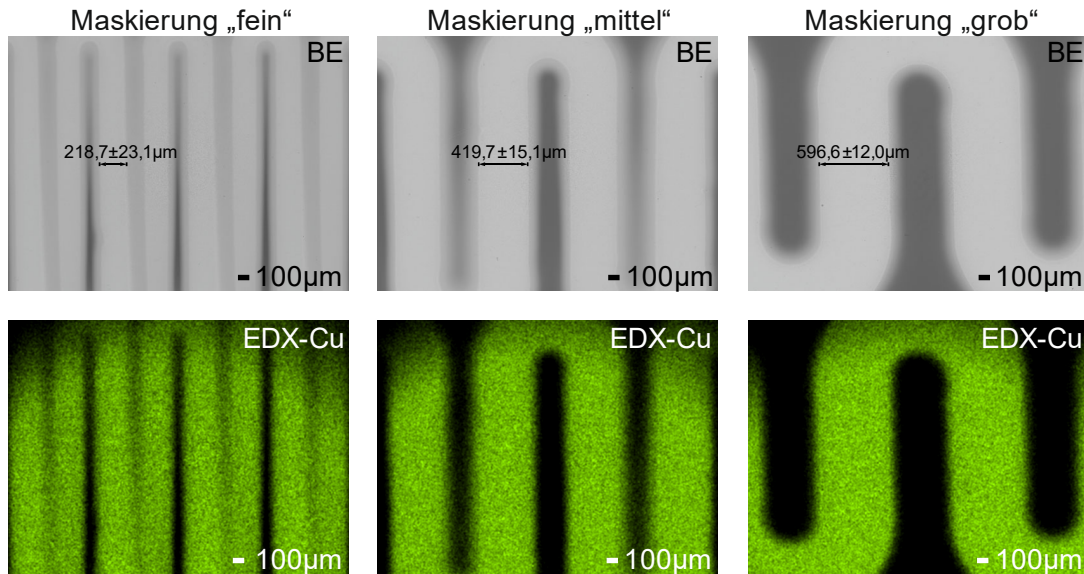


Abbildung 27: REM- und EDX-Aufnahmen der Cu-Wendel auf Al_2O_3 -Isolierschicht auf 1.4404-Substrat ohne AlCrON-Deckschicht

Ein Vergleich mit einer Cu-Wendel, welche mit dem Lithographie-Verfahren hergestellt wurde, zeigt, dass diese definiertere Konturen besitzen (siehe Abbildung 28). Der Vergleich zwischen Maskierung und Lithographie wird deshalb weiterverfolgt.

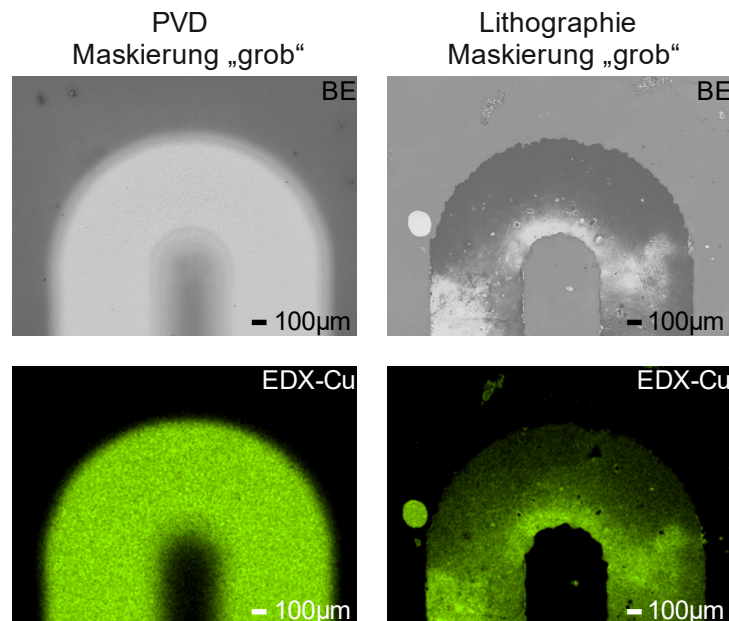
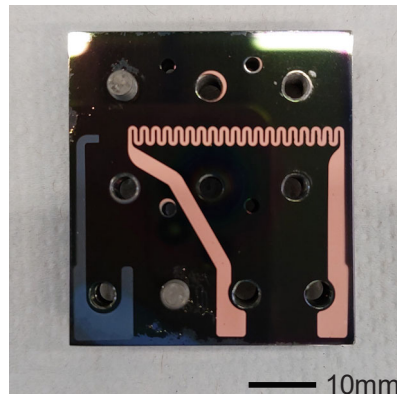


Abbildung 28: REM- und EDX-Aufnahmen der Cu-Wendel „grob“ auf Al_2O_3 -Isolierschicht auf 1.4404-Substrat ohne Al-CrON-Deckschicht hergestellt mittels Maskierung (links) und Lithographie (rechts)

Der Beschichtungsprozess der planaren Hotend-Hälfte ist in Abbildung 29 dargestellt. Im Allgemeinen hat der Maskierungsprozess funktioniert und die Leiterbahnen wurden auf die gewünschten Stellen abgeschieden. Allerdings bedarf es einer weiteren Optimierung der Schichthaftung. Vor allem in den Rand- und Bohrungsbereichen finden sich vermehrt Abplatzungen, die das Substrat freilegen, vermutlich infolge der Wärmeausdehnung im Beschichtungsprozess. Hier wird versucht, dem Problem in der Anpassung mit geeigneten Heizparametern zu begegnen.

Cu-Wendel und Ni-Schenkel
auf Al₂O₃-Isolierschicht



Cu-Wendel und
Ni-NiCr-Thermoelement

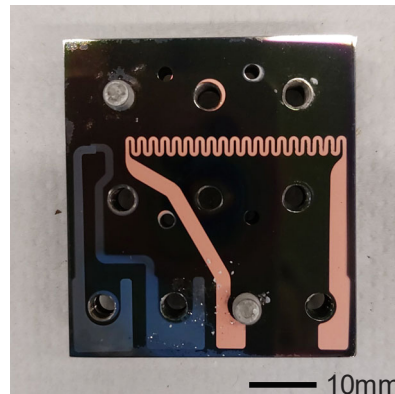


Abbildung 29: Beschichtungsprozess der Sensordünnschichten auf Al₂O₃-Isolierschicht auf einer planaren Hotend-Hälfte

Generell sind die Abplatzungen der ersten Al₂O₃-Isolierschicht ein Hauptproblem im Beschichtungsprozess. Nach Betrachtung der Ergebnisse sind Materialspannungen zwischen Schicht und Substrat, aber auch zwischen den Schichten, die zum einen durch die Substratpräparation sowie zum anderen durch thermische Ausdehnungsdifferenzen entstehen können, als Ursache anzunehmen. Demnach sind weitere Versuche notwendig, um die Schichthaftung weiter anzupassen, damit funktionsfähige Sensorschichten hergestellt werden können.

Neben der Beschichtung der Hotend-Hälften wurde auch der Ansatz der keramischen T-Stücke aus AlN verfolgt. Der Vorteil für den Beschichtungsprozess besteht darin, dass die elektrisch-isolierenden Al₂O₃-Schichten wegfallen. Für die Heizwendel wurde die keramische Oberfläche vollständig mit einer 5 µm dicken Cu-Schicht beschichtet. Anschließend wurde die Heizwendelgeometrie lithographisch herausgearbeitet. Zur Herstellung des Thermoelements wurden für die ersten Versuche Maskierungen aus 0,5 mm dicken Blechen gefertigt (siehe Abbildung 30). Diese Masken ermöglichten die gezielte Abscheidung der Schenkel aus Ni bzw. NiCr mit je einer Schichtdicke von 1 µm. Für den Drucksensor aus NiCr wurde ein AlN Substrat vollständig mit einer 1 µm dicken NiCr-Schicht beschichtet und anschließend geätzt.

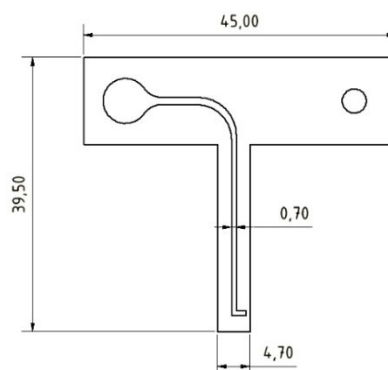


Abbildung 30: Maskierung für die Thermoelement-Schenkel auf dem Keramikeinsatz

In Abbildung 31 sind die erfolgreich beschichteten AlN-Substrate mit den Leiterbahnen sowie REM- und EDX-Aufnahmen der Messstelle des Thermoelements Typ K dargestellt.

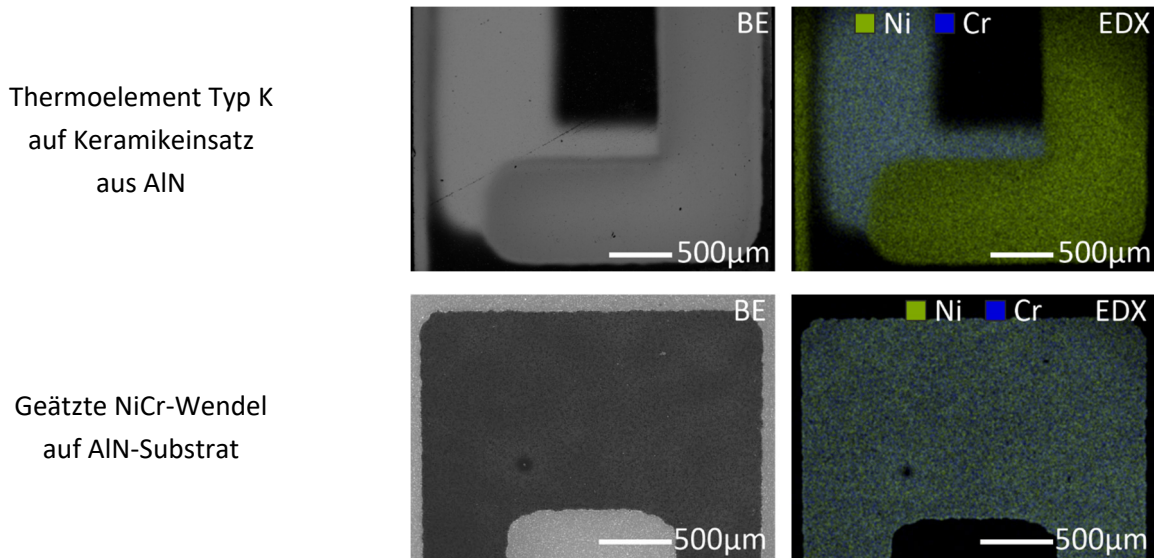


Abbildung 31: REM- und EDX-Aufnahme der Sensordünnschichten auf AlN-Substrat

Das Maskieren von groben Geometrien bietet eine schnelle Möglichkeit, Sensorschichten zu applizieren. Jedoch führen Abschattungseffekte und das Verrutschen oder Verziehen der Maskierung infolge des Temperatureinflusses während des Beschichtungsprozesses zu unscharfen bis überlappenden Geometrierändern, die die Sensorfunktion beeinträchtigen können. Das lithographische Ätzen der Sensoren aus den Dünnschichten wird als potentieller Ansatz weiterverfolgt. Die unterschiedlichen metallischen Beschichtungswerkstoffe werden mit entsprechenden Ätzmitteln bearbeitet. Jedoch wurde dies stets aus separaten Proben durchgeführt. Da sich die Sensorschichten auf einer Hotend-Hälfte befinden, muss geprüft werden, ob und wie die spezifischen Ätzmittel sich gegenüber den anderen metallischen Schichten verhalten und diese ggf. auch angreifen. Dafür wurde ein Rundsubstrat aus AlN auf einer Hälfte mit Cu und auf der anderen Hälfte mit NiCr beschichtet und geätzt. Da sich die Sensorschichten auf einer Hotend-Hälfte befinden und aus unterschiedlichen Materialien bestehen, war es erforderlich zu prüfen, ob und wie die spezifischen Ätzmittel sich gegenüber den anderen metallischen Schichten verhalten und diese ggf. auch angreifen. Zu diesem Zweck wurde ein Rundsubstrat aus AlN auf einer Hälfte mit Cu und auf der anderen Hälfte mit NiCr beschichtet. Die Proben wurden anschließend getrennt mit zwei verschiedenen Ätzmitteln behandelt. Dabei zeigte sich, dass die NiCr-Ätzlösung beide Metalle innerhalb von wenigen Minuten vollständig auflöst, während die Eisen(III)-chlorid-Lösung ausschließlich Cu angreift. Die NiCr-Beschichtung blieb in Eisen(III)-chlorid intakt. Diese Ergebnisse bestätigen die Selektivität des Eisen(III)-chlorid-Ätzmittels für Cu gegenüber NiCr-Schichten und ermöglichen die lithographische Strukturierung der Sensorschichten. In diesem Fall muss erst die NiCr- und anschließend die Cu-Schicht abgeschieden werden.

1.4 Arbeitspaket 4: Kalibrierung und Funktionstest der Sensoren

Heizwendel

Vor der allgemeinen Funktionsprüfung von PVD-beschichteten Heizwendeln wurde in einem ersten Schritt die elektrische Leitfähigkeit und, bei den leitfähigen Edelstahlsubstraten, die Isolierung zwischen Dünnschicht und Substrat durch die Al_2O_3 -Schicht sichergestellt.

Erste Funktionstests mit auf Edelstahl-Rundsubstraten abgeschiedenen Heizwendeln zeigten, dass mit diesen ein gezieltes Aufheizen möglich ist. Je nach Wendelgeometrie (fein, mittel, grob) konnten Leistungen bis etwa 80 W kurzzeitig realisiert werden. Dabei wurden innerhalb von 90 s Temperaturen von über 275 °C (Messgrenze der vorhandenen Wärmebildkamera) erzielt (siehe Abbildung 32).

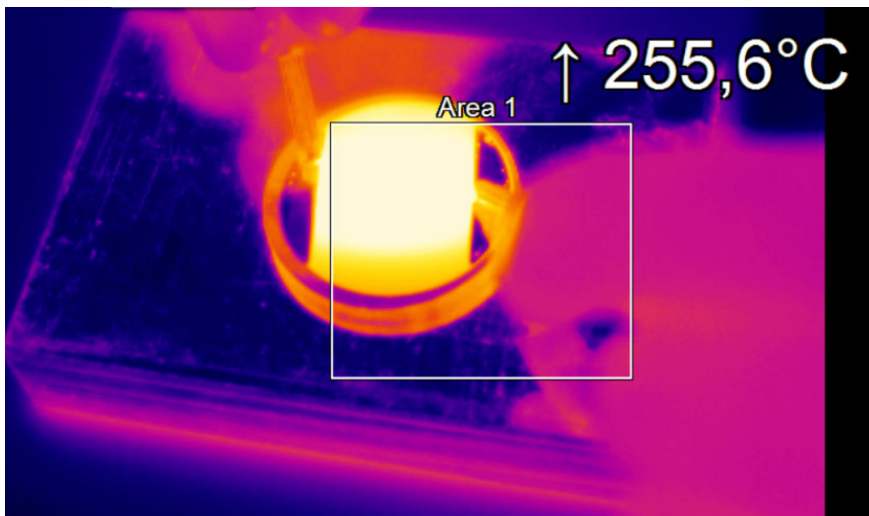


Abbildung 32: Aufgezeichnetes Wärmebild beim Betrieb einer Heizwendel auf einem Edelstahl-Rundsubstrat

Eine abgeschiedene Heizwendel mit mittlerer Auflösung auf einer Hotend-Hälfte der zweiten Iteration konnte kurzzeitig mit etwa 40 W betrieben werden. Eine dauerhafte Bestromung mit 28,8 W der Wendel auf der Hotend-Hälfte konnte ebenfalls Temperaturen von über 275 °C herbeiführen, führte nach 4 min aber zu einem Durchbrennen der Wendel. Die Versuchsaufbau zum Test der Wendel auf der Hotend-Hälfte ist in der Abbildung 33 dargestellt.

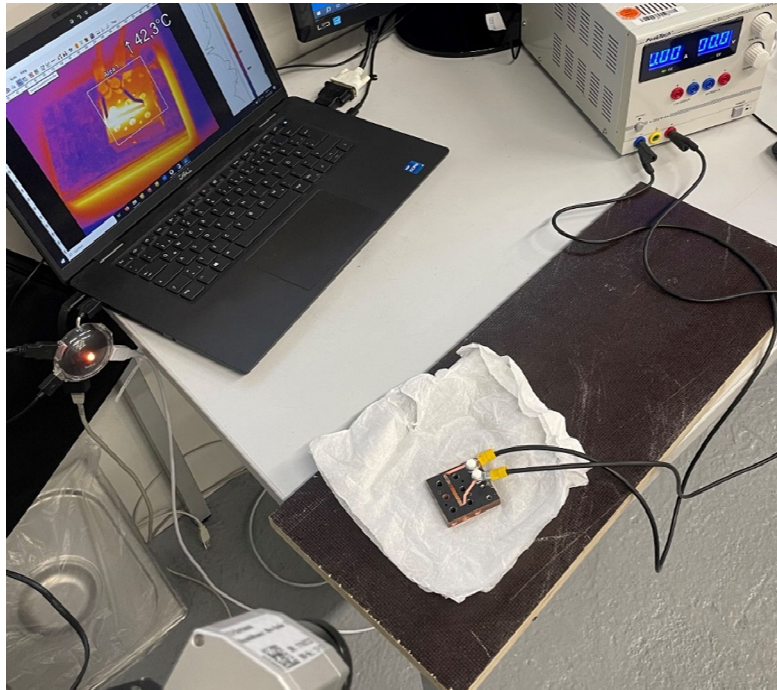


Abbildung 33: Versuchsaufbau zum Aufheizen der Wendel auf einer Edelstahl-Hotend-Hälfte; eine Detailansicht einer kontaktierten Heizwendel auf einer Edelstahl-Hotend-Hälfte ist in der Abbildung 15 zu sehen

Von den drei erprobten Wendelgeometrien (grob, mittel, fein) zeigte sich die grobe Kontur als die vielversprechendste. Insbesondere bei der feinen Wendel traten oft Abschattungseffekte und damit Inkonsistenzen in der Kontur auf, die die hergestellte Wendel unbrauchbar machten.

Auch auf den keramischen T-Stücken für die Hotend-Iteration 3 konnte eine Heizwendel abgeschieden und erfolgreich erprobt werden. Ein Betrieb konnte mit etwa 1,5 W (3,5 V bei 0,42 A) dauerhaft gewährleistet werden. Hierbei konnten Temperaturen von ca. 200 °C erreicht und gehalten werden. Um ein Durchbrennen der Wendel auf dem teuren und empfindlichen Substrat zu vermeiden, wurde eine stärkere Erwärmung des T-Stücks ohne ein wärmeabführendes Medium nicht durchgeführt.

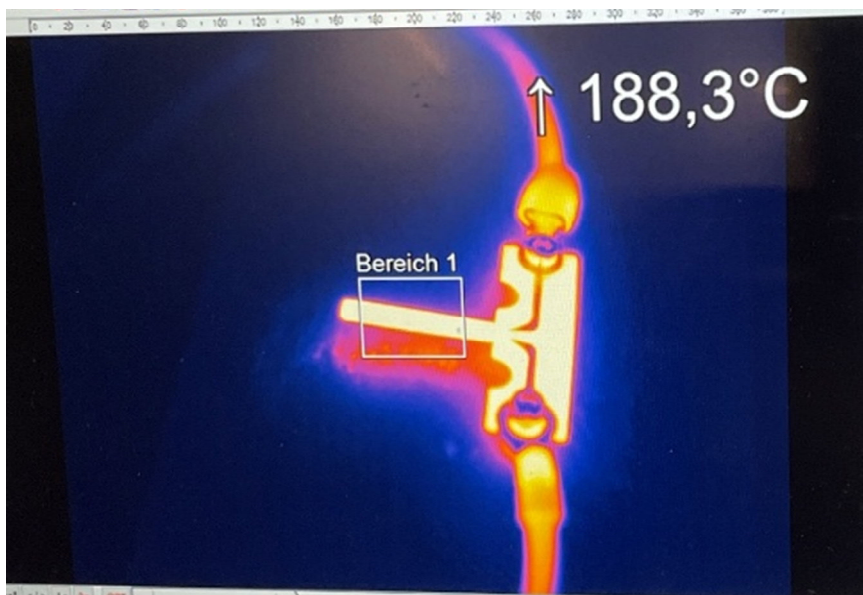


Abbildung 34: Aufheizen einer Heizwendel auf einem keramischen T-Stück (3. Hotend-Iteration)

Heizversuche mit der Heizwendel auf den Keramikhälften der vierten Hotend-Iteration konnten mit etwa 100 W Leistung durchgeführt werden. Mit der eingestellten Leistung war ein Temperaturhub von 20 °C auf 200 °C in 87 s realisierbar. Auch die Maximaltemperatur der Wärmebildkamera von 275 °C konnte mit der abgeschiedenen Wendel erreicht werden.

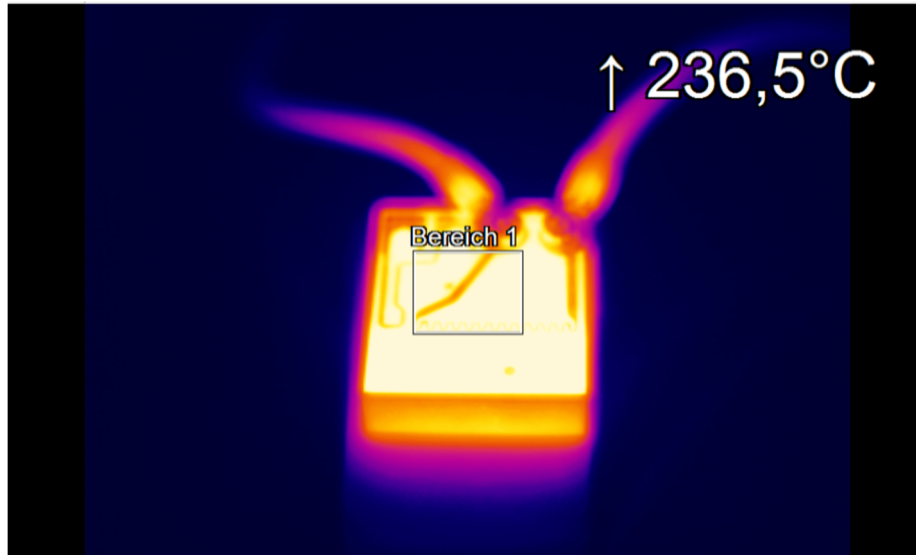


Abbildung 35: Betrieb der Heizwendel auf einer Keramikhälfte (Hotend-Variante 4)

Grundsätzlich zeigten die durchgeführten Untersuchungen, dass für jede hergestellte Heizwendel die Ansteuerung individuell angepasst werden muss. Durch minimale Änderung der Wendelkontur aufgrund von Abschattungen im Beschichtungsprozess, durch unterschiedliche Positionierungen der Maske oder durch minimal unterschiedliche Beschichtungszeiten, variieren die Geometrie und Schichtdicke der Wendeln untereinander. Durch die geringe Schichtdicke verändern sich hierbei die elektrischen Eigenschaften der Wendeln deutlich. Ebenso hat die Wahl des Substratmaterials und die sich daraus ergebende Wärmemenge, die zum Erwärmen des Hotends notwendig ist, einen Einfluss auf das Verhalten der Dünnschichtheizung. Grundsätzlich sind alle hergestellten Heizwendeln in der Lage, das Substratmaterial stark zu erwärmen und den dafür benötigte elektrischen und thermischen Belastungen auch wiederholt standzuhalten. Eine zu starke Erwärmung ohne geeignete Regelung und ein wärmeabführendes Medium können nach einiger Zeit aber zu einem Durchbrennen der Heizwendel führen.

Thermoelement

Grundlegende Untersuchungen mit abgeschiedenen Temperatursensoren wurden zunächst auf kleinen Flachsubstraten unterschiedlicher Materialien durchgeführt. Hierzu wurden Thermoelemente vom Typ K auf Substraten aus Messing, Edelstahl (1.4404) und Keramik (Aluminiumnitrid) aufgebracht. Im Fall von Messing und Edelstahl wurde zur elektrischen Isolierung der Sensoren vom Substrat-Material zusätzlich eine Aluminiumoxid-Schicht (Al_2O_3) unterhalb der Funktionsschicht vorgesehen. Die so hergestellten Temperatursensoren wurden auf eine regelbar beheizte Platte gelegt und das von Ihnen abgegebene Signal ausgelesen (vgl. Abbildung 36).

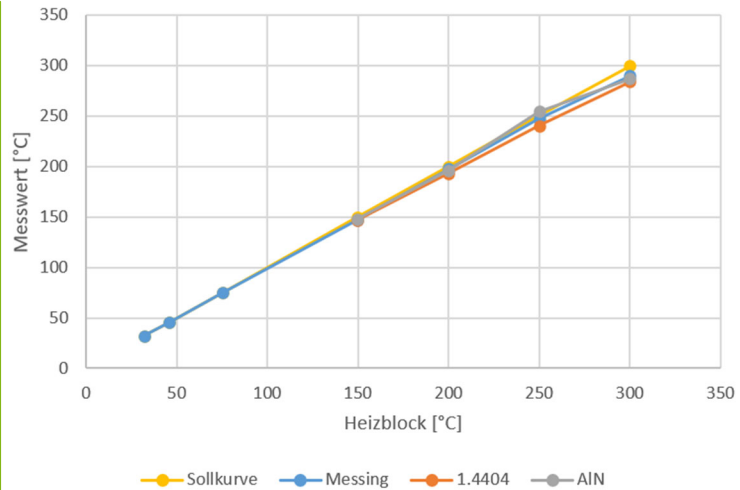


Abbildung 36: Aufzeichnen der Temperatur mit Thermoelementen auf drei verschiedenen Substratmaterialien

Hierbei zeigte sich, dass alle abgeschiedenen Thermoelemente in der Lage sind, die Temperaturen in einem gewissen Toleranzbereich genau zu messen. Die geringste Messabweichung zwischen der Ist- und der gemessenen Temperatur tritt beim Aluminiumnitrid-Substrat auf, die größte beim Edelstahl. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit die Genauigkeit des Sensors zunimmt.

Weiterführende Untersuchungen zu abgeschiedenen Thermoelementen auf Keramik wurde mit den T-Stücken der dritten Hotend-Variante durchgeführt. Analog zur DIN EN 60751 wurden Thermoschockversuche durchgeführt, um einerseits die Ansprechzeit des Dünnschicht-Thermoelements mit dem von anderen Thermoelementen zu vergleichen, und andererseits die Haltbarkeit der Schichten bei schnellen Temperaturwechseln zu beobachten.

Zur Bewertung der Geschwindigkeit und der Genauigkeit der Dünnschichtthermoelemente wurden zwei verschiedene Referenz-Thermoelemente eingesetzt. Bei dem ersten handelt es sich um ein Standard-Thermoelement mit Edelstahl-Schutzhülse ($l = 24 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$) aus dem Katalog der Firma Sensorshop24. Das zweite Referenzthermoelement ist ein einfaches Thermoelementkabel vom Typ K, dessen Enden abisoliert und durch ein Mikroschweißgerät miteinander verbunden wurden (Abbildung 37). Im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes wurden solche Thermoelemente vom LKP bereits erfolgreich für Anwendungen mit kleinem Bauraum erfolgreich eingesetzt.

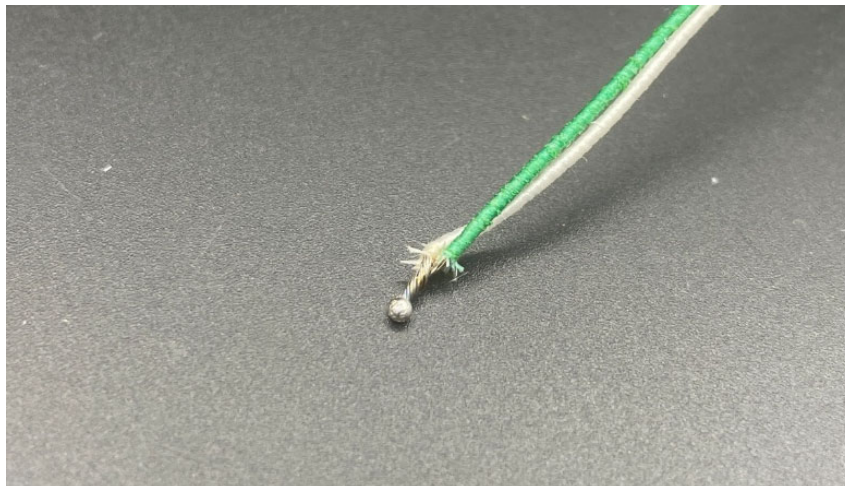


Abbildung 37: Verschweißtes Kabel-Thermoelement

Um die Sensoren miteinander vergleichen zu können, wurden alle im selben Versuchsaufbau abwechselnd in ein Heißbad und ein Kaltbad eingetaucht und ihr Messsignal dabei kontinuierlich aufgezeichnet. Das mit Silikonöl gefüllte Heißbecken ist im vorliegenden Fall mit einem Labor-Magnetrührer der Firma Heidolph auf 215 °C temperiert worden. Das Kaltbecken wurde derart dimensioniert, dass das Silikonöl beim Eintauchen der erhitzten Sensoren keinen signifikanten Temperaturhub von der Umgebungstemperatur von 21 °C erfährt.

Übliche ermittelbare Kennwerte zum Vergleich der Sprungantwort von Temperatursensoren sind hierbei die Werte τ_{63} und τ_{90} . τ_{63} gibt dabei die Zeitspanne an, die ein Temperaturfühler benötigt, um 63 % der zu messenden Temperaturdifferenz auszugeben, τ_{90} entsprechend für 90 % des Temperaturhubes.

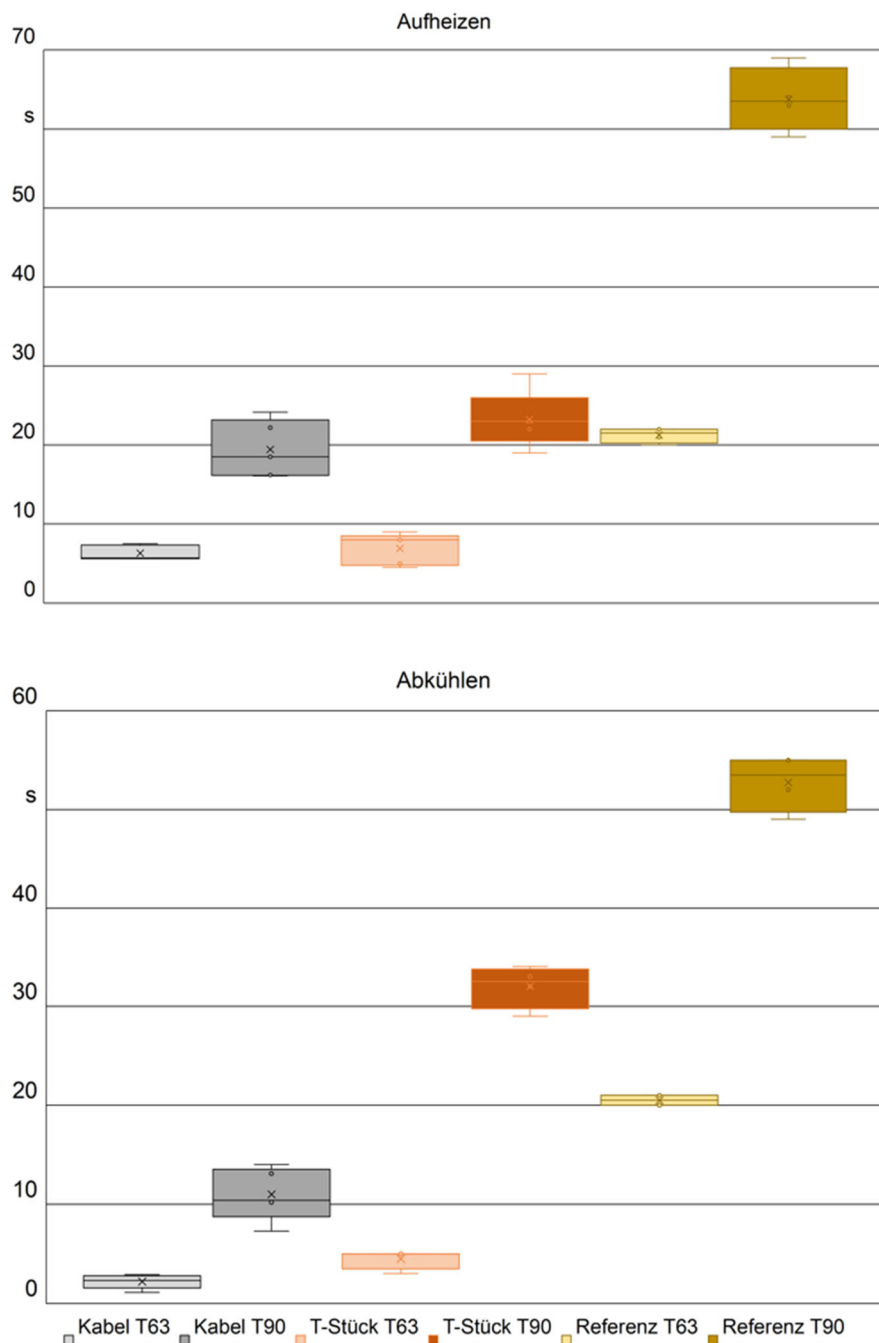


Abbildung 38: Boxplot-Diagramme für die ermittelten τ_{63} - und τ_{90} -Zeiten der drei Sensoren für Aufheiz-(oben) und Abkühlvorgänge (unten)

Die Versuche wurden mit allen Varianten der verwendeten Temperatursensoren fünfmal wiederholt und die ermittelten Zeiten für τ_{63} und τ_{90} gemittelt. Unterschieden wurde dabei auch zwischen den Zeiten beim Wechsel von kalt in heiß und von heiß zu kalt. Die ermittelten Zeiten sowie die gemittelten Werte und die Standardabweichung können der Abbildung 38 entnommen werden.

Deutlich wird aus diesen Daten, dass der beschichtete Sensor auf dem T-Stück hinsichtlich seiner Geschwindigkeit vergleichbar schnell misst, wie der Sensor aus dem verschweißten Kabel. Der Mantelfühler ist deutlich langsamer als die beiden anderen Sensorvarianten. Hinsichtlich der Standardabweichung lassen sich keine Unterschiede bei der Wiederholgenauigkeit aller eingesetzter Sensoren erkennen. Erklärbar ist das beobachtete Verhalten damit, dass sowohl der T-Stück-Sensor als auch das geschweißte Kabel deutlich weniger thermische Masse besitzen als der Mantelfühler. Sie benötigen daher deutlich weniger Energie, um die gewünschte Temperatur zu erreichen. Es ist daher davon auszugehen, dass auch in einem Druckprozess der Dünnschichtsensor deutlich schneller ansprechbar ist, als ein in den Heizblock eingesetztes, konventionelles Mantel-Thermoelement.

Das beschichtete Thermoelement auf dem keramischen T-Stück wurde im Anschluss an die Messungen noch mehrfach abwechselnd in das Heiß- und das Kaltbad eingetaucht, um die Thermoschockbeständigkeit zu bestimmen. Nach 50 solcher schnellen Temperaturwechsel von 21 °C auf 215 °C konnte keine optische Beschädigung der Sensorschicht beobachtet werden. Auch ist nach den mehrfachen Temperaturwechseln keine signifikante Änderung in der Ansprechzeit des Sensors erkennbar. Ableiten lässt sich hieraus, dass die Beständigkeit des Temperatursensors auf keramischem Substrat deutlich besser ist, als bei bisherigen Beschichtungsversuchen auf Edelstahlsubstraten, bei denen sich einige Schichten schon bei geringen Belastungen abgelöst haben.

Exemplarisch ist in der Abbildung 39 eine gemessene Aufheiz- und Abkühlkurve des beschichteten Sensors (blau) zu sehen. In grau und rot sind die Referenztemperaturen des Heiß- und Kaltbeckens eingezeichnet. Deutlich wird hier auch eine Messschwankung in der Abkühlkurve. Diese lässt sich auf eine unzureichende Kontaktierung des Sensors zurückführen. Das dünne T-Stück wurde mit Thermoelement-Kabelschuhen verschraubt. Aus den Erfahrungen der Montage der dritten Hotend-Variante (siehe AP 1) wurden die Schrauben hierfür nur leicht angezogen, um ein Brechen des Substrats zu vermeiden. Die so realisierte Kontaktierung führte in unregelmäßigen Abständen bei kleinsten Relativbewegungen zwischen beiden Partner zu kurzen Messfehlern in der Datenaufzeichnung.

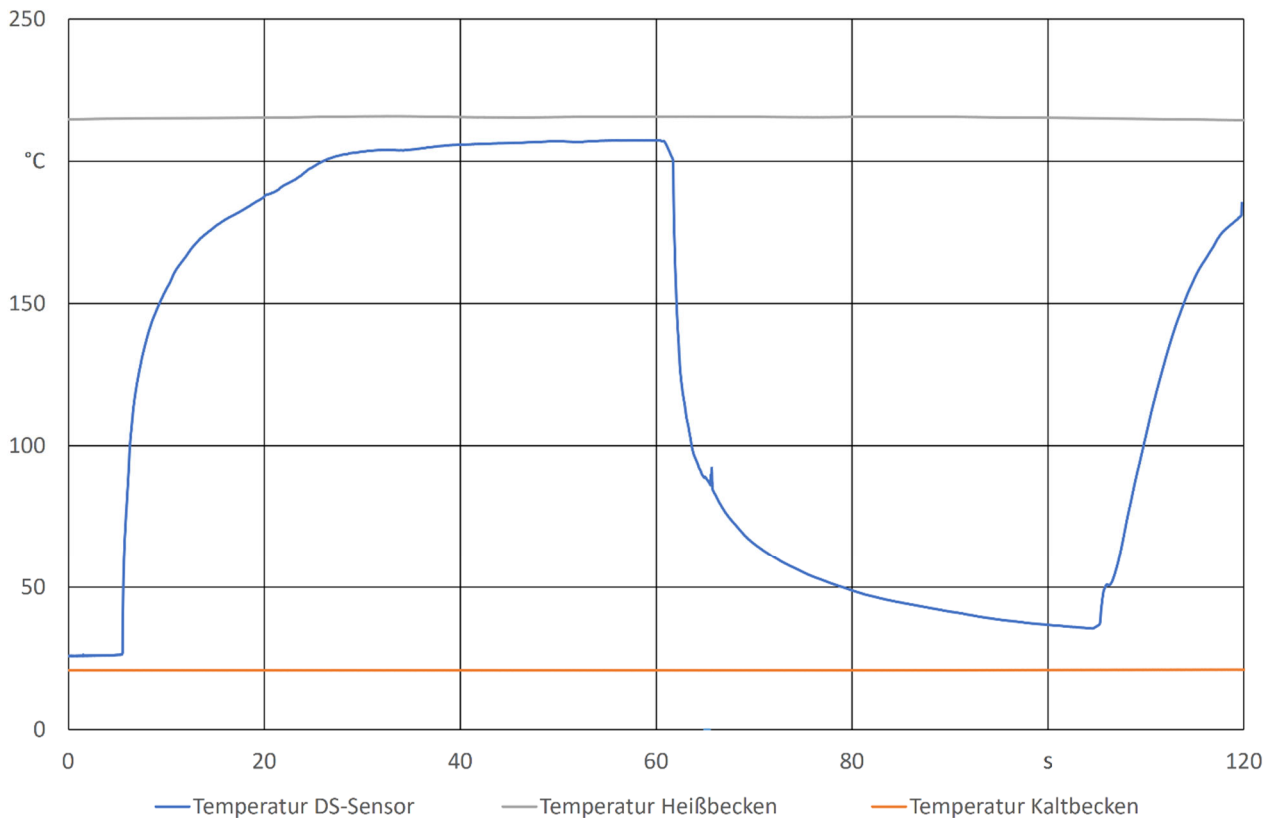


Abbildung 39: Beispielhafte Aufheiz- und Abkühlkurve für das PVD-beschichtete Dünnschicht-Thermoelement mit Messfehler in der Abkühlkurve

Drucksensorik

Bezüglich der Applikation sensorischer Schichten zur Messung des Innendruckes hat eine umfangreiche Literaturrecherche zu Projektbeginn ergeben, dass die im Forschungsvorhaben skizzierte Ausführung piezoelektrischer und piezoresistiver Elemente wenig erfolgversprechend sind. Auch der Austausch mit Experten der TU Dortmund aus dem Bereich der Mess- und Regelungstechnik sowie Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses führte zu der Erkenntnis, dass die entstehenden Ladungsverschiebungen bei einem Dünnschicht-Piezo trotz Ladungsverstärker für die Aufnahme von Messdaten deutlich zu gering sind. Es wurde entschieden, stattdessen eine Applikation von Dünnschicht Dehnungsmessstreifen aus NiCr oder Konstantan als zielführenderen Ansatz zu forcieren und über eine Verformung des Hotends auf eine mögliche Änderung des Innendruckes zu schließen.

Um zunächst die aufwändige Auslegung und Gestaltung von DMS-Anordnungen und ihre Kontaktierung auf dem Hotend zu vermeiden und die grundsätzliche Idee zu validieren, wurden herkömmliche DMS auf einem Hotend der zweiten Iteration angebracht (siehe Abbildung 40), das Hotend mit einem Blindflansch statt einem Flansch mit Düse auf einer Seite verschlossen und über den Flansch für die Heatbreak ein Hydraulikaggregat angeschlossen.

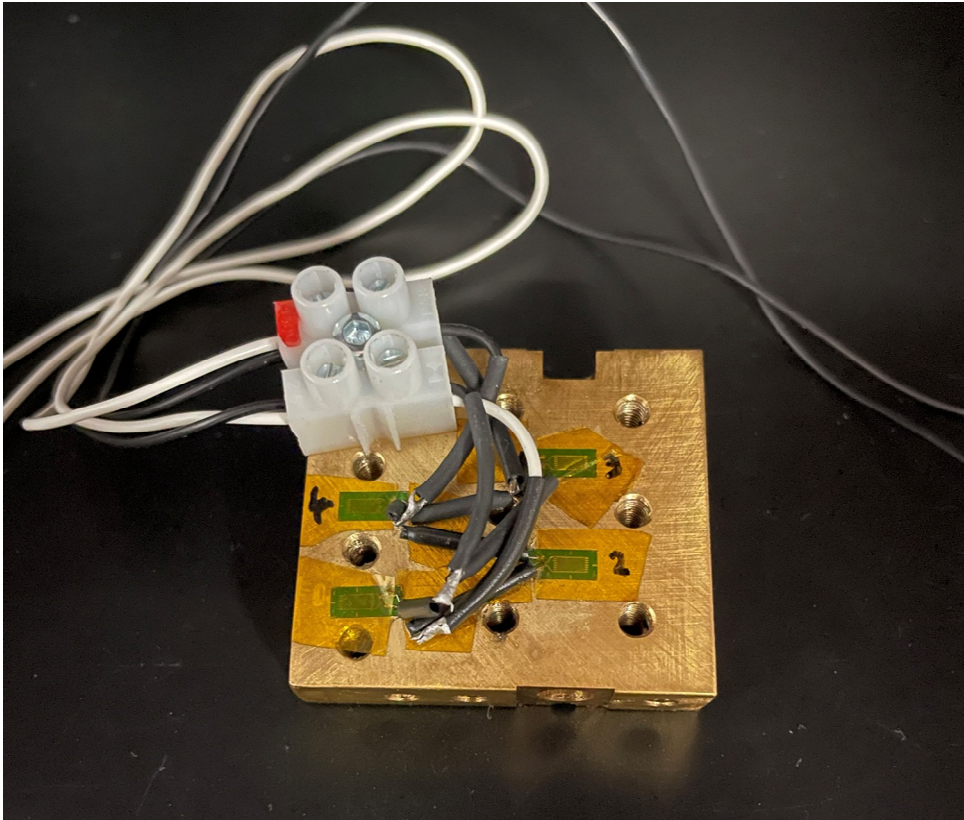


Abbildung 40: Hotend-Hälfte aus Messing mit aufgeklebten DMS in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung

Um die messbare Dehnung des Hotends deutlicher zu machen wurden zusätzlich unterschiedliche abgewandelte Varianten des Hotends gefertigt und auf gleich Weise erprobt. So wurde etwa die Wandstärke des Hotends an den Messstellen deutlich verkleinert und das Hotend aus dem im Gegensatz zu Edelstahl deutlich weicheren Messing gefräst, um die zu messende Dehnung weiter zu erhöhen. Die dabei aufgezeichneten Werte des Innendruckes und der gemessenen Dehnung zeigten sich zunächst vielversprechend und ein Zusammenhang zwischen beiden Werten konnte identifiziert werden (siehe Abbildung 41).



Abbildung 41: Gemessene Dehnung (oben) und aufgeprägter Druck (unten)

In den aufgezeichneten Daten war ein Drift des Messsignals erkennbar, wobei nicht eindeutig bestimmt werden konnte, ob ein Abgleiten des aufgeklebten Sensors auf dem Hotend ursächlich hierfür war oder der Drift innerhalb der Messtechnik entstand.

Bei der Hinzunahme von Temperatureinflüssen bei diesem Versuchsaufbau zeigte sich, dass die gemessene Dehnung infolge von Temperaturänderungen deutlich größer ist, als die bei einem veränderten Innendruck. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass die Änderung des Messsignals auch bei Luftzirkulationen über den DMS deutlicher ausgeprägt ist, als diese bei der Variation des Drucks. Die Differenzierung zwischen den vielen Einflussfaktoren auf das gemessene Signal ist dadurch zusätzlich erschwert und daher in der Gesamtbetrachtung auch nur schwer auswertbar. Stattdessen zeigte sich, dass flach auf den DMS wirkende Kräfte eine deutlich stärkere Reaktion des Messsignals hervorrufen. Es sollte daher in einem Versuchsaufbau erprobt werden, ob sich DMS als klassische Drucksensoren im Innern des Schmelzkanals eignen und so eine Änderung des Drucks im Hotend aufgezeichnet werden kann.

Zur Erprobung der Fähigkeit von Dünnschichtwendeln zur Detektion von Druckbelastungen wurden auf keramischen Rundsubstraten Wendeln aus den vier Materialien Nickel, Nickel-Chrom, Chrom und Kupfer-Nickel abgeschieden. Dabei wurden je Material drei Wendeln mit Maskierungen direkt in der PVD-Anlage hergestellt und drei weitere mittels Nassätzverfahren. Um einen möglichst hydrostatischen Druckzustand über der Wendel zu erzeugen, wurde angestrebt, die Druckaufprägung wie in anderen Versuchen bisher auch über eine Hydraulik aufzuprägen. Hierfür wurde eine Vorrichtung konstruiert und gebaut, die die Aufnahme und

Kontaktierung der Probenkörper ermöglicht. Die entwickelte Vorrichtung zeigte sich in Versuchen als dicht und grundsätzlich einsatzfähig (siehe Abbildung 42).

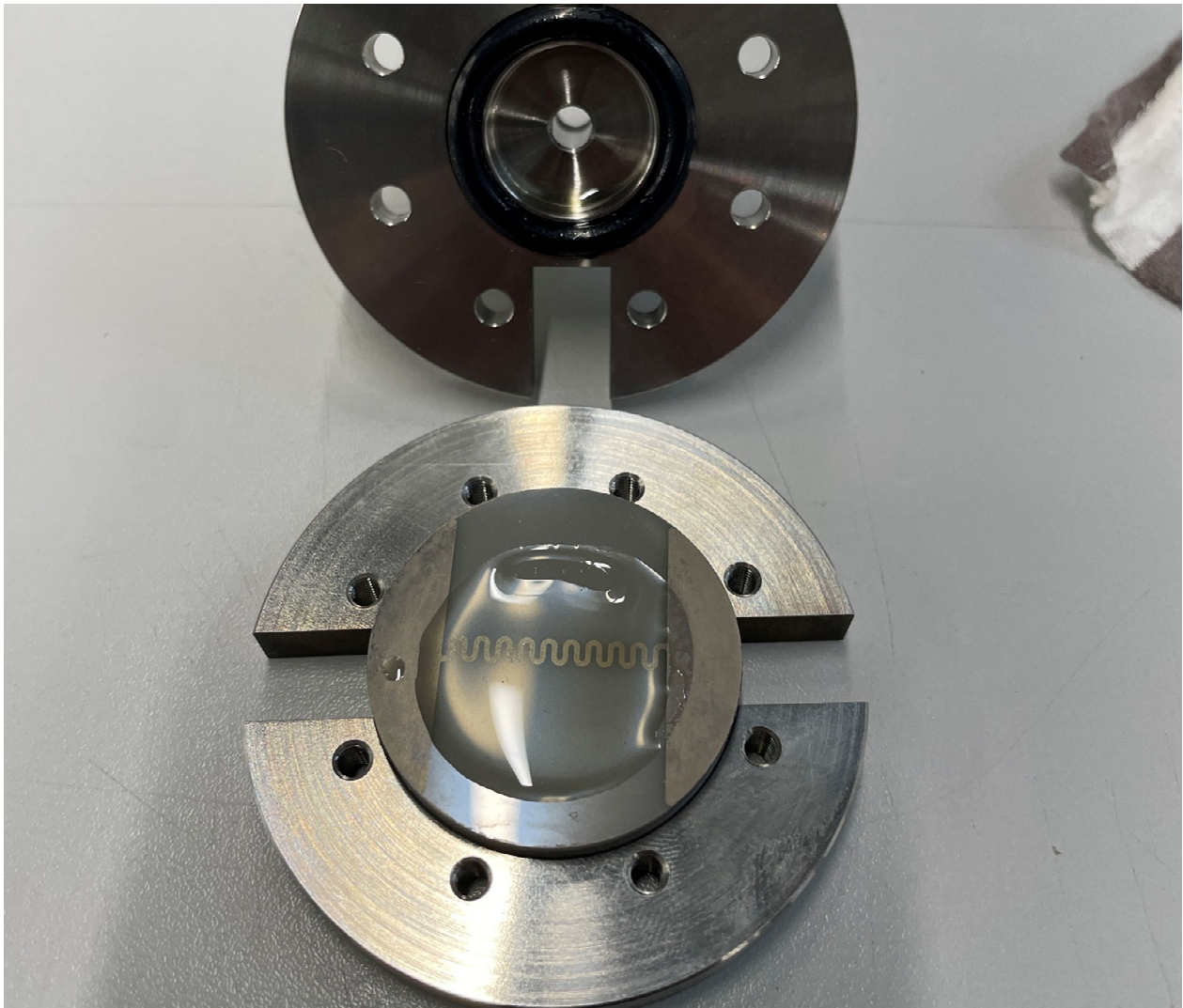


Abbildung 42: Vorrichtung zur hydraulischen Prüfung der Widerstandsänderung von unterschiedlichen Wendeln.

Durch Leckagen und Rückströmungen innerhalb des Hydraulikzylinders konnte mit diesem Versuchsaufbau allerdings kein konstanter Druck aufgeprägt werden. Eine Untersuchung und Auswertung eines möglichen Drifts des Messsignals war auf diese Weise daher nicht möglich. Geeignete Hydraulikaggregate, die eine konstante, weitestgehend pulsationsfreie Druckaufbringung ermöglichen, standen nicht zur Verfügung.

Der Versuchsaufbau wurde deshalb dahingehend verändert, dass die gewünschte Last auf die Wendel mit einem Stempel aufgeprägt wird (siehe Abbildung 43). Um einen Belastungszustand zu erzeugen, der dem angestrebten hydrostatischen Druck im Fall einer Hydraulik oder einem mit Kunststoffschmelze gefüllten Hohlraum nahekommt, wurde auf dem Prüfstempel ein weiches Silikonpad aufgeklebt, um eine möglichst gleichmäßige, flächige Belastung auf dem Rundsubstrat hervorzurufen.



Abbildung 43: Versuchsaufbau zur mechanischen Druckprüfung auf beschichteten Wendeln

Die mit dem vorgestellten Versuchsaufbau gewonnenen Daten erlaubten es nicht, einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem aufgeprägten Druck und dem gemessenen Signal der Wendel zu erkennen. Eine zentrale Einschränkung dieses Versuchsaufbaus, wie auch der Alternativlösung mit der Hydraulik, war die Art der Kontaktierung der Dünnschichtwendel. Das Keramik-Rundsubstrat konnte nicht mechanisch nachbearbeitet werden, wodurch die Wunschlösung einer festen Verschraubung nicht umsetzbar war. Die elektrische Kontaktierung konnte daher nur über eine Klemmung der Kontakte erfolgen.

Die Art der Kontaktierung erwies sich im Zusammenhang mit der dynamischen, mechanischen Belastung im Versuchsaufbau als kritisch. Während des Druckaufbaus und während Belastungsänderungen kam es zu geringfügigen Relativbewegungen zwischen beiden Partnern. Diese Bewegungen führten zu variablen Kontaktwiderständen und kurzzeitigen Kontaktinstabilitäten, die sich unmittelbar im aufgezeichneten Signal widerspiegelten. Die einander überlagerten Artefakte der Kontaktierung sowie das eigentlich zu bestimmende Messsignal überlagerten sich und verhinderten so eine verlässliche Interpretation der Messergebnisse. Zukünftige Untersuchungen über die Projektlaufzeit hinaus sollten daher eine konstruktive Anpassung der Kontaktierung vorsehen, die ein zuverlässiges Auswerten von Messsignalen sicherstellt.

Anhaftung von Kunststoff

Zur Überprüfung der Anhaftung von Kunststoff an der verwendeten Verschleißschicht AlCrON wurde zunächst versucht, eine beschichtete Edelstahlprobe mittels einer Heizpatrone und einem angeschlossenen Temperaturregler gezielt zu erwärmen und anschließend ein Kunststoffreservoir aufzusetzen, das mit einer vorgegebenen Kraft aufgedrückt wird. Nach dem kontrollierten Abkühlen der Probe und des Kunststoffs sollte dieser in einer Universalprüfmaschine abgezogen werden. Die hierbei ermittelte Kraft soll Auskunft über die Anhaftung von Kunststoff auf der Verschleißschicht geben. Problematisch war hierbei, dass für eine aussagekräftige Messung die Kontaktfläche zwischen Kunststoff und Substrat genau definiert sein muss und ein zufälliges Verlaufen des Kunststoffs auf dem Substrat unzulässig ist. Der zur Gewährleistung dieser Bedingung eingesetzte Versuchsaufbau führte jedoch nicht zum gewünschten Ziel. Das Ablösen des formgebenden Röhrchens für die Stempelgeometrie löste in den meisten Fällen auch den Kunststoffstempel vom Substrat, sodass keine Messung möglich war. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde ein alternativer Versuchsaufbau konzeptioniert. Hierfür wurde mit einem konventionellen 3D-Drucker auf einer befestigten Substratplatte ein geometrisch definierter Körper mit immer gleichen Druckbedingungen (Düsentemperatur, Materialfluss, Düsenabstand zum Substrat) geschaffen. Durch die Eigenheiten des 3D-Drucks war es so zusätzlich möglich, den gedruckten Körper so zu gestalten, dass ein Formschluss des Stempels mit der Einspannvorrichtung der Zugprüfmaschine erzielt werden konnte. Der überarbeitete Versuchsaufbau kann der Abbildung 44 entnommen werden.

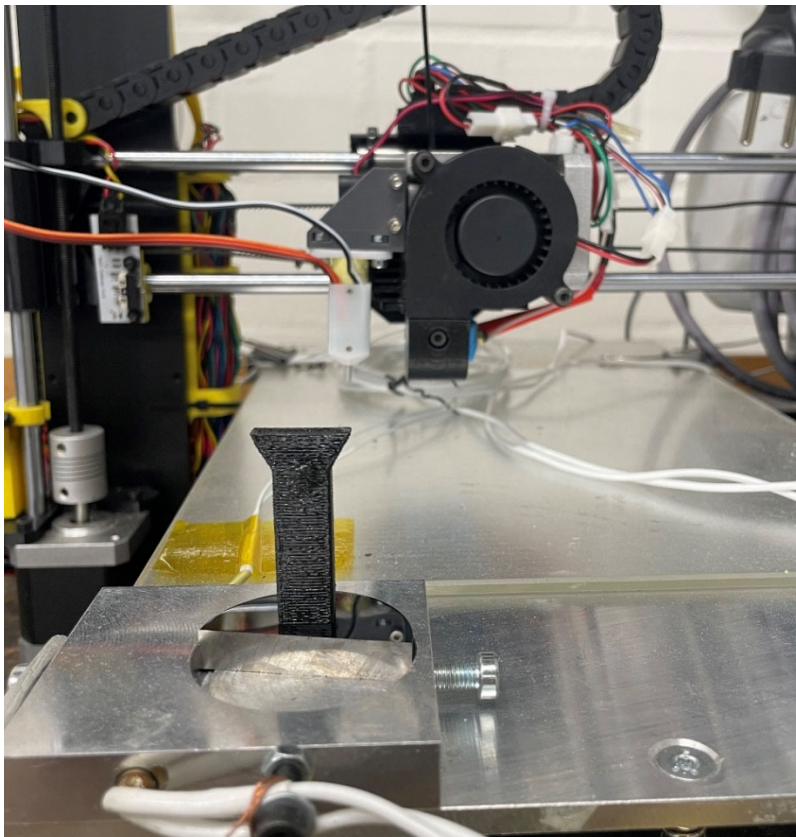


Abbildung 44: Probenherstellung für die Abzugsprüfungen mittels additiver Fertigung auf halbierten Rundsubstraten

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse lassen bei allerdings gleichzeitig hoher Zahl von ungültigen Proben wegen vorzeitigem Ablösen der Stempel, Druckfehlern oder falschem Einspannen in der Anlage darauf schließen, dass grundsätzlich nur eine geringere Kraft notwendig ist, um eine PET-G-Probe von einer AlCrON-

Schicht abzulösen. Dabei nimmt die benötigte Abzugskraft mit zunehmendem Sauerstoffanteil während des Beschichtungsvorgangs der Schicht ab. Die größte Kraft ist bei einer polierten rohen Edelstahloberfläche notwendig, wobei der Unterschied nur gering ausfällt (vgl. Abbildung 45).

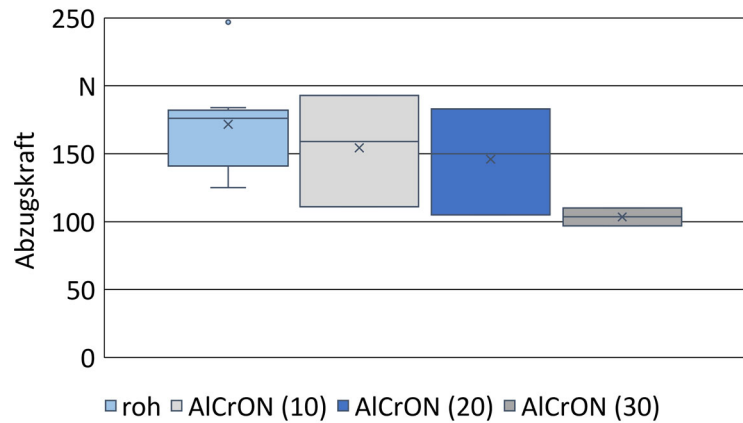


Abbildung 45: Visualisierung der benötigten Abzugskräfte von PET-G-Proben auf unterschiedlichen Oberflächen

Durch die bereits angesprochenen Erkenntnisse (vgl. AP 1), dass die Verschleißschutzschicht zu einer schlechteren Haftung des Schichtsystems führt, soll auf diese in den letzten Beschichtungsversuchen verzichtet werden.

1.5 Arbeitspaket 5: Evaluation und Praxisversuche

Zur Bewertung, ob ein Einbringen eines statischen Mischelements in den Heißkanal einen signifikanten Mehrwert zur Homogenisierung liefert, wurden einfache Simulationen mit der Software Ansys durchgeführt. Besondere Herausforderungen lagen hier neben der Etablierung eines geeigneten Materialmodells für den thermoplastischen Kunststoff insbesondere in der Reduzierung der Modelldetails. Grundsätzlich war die Simulation der in den Schmelzekanal eingebrachten Dünnschichten dahingehend schwierig, dass einerseits Angaben zum Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den einzelnen Schichtmaterialien nicht vorlagen und andererseits die Auflösung der Simulation bei Schichten im μm -Bereich schnell zu groß wurde. Um diesen Problemen entgegen zu wirken, wurden einige Annahmen für die durchgeführten Simulationen getroffen, die eine Durchführung erleichtern und das Ergebnis der Simulationen auf die wesentlichen auszuwertenden Aspekte beschränkt. So wurde etwa angenommen, dass die komplette Innenkontur des Heißkanals als Wärmequelle von wenigen Watt dient und die Konturen der eingesetzten Heizpatronen die Zieltemperatur des Hotends erhalten. Ebenso wurden Details wie die Dichtungen, Luftspalte und die Isolationsschichten vernachlässigt, wodurch als zu simulierendes Objekt lediglich die beiden Hotend-Hälften und der Schmelzekanal verblieben.

Als Eingangsgröße für den Kunststoffstrom wurde PP mit einem geeigneten Materialmodell (Viskositätsmodell nach dem Cross-WLF-Ansatz) mit einer Temperatur von 298,15 K bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,003 m/s angenommen. Für das Outlet wurde als Gegendruck eine Extrusion in die freie Umgebung angenommen.

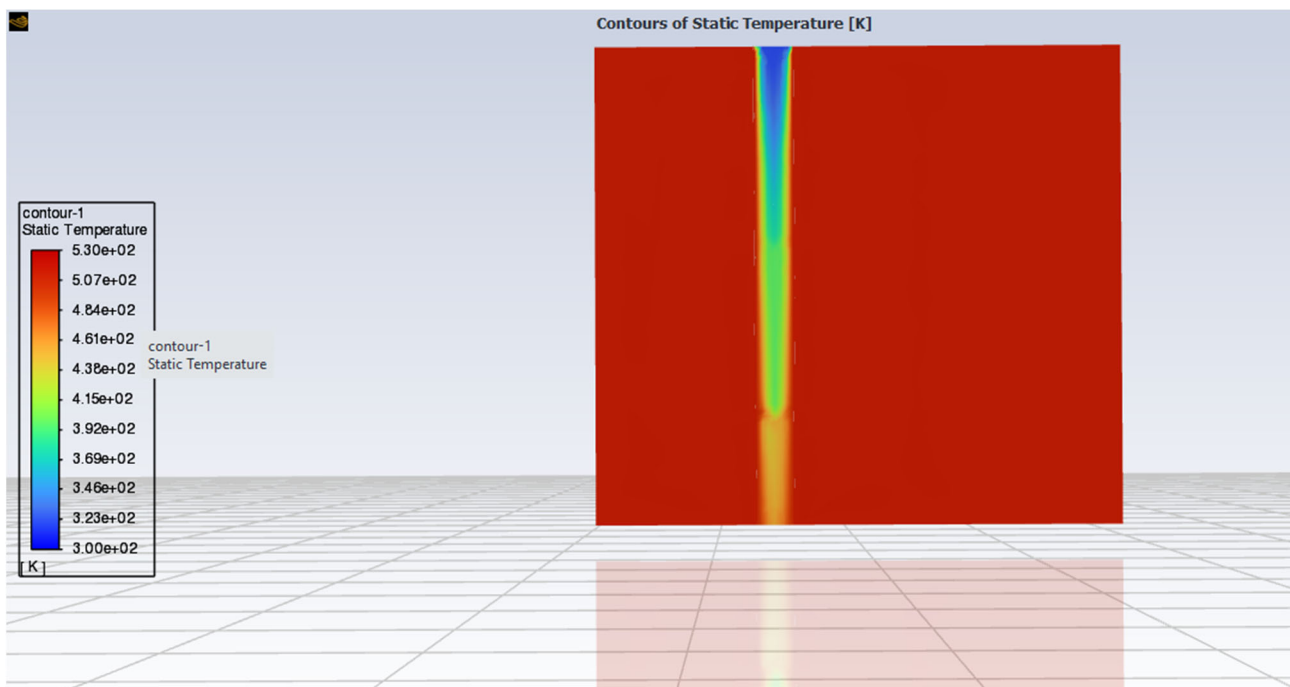


Abbildung 46: Einfache Simulation des Temperaturfeldes einer Kunststoffschmelze im Hotend der ersten Iteration ohne Verwendung eines Statikmischers

In der vereinfachten Simulation zeigte sich, dass sich der Kunststoff mit zunehmendem Fließweg im Hotend immer weiter erwärmt, wobei die Temperatur an der Heißkanalwand nahezu mit der des Hotend-Körpers

übereinstimmt (siehe Abbildung 46). Dieses Bild ist bereits aus anderen Untersuchungen zur Temperaturverteilung in einem Heißkanal bekannt. Bis zum Austritt bleibt die Temperatur des Kerns der Kunststoffschmelze unter der der Randschicht. Beim Austritt liegt eine Temperaturdifferenz von etwa 20 K vor.

Eine gleiche Simulation wurde nachfolgend für das gleiche Hotend mit eingesetztem statischem Mischelement durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen zeigten dabei, dass die Verwendung eines statischen Mischelements zu einer schnelleren Erwärmung des Kunststoffstrangs im Schmelzkanal führt (siehe Abbildung 47). Nicht eindeutig konnte ausdifferenziert werden, ob diese verbesserte Erwärmung durch die reine Vermischung und das Umschichten des Kunststoffs geschieht oder die Wärmeleitung in den Kern des Kunststoffs durch den Metall-Mischer einen größeren Einfluss hat.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass mit einem statischen Mischelement eine Homogenisierung der Schmelztemperatur über den Querschnitt möglich ist und somit die Verwendung eines Mixers grundsätzlich zu bevorzugen ist. Insbesondere kann so mit einem deutlich kürzeren Heißkanal eine gewünschte Schmelztemperatur über dem gesamten Querschnitt erzielt werden.

Durch die Wahl eines rechteckigen Kanalquerschnitts ab der zweiten Hotend-Iteration im Laufe des Projektes konnte mit den vom projektbegleitenden Ausschuss bereitgestellten Statikmischern kein Praxisversuch durchgeführt werden. Eine Integration von Mischelementen in konventionelle Heißkanäle und die konstruktive Entwicklung eines geeigneten Mixers für einen rechteckigen Kanalquerschnitt bieten in jedem Fall das Potential, eine homogenere Erwärmung des Kunststoffs zu erzielen.

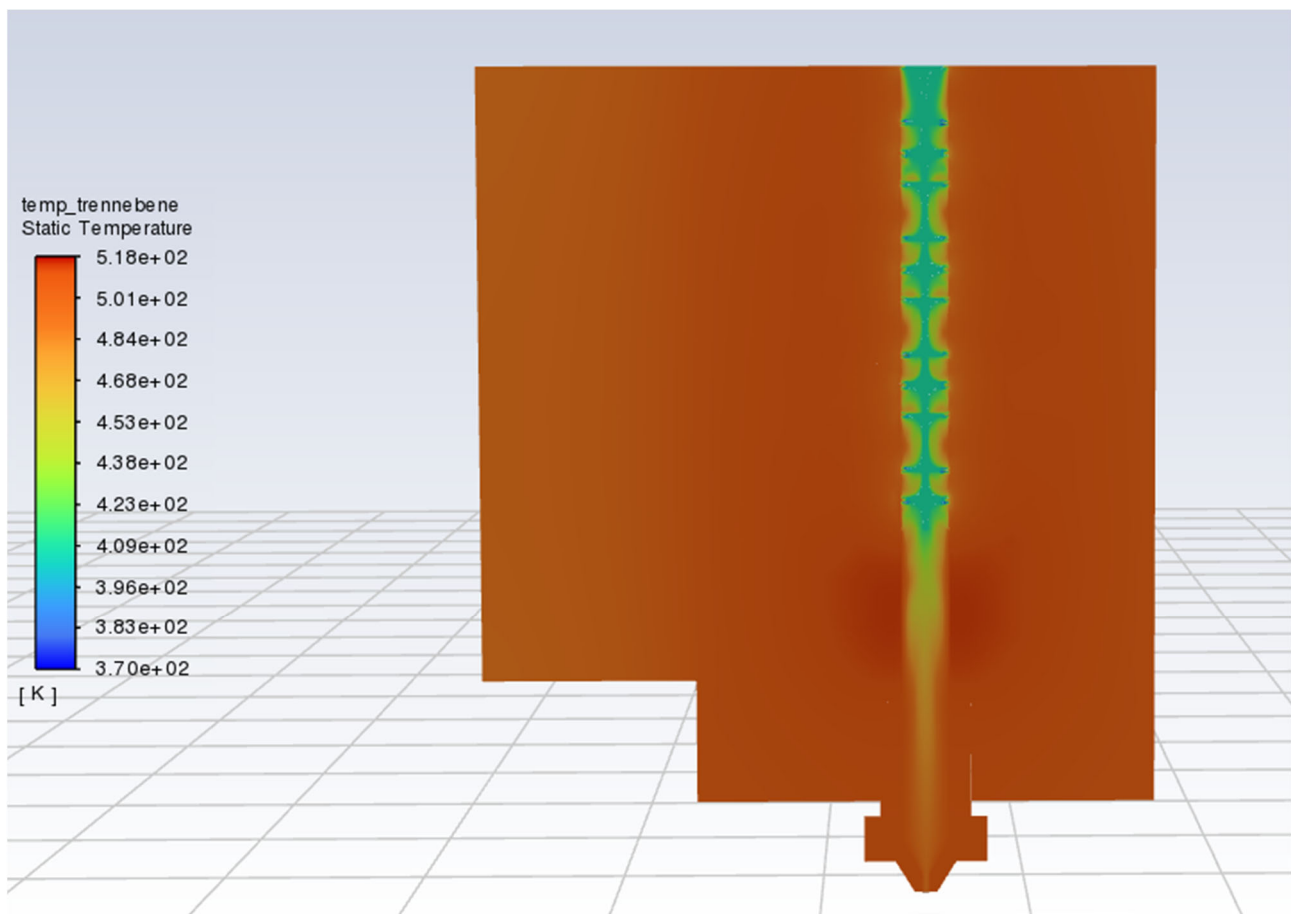


Abbildung 47: Simulation des Temperaturfeldes in einem Hotend der ersten Iteration mit Statikmischer

Praxisversuche seitens der Partner aus dem projektbegleitenden Ausschuss konnten im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt werden. Da bis zum Projektende kein vollumfänglich funktionsfähiger Prototyp entwickelt werden konnte (vgl. AP 7), konnten für Standzeituntersuchungen und reale Einsatzbedingungen keine Daten gewonnen werden. Geplant ist, bei entsprechendem Interesse seitens der Industrie die zu Projektende beschichteten Keramikhotends in den Forschungseinrichtungen zu montieren und im Anschluss den Partnern zur Verfügung zu stellen.

1.6 Arbeitspaket 6: Evaluierung der Schichteigenschaften

Die REM-Aufnahmen der Morphologie (im Rückstreuelektronenmodus - BE) und der Topographie (im Sekundärelektronenmodus - SE) der isolierenden Al₂O₃-Schichten und ihrer Ist-Schichtdicke sind in Abbildung 48 dargestellt. Es zeigt sich eine dichte, amorphe Schichtstruktur mit einer homogenen und defektfreien Oberfläche mit blumenkohlartiger Anordnung. Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) bestätigen das Aufwachsen von reinem, amorphem Al₂O₃.

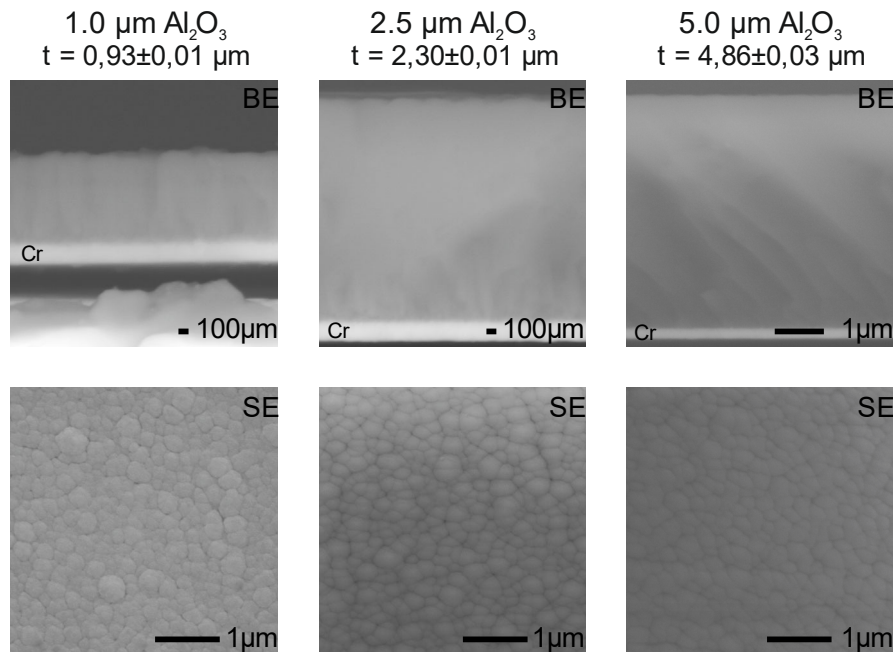


Abbildung 48: morphologische und topographische REM-Aufnahmen der Al₂O₃-Schichtdickenvariation mit Angabe der Ist-Schichtdicke

In Abbildung 49 sind die REM-Aufnahmen der Rockwell-Eindrücke der Al₂O₃-Schichten dargestellt. Es zeigen sich flächige Schichtabplatzungen, was den Haftfestigkeitsklassen von HF5-HF6 zuzuordnen ist. Die 2,5 µm dicke Al₂O₃-Schicht zeigt hier die besseren Eigenschaften.

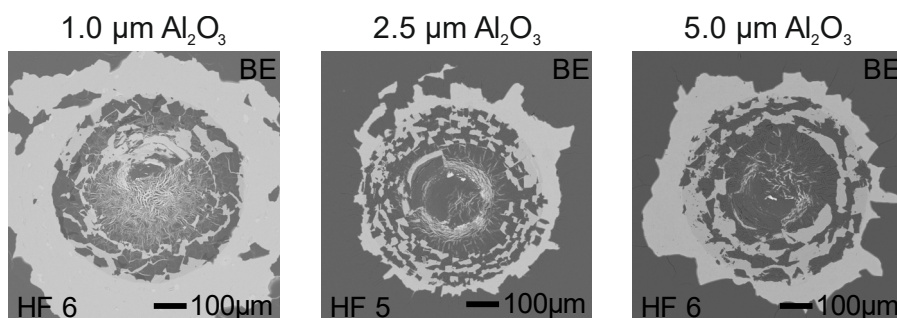


Abbildung 49: REM-Aufnahmen der Rockwell-Eindrücke (HRA60) der Al₂O₃-Schichten

Dies lässt sich mit den Ergebnissen des Scratch-Testes unterstreichen (siehe Tabelle 3). Hier zeigt die 2,5 µm dicke Schicht den höchsten Widerstand gegen Schichtablösung sowie Abplatzungen.

Tabelle 3: Kritische Lasten L_{c2} und L_{c3} der verschiedenen Al_2O_3 -Schichtdicken

Al_2O_3 -Schichtdicke [µm]	L_{c3} [N] (Schichtablösung)	L_{c2} [N] (Abplatzungen am Spurrand)
1,0	$8,7 \pm 0,8$	-
2,5	$38,8 \pm 1,8$	$8,3 \pm 0,6$
5,0	$26,5 \pm 6,8$	$6,2 \pm 2,3$

Die Tests zur Durchschlagfestigkeit zeigen, dass diese mit steigender Schichtdicke zunimmt. So hält die 1,0 µm Schicht 26-32 V, die 2,5 µm Schicht 73 V und die 5,0 µm Schicht 340 V stand. Somit zeigt eine Schichtdicke von Al_2O_3 2,5 µm bereits eine ausreichend hohe Durchschlagfestigkeit, sodass in weiteren Untersuchungen mit dieser Schichtdicke gearbeitet wird.

Die Haftung der Cu-Schicht auf der Al_2O_3 -Schicht bzw. des Schichtsystems (Al_2O_3 -Cu) auf dem Substrat wird als sehr gut bewertet. Der Rockwell-Eindruck kann mit HF1 bewertet werden und im Scartch-Test werden kritische Lasten von $L_{c2} = 17,1 \pm 2,2$ N sowie $L_{c3} = 51,1 \pm 7,4$ N erreicht. Dabei löst sich lediglich die Cu-Schicht von der Al_2O_3 -Schicht.

Die Ni- und NiCr-Schicht erreichen eine Schichtdicke von $1,14 \pm 0,01$ µm bzw. $1,07 \pm 0,02$ µm. Die Haftungsuntersuchung der beiden Schichten auf einer 2,5 µm Al_2O_3 -Schicht zeigt Haftfestigkeitsklassen von HF4-5 für Ni und HF6 für NiCr (siehe Abbildung 50)

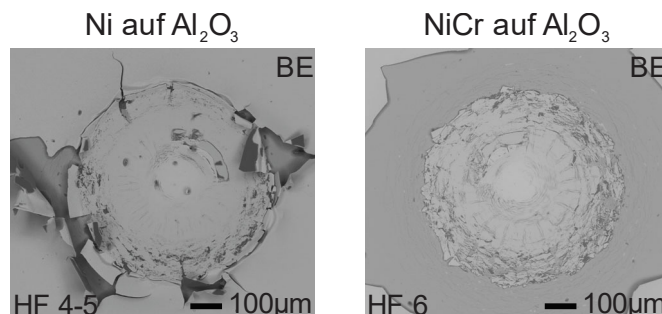


Abbildung 50: REM-Aufnahmen der Rockwell-Eindrücke (HRA60) von Ni (links) und NiCr (rechts) aus 2,5 µm dicker Al_2O_3 -Isolierschicht

Die Scratchtest hingegen zeigen im Allgemeinen gute Schichthaftung und sind der Tabelle 4 zu entnehmen. Demnach werden diese Schichten für die Beschichtung der Thermoelementleiterbahnen vorerst eingesetzt.

Tabelle 4: Kritische Lasten L_{c2} und L_{c3} der Ni- und NiCr-Schicht auf 2,5 µm dicker Al_2O_3 -Isolierschicht

Leiterbahnmaterial	L_{c3} [N] (Schichtablösung)	L_{c2} [N] (Abplatzungen am Spurrand)
Ni	$49,6 \pm 5,2$	-
NiCr	$53,9 \pm 4,2$	$46,57 \pm 4,0$

Das Abscheiden von Fe hat nicht funktioniert, da die magnetischen Eigenschaften des Fe-Targets das Magnetfeld der Permanentmagneten im PVD-Prozess stören. Demnach wird die Synthese von Typ K (Ni-NiCr) Thermoelementen weiterverfolgt.

Zur Evaluierung der Schichteigenschaften der schützenden AlCrON-Deckschicht wurden die tribo-mechanischen und elektrischen Eigenschaften untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen wurden in der Veröffentlichung *Characterization of protective AlCrON thin films for application on sensor thin films in fused layer modeling processes* detailliert beschrieben [10]. Insbesondere der Sauerstoffgehalt (O_2) besitzt einen Einfluss auf die Struktur und Funktionalität der Schichten. Mit zunehmender O_2 -Gasflussrate steigt der O_2 -Anteil innerhalb der Schicht von etwa 12 at.-% bis über 55 at.-%, wodurch eine Umwandlung von einer polykristallinen nitridebasierten Struktur hin zu einer amorphen oxynitridischen bzw. oxidischen Phase erfolgt. Diese strukturelle Veränderung wirkt sich auf die Härte-, Haft- und Reibeigenschaften aus. Die höchste Härte mit rund 38 GPa sowie das maximale Verhältnis von elastischer Dehnung zu Versagen (H/E) wird bei einem Sauerstoffgehalt um 22 At.-% erreicht (siehe Abbildung 51).

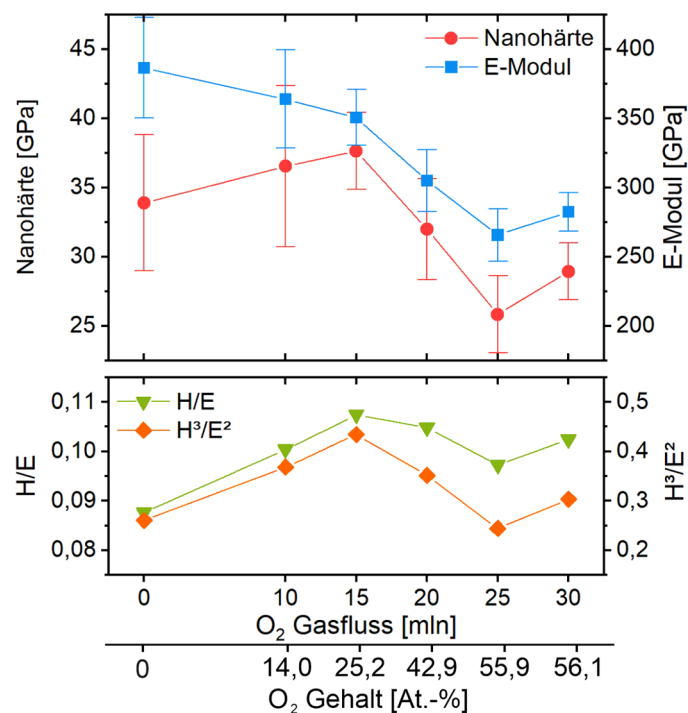


Abbildung 51: Härte H , E-Modul E , H/E und H^3/E^2 der AlCrN und AlCrON Dünnschichten abgeschieden bei verschiedenen O_2 -Gasflüssen/mit unterschiedlichen O_2 -Gehalten

Gleichzeitig zeigt sich hier das günstigste tribologische Verhalten mit einem niedrigen Reibkoeffizienten gegen Polypropylen (PP) und Polyamid (PA), was mit der Polarität der AlCrON und den Kunststoffen begründet werden kann (siehe Abbildung 52). Ein höherer O_2 -Anteil führt zu einer stärkeren Hydrophobisierung der Oberfläche und damit zu größeren Kontaktwinkeln gegenüber Wasser. Dies bewirkt eine geringere Benetzbarkeit durch geschmolzene Kunststoffe und reduziert ihre Adhäsion an der Beschichtung. Gleichzeitig spielt die Polarität des Kunststoffs eine Rolle. Unpolares PP zeigt aufgrund seiner geringen Wechselwirkung mit polarerer Oxidoberflächen niedrigere Reibwerte als polares PA.

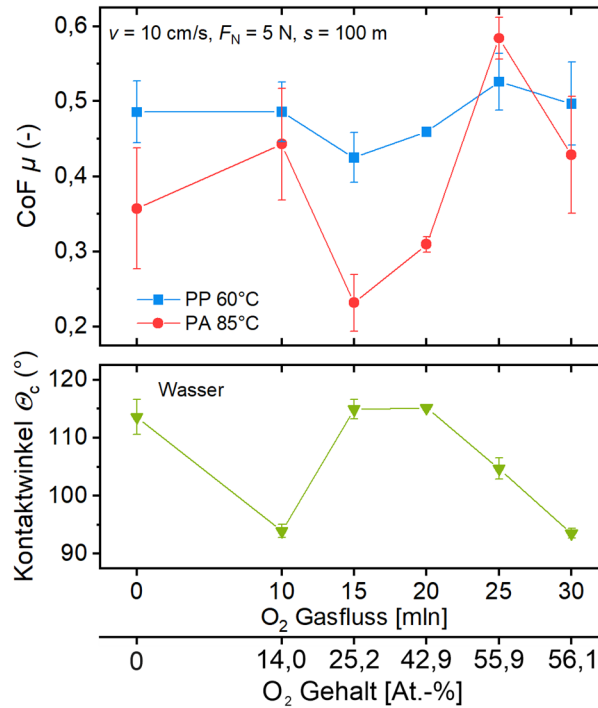


Abbildung 52: Reibkoeffizient μ und Benetzbarkeit der AlCrN und AlCrON Dünnschichten abgeschieden bei verschiedenen O₂-Gasflüssen/mit unterschiedlichen O₂-Gehalten

Mit weiter steigendem O₂-Anteil nimmt die Kristallinität ab, was zu einer erhöhten Sprödigkeit und reduzierter Haftfestigkeit führt. Die Rockwell- und Scratchtests bestätigen jedoch für alle untersuchten Proben eine ausreichende Adhäsion für den industriellen Einsatzbereich. Neben den mechanischen Eigenschaften wurden auch die elektrischen Isoliereigenschaften bewertet. Hier zeigt sich eine deutliche Zunahme des spezifischen Widerstands mit steigender Oxidbildung infolge eines Übergangs zu stärker ionischer Bindung. Dadurch weisen die Schichten bei höherem O₂-Gehalt ausgeprägte Isolationscharakteristika auf. Diese Eigenschaft trägt dazu bei, dass die zweite Al₂O₃-Isolationsschicht wegfallen kann. Insgesamt besitzt die Schicht abgeschieden bei 15 ml/n die vielversprechendsten Eigenschaften und wird für das Schichtsystem ausgewählt.

1.7 Arbeitspaket 7: Labortest und Festigkeitsversuche

Dichtigkeit

Zur Überprüfung der Dichtigkeit der erarbeiteten Hotend-Konzepte wurden alle Varianten mit einer Hydraulikpumpe unter Druck gesetzt und das Hotend auf etwaige Leckagen untersucht. Hierzu wurden die Hotends auf der Heatbreak-Seite über eine geeignete Kupplung an eine Enerpac Hydraulik-Handpumpe angeschlossen und auf der Düsenseite mit einem Blindflansch verschlossen (siehe Abbildung 53). Dabei zeigten sich sowohl die erste Iteration ohne Dichtleisten, als auch die zweite flache Variante mit den Dichtleisten als dauerhaft öldicht bis zu einem angelegten Druck von etwa 150 bar. Innere Leckagen im Hydraulik-Zylinder führten dazu, dass der angelegte Druck nicht konstant gehalten werden konnte, sondern immer wieder wechselnd ein Druck zwischen 140 bar und 160 bar aufgebracht wurde.

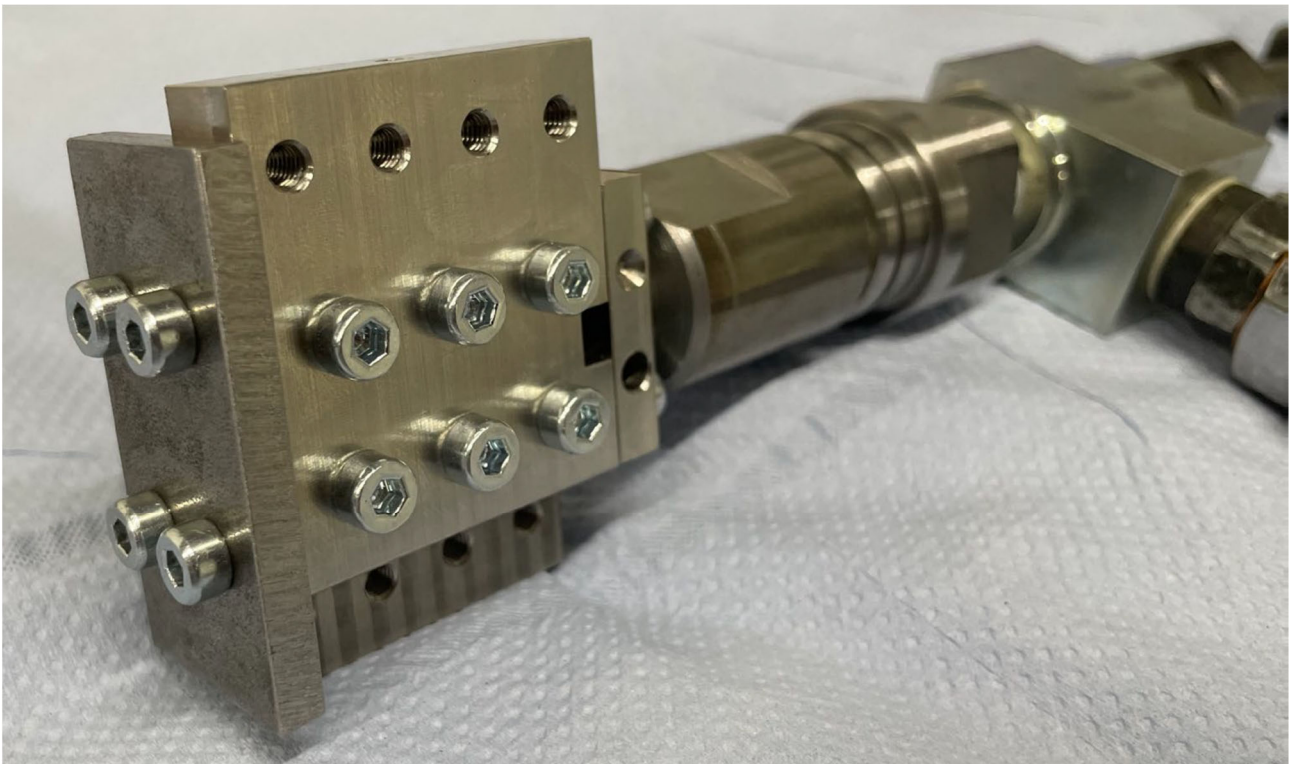


Abbildung 53: Versuchsaufbau zum Testen der Dichtigkeit eines geteilten Hotends

Zur Herstellung der Dichtheit bei den ersten beiden Iterationen des Hotends war ein Zerspanungsschritt im Montageprozess notwendig. Hierdurch wurde gewährleistet, dass die Anschlussflächen zu den Flanschen eben sind und kleinste Fertigungs- und Montagetoleranzen bei den einzelnen Komponenten nicht zu einer strukturierten Oberfläche führen. Auch konnte so die exakte Länge für die eingesetzten Kupferdichtungen erreicht werden. Eine Einbringung von Zylinderstiften, um nach erfolgter Demontage die Bauteile wieder genau zueinander ausrichten zu können, konnte bei einer erneuten Montage keine Dichtheit herbeiführen, weshalb auf das aufwändige Einbringen der Zylinderstifte im weiteren Projektverlauf verzichtet wurde. Exemplarisch ist ein solcher Zerspanungsprozess in der Montage in der folgenden Abbildung 54 zu sehen.

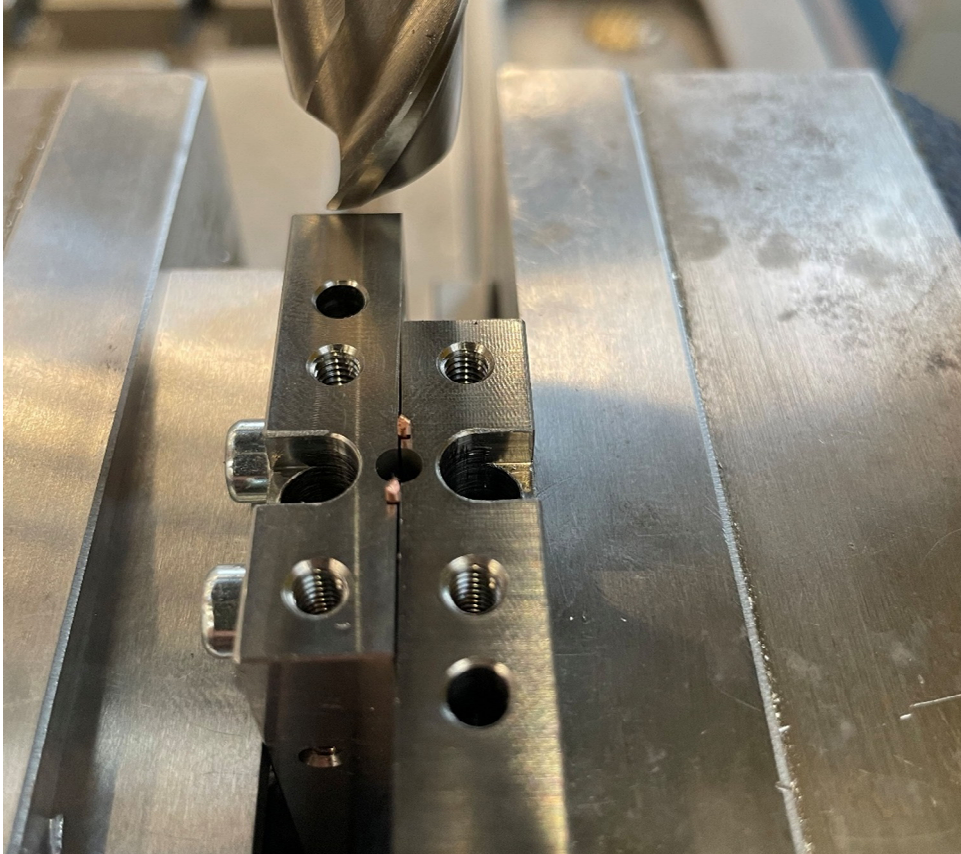


Abbildung 54: Überspannen der Dichtflächen eines Hotends, hierbei wird eine ebene Dichtfläche für den Flansch hergestellt und die Dichtschnüre werden passend eingekürzt

Die dritte Iteration des Hotends mit dem eingelegten T-Stück zeigte sich in den durchgeführten Dichtigkeitsuntersuchungen als nicht leakagefrei. Neben anderen im AP 1 beschriebenen Schwierigkeiten, führte auch dies zu einem Verwerfen des entwickelten Designs.

Die vierte Iteration des Hotends aus Keramik stellte in dieser Reihe eine Besonderheit dar, da die fremdfertigten Keramikhälften nicht wie bisher nachbearbeitet werden konnten. Da aus diesem Grund nicht wie bei der ersten und zweiten Variante eine spangebene Bearbeitung der Dichtflächen möglich ist, musste für diese Variante eine Alternativlösung zur Gewährleistung der Dichtigkeit gefunden werden. Eine erprobte Lösung hierfür war der Einsatz von flüssiger Ofen-Dichtmasse, die bis etwa 300 °C temperaturbeständig ist und dauerelastisch aushärtet. Der Nachteil dieser Dichtmasse im Gegensatz zum bewährten Konzept der Kupferdichtungen war die reduzierte Temperaturbeständigkeit, sodass mit dieser Dichtung keine Hochtemperaturkunststoffe verarbeitet werden können. Auch war die hiermit hergestellte Dichtung theoretisch nicht schädigungsfrei lösbar, sodass eine Demontage etwa zur Untersuchung der Schichten oder zur Behebung einer Verstopfung nicht oder nur erschwert möglich war.

Diese wurde auf allen Dichtflächen aufgebracht, das Hotend verschraubt und anschließend in Betrieb genommen. Es zeigte sich dabei, dass die dünne Schicht der Dichtmasse zwischen allen Teilen zu einer Dichtigkeit des Hotend führt, allerdings die aufbrachte Schicht zwischen den metallischen Dichtleisten und den Funktionsschichten auf dem Keramikhotend zu dünn ist, um eine vollständige elektrische Isolierung der Schichten zu angrenzenden Teilen zu gewährleisten.

Extrusionsversuche

Die Erstinbetriebnahme der ersten Hotend-Iteration noch ohne beschichtete Sensoren und Aktoren ist in der Abbildung 55 (links) zu sehen. Hierbei zeigte sich, dass das Hotend, wie bereits die vorab angestellten Versuche zeigten, dicht ist und erfolgreich Kunststoff, hier PET-G, aufschmelzen und fördern kann. Eine Demontage des Hotends zeigte, dass der Kunststoff in der Trennebene des Hotends nur bis an die Dichtschnur vordringt (Abbildung 55 rechts). Ein analoges Bild zeigte sich auch an den Flanschen mit den Dichtringen. Um den in den Dichtspalt eindringenden Kunststoff weiter zu reduzieren, wurden als Erkenntnis dieser ersten Versuche die Nuten zur Führung der Dichtschnüre konstruktiv noch näher an den Schmelzekanal gebracht.

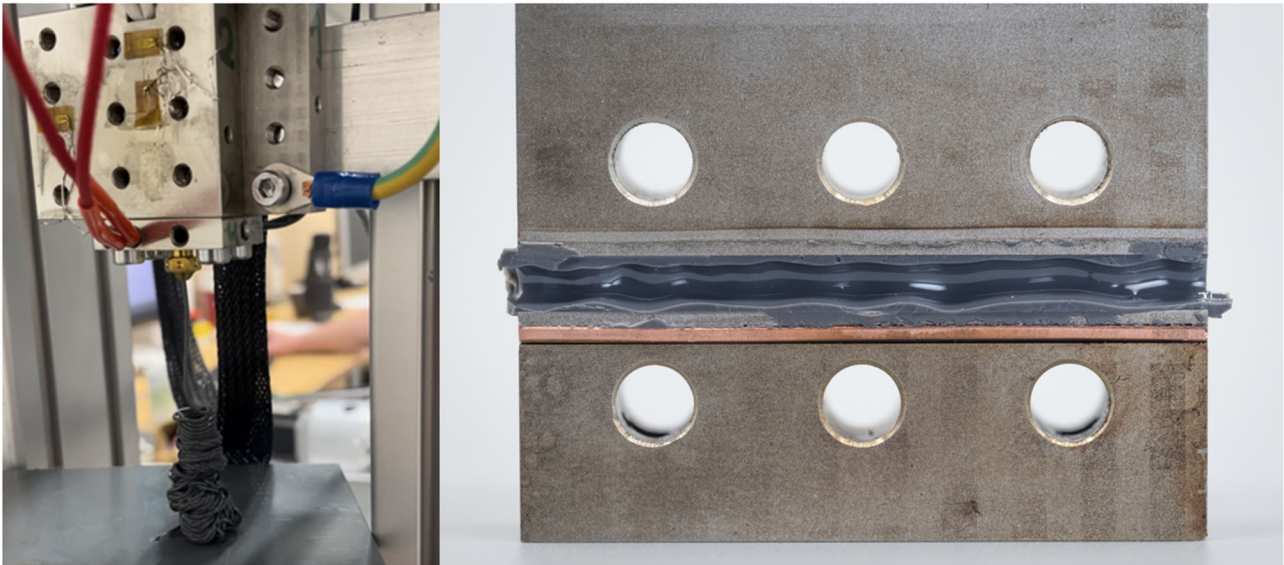


Abbildung 55: Extrusions- und Dichtigkeitsversuche mit einem Hotend der ersten Iteration, links laufender Extrusionsprozess, rechts demontierte Hälfte mit Kunststoffresten und Dichtschnur

Ebenso konnten analoge Extrusionsversuche mit der zweiten Hotend-Variante durchgeführt werden, wo sich zeigte, dass das entwickelte Dichtkonzept für Kunststoffschmelzen dicht ist.

Auffällig war bei beiden Varianten, dass aufgrund der großen Masse der Hotends die Aufheizzeit im Vergleich zu marktüblichen Produkten deutlich länger ist. Eine Isolierung des Hotends zur Umgebungsluft mit Dämmwolle und alternativ mit einem Silikonüberzug konnte die benötigte Aufheizzeit reduzieren und sorgte zusätzlich für eine geringere Schwankung der Temperaturen des Hotends.

Weiter zeigten die Versuche, dass ein Einbringen einer Heizpatrone in den Flansch der Düse bei höheren Extrusionstemperaturen notwendig ist, um die angestrebte Düsentemperatur halten zu können. Auch musste in einigen Versuchen der Flansch der Heatbreak zusätzlich beheizt werden, um den gewünschten, scharfen Temperaturübergang erst in der Heatbreak zu erzeugen (vgl. AP 1). Ursächlich für beide Phänomene ist die nur schwache Wärmeleitung zwischen den Heißkanal-Hälften und den Flanschen über die Kupferdichtscheibe.

Extrusionsversuche mit einem beschichteten Hotend der zweiten Iteration konnten nur kurz durchgeführt werden, da sich bereits nach einmaligem Fördern von Kunststoffschmelze die Funktionsschichten im Hotend lösten und so keine Aufzeichnung von Temperaturen mit dem Thermoelement mehr möglich war. Auch das Bestromen der Heizwendel war infolge der Schichtablösung nicht mehr möglich.

Wie bereits in AP1 beschrieben, konnten aufgrund der nicht herstellbaren Dichtigkeit und der mechanischen Instabilität der keramischen T-Stücke keine umfangreichen Extrusionsversuche mit der dritten Hotend-Variante durchgeführt werden. Grundsätzlich zeigte sich diese dritte Iteration aber durch ihre geringere Masse als besser und schneller erhitzbar, als die beiden vorherigen Versionen. Da die Düse bei dieser Version direkt in den Hotend-Grundkörper eingeschraubt werden konnte, war hier kein zusätzlicher Düsenflansch und somit auch keine weitere Heizpatrone notwendig. Lediglich im Flansch der Heatbreak wurde das bisherige Konzept weiter angewendet. Ein an der Versuchsanlage montiertes Hotend mit Wasserkühlung und einem isolierenden Dämmwoll-Paket ist in der Abbildung 56 zu sehen.

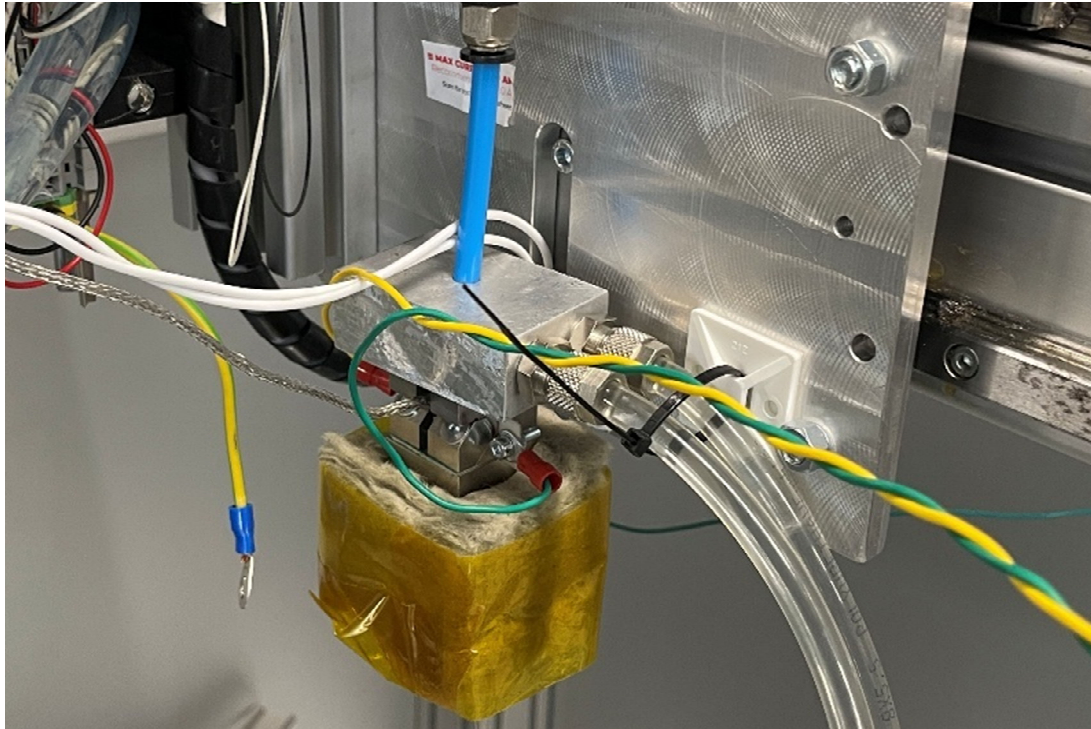


Abbildung 56: Extrusionsversuche mit einem Hotend der dritten Iteration, das keramische T-Stück ist mit einer Heizwendel beschichtet (Bild identisch mit Abbildung 18)

Abschließende Extrusionsversuche wurden mit der vierten Hotend-Variante durchgeführt. Wie bereits bei den Dichtigkeitsversuchen und der konstruktiven Entwicklung des Hotends vorgestellt, war dieses Hotend mit den eingesetzten Papierdichtung nicht dicht (siehe Abbildung 57).

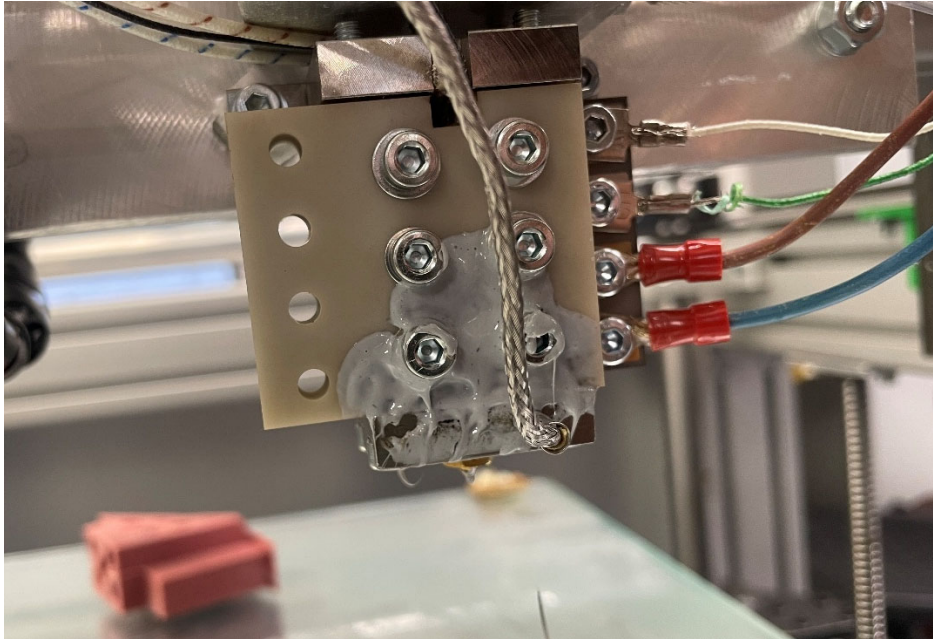


Abbildung 57: Hotend der vierten Iteration mit aufgrund von Undichtigkeiten ausgetretenem Kunststoff

Die Versuche wurden daher bereits nach kurzer Extrusionszeit unterbrochen und das Hotend im Anschluss demontiert. Hierbei zeigte sich, dass sich die aufgetragenen Schichten stellenweise mit dem abgekühlten Kunststoff lösten und die beschichtete Hälfte in der Folge für weitere Versuche unbrauchbar war (siehe Abbildung 58). Auch wurde bei der Demontage deutlich, dass der Kunststoff in die Dichtflächen eingedrungen war und sich die Papierdichtungen durch die hohen Temperaturen versprödeten und teilweise verkohlt waren (Abbildung 59).

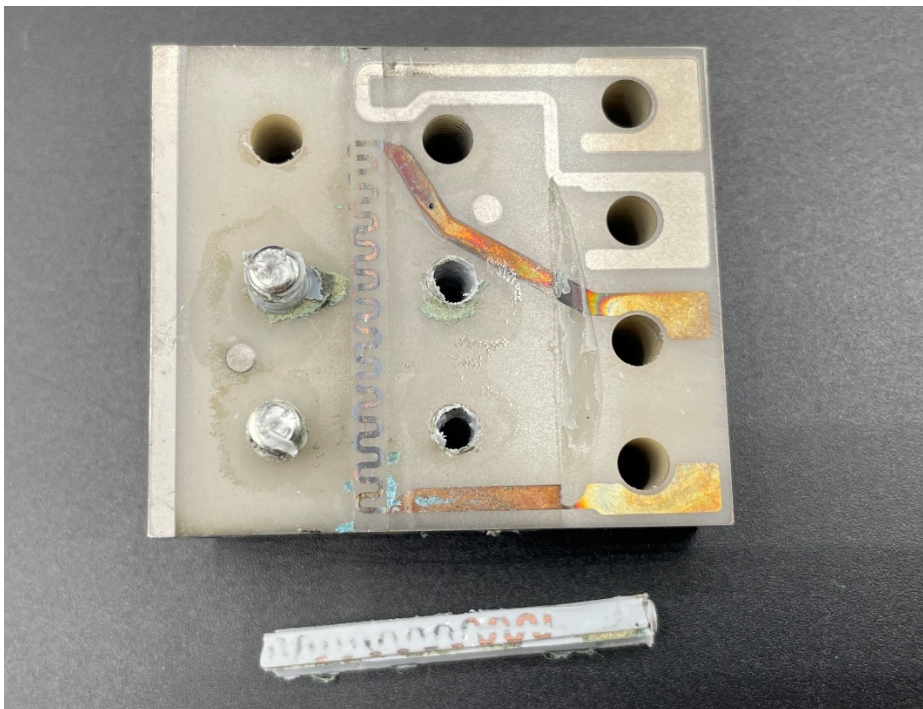


Abbildung 58: Demontierte Hotend-Hälfte mit entnommenem Kunststoffrest aus dem Schmelzkanal. An diesem haften Teile der aufgetragenen Funktionsschicht

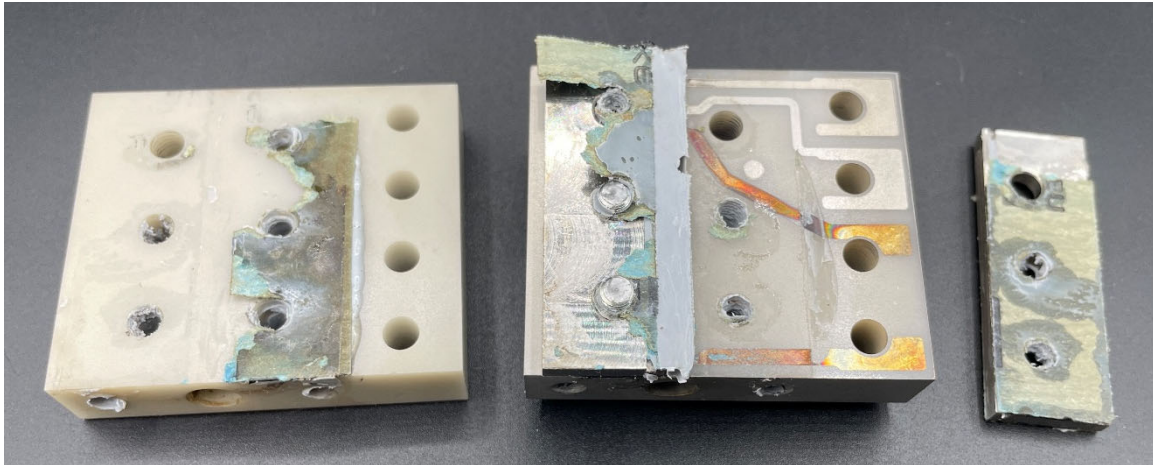


Abbildung 59: Demontiertes Hotend mit verbrannten Papierdichtungen

In der Folge wurde ein weiteres Hotend der vierten Iteration zusammengebaut und die eingesetzte Papierdichtung durch die bereits vorgestellten Silikon-Dichtmasse ersetzt. Dieses Hotend zeigte sich in der Folge als dicht, die aufgetragenen Funktionsschichten konnten allerdings nicht verwendet werden, da der dünne Film der Dichtmasse zwischen den Hälften und den Dichtleisten keine ausreichende elektrische Isolierung herbeiführen konnte. Damit konnte kein vollumfänglich funktionsfähiges Hotend im Rahmen des Projektes hergestellt werden.

In der Einzelbetrachtung konnte ein Dichtkonzept für ein geteiltes Hotend entwickelt werden, wobei die Variante mit den Kupferdichtungen gegenüber der Silikondichtmasse sowohl in der Handhabung als auch in der Dichtheit und der Temperaturbeständigkeit zu bevorzugen ist. Ebenso konnten für sich funktionsfähige Schichten appliziert werden, die über eine geeignete Klemmung kontaktierbar sind. Die hergestellten Thermoelemente und Heizwendeln können entsprechend ihrer Zweckbestimmung eingesetzt werden. In der Kombination ist die praktische Umsetzung von Dichtkonzept und Sensorschichten bei den gegebenen Einsatzbedingungen nicht oder nur eingeschränkt möglich. Für Anwendungsfälle mit weniger anspruchsvollen Randbedingungen ist eine Umsetzung des entwickelten Konzepts grundsätzlich denkbar.

2 Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

- LKP (FGME): Innerhalb des Berichtszeitraums wurden 23,5 PM von wissenschaftlichem Personal für das Projekt aufgewendet. Zusätzlich wurden die Mitarbeiter im Gesamtumfang von 389,5 h (ca. 2,25 PM) von wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften unterstützt.
- LWT: Innerhalb des Berichtszeitraums wurden 20,69 PM von wissenschaftlichem Personal für das Projekt aufgewendet. Zusätzlich wurden die Mitarbeiter im Gesamtumfang von 22.149,94 Euro von wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften unterstützt.

Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

- LKP (FGME): Für Geräte wurden keine nachzuweisenden Kosten aufgewendet.
- LWT: Für Geräte wurden keine nachzuweisenden Kosten aufgewendet.

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

- LKP (FGME): Für Leistungen Dritter wurden keine nachzuweisenden Kosten aufgewendet.
- LWT: Für Leistungen Dritter wurden keine nachzuweisenden Kosten aufgewendet.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Förderantrag vorgesehenen Arbeitsinhalte und -aufwände konnten nach einer kurzen Anlaufphase vollständig umgesetzt werden. Aufgrund der kurzfristigen Bewilligung des Vorhabens war eine vorzeitige Personalrekrutierung nicht möglich, sodass der Projektstart zunächst verzögert erfolgte. Nach erfolgreicher Besetzung der Positionen konnte jedoch zügig mit der systematischen Bearbeitung begonnen werden.

Im Verlauf des Projektes traten einzelne Verzögerungen auf, die insbesondere durch temporäre Ausfälle sowie hohe Auslastung der PVD-Anlagen beim LWT bedingt waren. Dadurch konnte die Herstellung von Proben und Demonstratoren nur eingeschränkt erfolgen. Auch bei den Versuchsaufbauten kam es infolge von Engpässen in der hauseigenen Fertigung des LKP zu zeitlichen Verschiebungen. Diese Herausforderungen wurden im Projektverlauf erfolgreich aufgefangen, sodass alle wesentlichen Untersuchungen planmäßig abgeschlossen werden konnten.

Zur Sicherstellung einer vollständigen Bearbeitung wurde das Forschungsvorhaben um 10 Monate zuwendungsneutral verlängert. In diesem Zeitraum konnten zusätzliche Untersuchungen zur Schichtapplizierung sowie zur Charakterisierung durchgeführt werden, wodurch ein vertieftes Verständnis für die Materialeigenschaften gewonnen wurde. Besonders hervorzuheben ist die Entwicklung und Erprobung einer Hotend-Variante mit Keramikhälften, die sich im Rahmen der abschließenden Tests als technisch vielversprechend erwies.

Die erzielten Ergebnisse liefern wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der Grenzen einer wirtschaftlich sinnvollen Umsetzung beschichteter Hotends unter realistischen Randbedingungen. Es zeigte sich, dass insbesondere die Kosten für keramische Substrate sowie deren begrenzte Einsatztemperaturen bis etwa 250 °C derzeit eine breite Anwendung erschweren. Dennoch konnte demonstriert werden, dass durch präzise Temperaturmessung des Extrudats und eine schnelle Regelung über die Heizwendel deutliche technische Verbesserungen erreichbar sind.

Die enge Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss führte zu einem intensiven fachlichen Austausch und zu innovativen Lösungsansätzen für verschiedene technische Herausforderungen. Auch wenn das entwickelte System in seiner aktuellen Form noch nicht alle angestrebten Anforderungen erfüllt, haben die gewonnenen Erkenntnisse wesentlich zum Verständnis zentraler Prozessparameter beigetragen und bilden eine solide Basis für weiterführende Entwicklungen.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen des Forschungsvorhabens InlineSense konnten umfangreiche wissenschaftlich-technische Erkenntnisse zur Entwicklung, Beschichtung und Funktionsprüfung von Hotend-Komponenten für die additive Fertigung gewonnen werden. Die durchgeführten Arbeiten haben wesentlich zum Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Substratmaterial, Schichtaufbau und Funktionalität sensorisch aktiver Dünnschichten beigetragen. Insbesondere die systematische Untersuchung verschiedener PVD-Schichtsysteme, deren Haftfestigkeit, elektrische Eigenschaften sowie thermische Belastbarkeit unter realen Prozessbedingungen liefern wertvolle Grundlagen für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich funktionaler Beschichtungen.

Die im Projekt entwickelten Verfahren zur Abscheidung von Heizwendeln und Thermoelementen auf metallischen und keramischen Substraten stellen einen innovativen Ansatz dar, um Sensorik direkt in thermisch belastete Komponenten zu integrieren. Durch die Umsetzung funktionsfähiger Dünnschicht-Heizsysteme wurde eine präzise Temperaturregelung im Hotend ermöglicht. Ebenso wurde nachgewiesen, dass Dünnschicht-Thermoelemente auf keramischem Substrat eine hohe Messgenauigkeit sowie schnelle Ansprechzeiten besitzen. Im Projektverlauf zeigte sich jedoch, dass das ursprünglich geplante Konzept eines vollständig geteilten Hotends aufgrund der komplexen Geometrie hohe Anforderungen an Beschichtung, Dichtung und Kontaktierung stellte. Diese Herausforderungen führten zur Entwicklung eines alternativen Ansatzes mit einem keramischen T-Stück als zentralem Heißkanalelement. Das neue Konzept war im ursprünglichen Antrag nicht vorgesehen und stellt eine Erweiterung des Vorhabens dar. Es ermöglichte eine bessere Zugänglichkeit für die PVD-Beschichtung sowie eine präzise Platzierung der Sensorik direkt im Kern der Kunststoffschmelze. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten zur miniaturisierten Temperaturmessung in der Kunststoffverarbeitung und additiven Fertigung. Das T-Stück-Konzept erwies sich zudem als wirtschaftlich vorteilhaft durch seinen modularen Aufbau und den reduzierten Keramikeinsatz gegenüber dem ursprünglichen Design mit zwei großflächigen Hotend-Hälften. Für komplexe Hochtemperaturkomponenten ergibt sich so eine einfachere Fertigung als auch Montage sowie Austauschbarkeit und Wartung. Gleichzeitig bleibt das geteilte Hotend als Forschungsansatz bestehen. Es liefert Erkenntnisse über die Grenzen aktueller PVD-Verfahren bei komplexen Innenkonturen und bildet damit eine Grundlage für zukünftige Arbeiten zur Erweiterung dieser Technologie. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Realisierung einer direkten Druckmessung innerhalb des Schmelzkanals. Trotz der Komplexität der Druckmessung konnten erste vielversprechende Ansätze zur Detektion von Druckänderungen identifiziert werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse liefern einen Ausgangspunkt für künftige Untersuchungen zur Integration robuster Dünnschichtsensoren.

Obwohl das entwickelte System aufgrund relativ hoher Materialkosten derzeit noch nicht unmittelbar industriell einsetzbar ist, bilden die erzielten Ergebnisse eine Grundlage für zukünftige Optimierungen hin zu kostengünstigeren Hotends-Designs, aber auch anderen Werkzeugkomponenten. Die Untersuchungen zeigen, welche technologischen Anpassungen notwendig sind, um die Beschichtung komplexer Mehrschichtsysteme auf verschiedenen Substratmaterialien zu verbessern.

Langfristig tragen die gewonnenen Erkenntnisse dazu bei, neue Produktlösungen im Bereich temperaturgeregelter Extrusionssysteme zu entwickeln und damit Energieeffizienz sowie Prozessstabilität in der additiven Fertigung weiter auszubauen.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der im Forschungsvorhaben InlineSense erzielte Erkenntnisgewinn wurde fortlaufend mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses diskutiert und bewertet. Durch diesen intensiven Austausch konnte sichergestellt werden, dass die entwickelten Konzepte und Versuchsergebnisse anwendungsorientiert ausgelegt sind und den Bedarf der industriellen Praxis widerspiegeln. Dabei konnten sowohl das keramische T-Stück-Konzept als auch die Variante des geteilten Hotends hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und potenziellen Anwendungsperspektive diskutiert werden.

Die im Projekt erarbeiteten Daten zur Haftfestigkeit, Durchschlagfestigkeit und Wärmeausdehnung verschiedener Schichtsysteme bilden eine belastbare Grundlage für zukünftige Entwicklungsarbeiten in der Industrie. Sie ermöglichen eine fundierte Auswahl geeigneter Materialkombinationen für beschichtete Komponenten sowie eine bessere Abschätzung ihrer Einsatzgrenzen unter thermischer Belastung. Darüber hinaus wurden die gewonnenen Erkenntnisse zu Maskierungsstrategien, Kontaktierungskonzepten und Dichtungslösungen so dokumentiert, dass sie von externen Partnern nachvollziehbar angewendet werden können.

Zur Förderung des Transfers wurden zentrale Projektergebnisse über Fachvorträge und Publikationen kommuniziert. Die erzielten Ergebnisse dienten zusätzlich als Grundlage für studentische Forschungsarbeiten sowie Lehrinhalte im Bereich additive Fertigungstechnik.

Einzelne Aspekte, wie der Drucksensor, sollen in Folgeprojekten weiter vertieft werden. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit finden die erforschten Sensoren Potenzial für Anwendungen außerhalb des 3D-Drucks, beispielsweise bei der Überwachung thermisch belasteter Spritzgießwerkzeuge oder Temperiersysteme. So trägt das Forschungsvorhaben dazu bei, innovative Technologien aus der universitären Forschung in industrielle Anwendungen zu überführen.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum/Datum
Information über das Projekt mit Kurzbeschreibung als Flurplakat	Information über Forschungsarbeiten, Gewinnung zusätzlicher PA Mitglieder	Maschinenbaugebäude I TU Dortmund	Seit August 2023
Information über das Projekt mit Kurzbeschreibung im Internetauftritt der Forschungsstellen	Information über die Forschungsarbeiten, Gewinnung zusätzlicher PA Mitglieder	Internetauftritt des LWT und des LKP	Seit 2023
Sitzungen des PA	Die Forschungsergebnisse sollen laufend im PA ausführlich diskutiert werden.	Hybride Meetings für Kick-Off, Vorstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen sowie zum Projektabschluss	09.12.2022 29.11.2023 07.03.2025
Akademische Lehre	Vermittlung der Ergebnisse aus erster Hand an die Studierenden durch die enge Verzahnung von Forschung und Lehre	Betreuung diverser studentischer Arbeiten	2023-2025
Erweiterung des PA	Erweiterung des Feedbacks aus der Wirtschaft sowie Übertragung auf andere Industriezweige	Gewinnung weiterer PAMitglieder durch Kontaktpflege zu ehemaligen Mitarbeitern	2024
Transfer der Ergebnisse in die Industrie über nationale/internationale Fachveranstaltungen	Vorstellung vor einem breiten Fachpublikum	CMCTF2024, San Diego Postervortrag	05.2024
Veröffentlichung in Fachzeitschriften	Intensivierung des Ergebnistransfers durch Verbreitung der Ergebnisse über nationale / internationale Fachzeitschriften	Veröffentlichung in „ <i>Surface and Coatings Technology</i> “	2024

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum/Datum
Austausch mit PA über die Projektlaufzeit hinaus	Maßgeschneiderter Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis	Abschließende PA-Sitzung	Q1 2026

8 Literaturverzeichnis

- [1] Marcel Bartz, Felix Häußler, Fabian Halmos, Markus Ankenbrand, Michael Jüttner, Jewgeni Roudenko, Sven Wirsching, Marcus Reichenberger, Jörg Franke, and Sandro Wartzack. 2023. Use of Printed Sensors to Measure Strain in Rolling Bearings under Isolated Boundary Conditions. *Lubricants* 11, 10, 424. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants11100424>.
- [2] Saskia Biehl, Ole Woitschach, Sebastian Staufenbiel, and Carsten Brill. 2008. Piezo resistive thin film sensor system. In *2008 IEEE Sensors*. IEEE, 1572–1575. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2008.4716749>.
- [3] Long Cheng, Guochun Chen, Chenhe Shao, Guolian Huang, Yuelong Li, Shilong Jia, Zhizhong Guo, Feng Zhou, Longnan Wang, Lida Xu, Songyue Chen, Yuekun Zheng, Daoheng Sun, and Qinnan Chen. 2025. Thin-film strain sensor with temperature compensation for variable temperature environments. *Journal of Alloys and Compounds* 1042, 183812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183812>.
- [4] Hongseok Choi and Xiaochun Li. 2007. Fabrication and application of micro thin film thermocouples for transient temperature measurement in nanosecond pulsed laser micromachining of nickel. *Sensors and Actuators A: Physical* 136, 1, 118–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.01.007>.
- [5] Karl C. Grötzinger, Bernd Ehrenbrecht, Martin Rekowski, and Mathias Liewald. Temperaturmessung in der Kaltmassivumformung mittels Dünnschichtsensorik. In *massivUMFORMUNG*, 44–49.
- [6] Dennis Konopka, Tobias Steppeler, Rico Ottermann, Florian Pape, Folke Dencker, Gerhard Poll, and Marc Wurz. 2023 - 2023. ADVANCEMENTS IN MONITORING OF TRIBOLOGICAL STRESS IN BEARINGS USING THIN-FILM STRAIN GAUGES. In *10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. Dept. of Mechanical Engineering & Aeronautics University of Patras, Patras, 1623–1634. DOI: <https://doi.org/10.7712/150123.9934.443603>.
- [7] Kunststoff-Zentrum Leipzig. 2024. *Kontaktierungen für Dünnschichtheizungen: Kontaktierung im Projekt Thermo-KonSens*, Leipzig.
- [8] Sarangapani Murali, Dhayalan Mariyappan, Turiano A. Advincula, JR, Chong M. J. Hoe, Lim Y. E. Weon, and Kang Sungsig SS. 2024. Fine Gold and Coated-Ag Bonding Wire: Vertical Wire Bonding. *IMAPSource Proceedings 2024*, Symposium. DOI: <https://doi.org/10.4071/001c.129760>.
- [9] D. Pollard, C. Ward, G. Herrmann, and J. Etches. 2017. Filament Temperature Dynamics in Fused Deposition Modelling and Outlook for Control. *Procedia Manufacturing* 11, 536–544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.147>.
- [10] Wolfgang Tillmann, Julia Urbanczyk, Maximilian Sonnhof, Bernd Künne, Michael Mainz, Philipp Bengfort, Hans-Georg Rademacher, and Nelson F. Lopes Dias. 2025. Characterization of protective AlCrON thin films for application on sensor thin films in fused layer modeling processes. *Surface and Coatings Technology* 496, 131649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131649>.