

DISSERTATION

**„Entwicklung und Aufbau von piezoresistiven Sensoren
zur direkten Einbettung in Bauteilen aus Aluminium
während des Gussprozesses“**

von Rico Tiedemann

UNIVERSITÄT BREMEN 2023

DISSERTATION

zum Thema

„Entwicklung und Aufbau von piezoresistiven Sensoren
zur direkten Einbettung in Bauteilen aus Aluminium
während des Gussprozesses“

vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik der



zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Rico Tiedemann, M.Sc.

wohnhaft in Hamburg

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Walter Lang
Zweitgutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Ludger Kempen
Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul
Zweitprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Michael J. Vellekoop

eingereicht am: 25.04.2023

Tag des Promotionskolloquiums: 17.07.2023

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung, dem Aufbau und der Charakterisierung von piezoresistiven Sensoren zur direkten Einbettung in Bauteilen aus Aluminium während des Gussprozesses. Ziel ist die Entwicklung eines piezoresistiven Sensors auf einem Substrat aus Aluminium. Der Sensor soll zwischen Temperatur und Dehnung unterscheiden.

Zunächst wurden reine Dickschichtsensoren auf Substraten aus Aluminium hergestellt und untersucht. Die Sensoren sind im Versuch in der Lage, das Versagen der Gussmatrix frühzeitig zu messen. Die Widerstände und Temperaturkoeffizienten der eingebetteten Dickschichtsensoren sind jedoch nicht reproduzierbar und weisen eine große Streuung auf. Aus den Ergebnissen der untersuchten Dickschichtsensoren im Druck- und Kokillenguss wurde abgeleitet, dass ein höherschmelzendes Sensorelement für die Sensoren benötigt wird.

Die hierfür entwickelte Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht vereint die robusten thermo-mechanisch stabilen Dickschichten mit den reproduzierbaren hochtemperaturfesten Dünnschichten für das piezoresistive Sensorelement. Dazu wurden die bereits etablierten Prozesse für die Isolation und Leiterbahn des Sensors aus Dickschicht als Basis für einen Sensor genutzt. Anschließend wurde auf der Dickschicht-Basis aus Isolation und Leiterbahn auf einem Substrat aus Aluminium ein Lift-off-Verfahren zur Strukturierung von PVD-Metallisierungen entwickelt. Die Dünnschicht wird abschließend durch eine weitere Dickschicht-Isolation vor der Schmelze geschützt. Mit der entwickelten Technologiekombination weisen Sensoren im Anschluss an den Gussprozess eine geringe Streuung auf und sind reproduzierbar.

Um eine Trennung zwischen Temperatur und Dehnung zu erreichen, wurde das Konzept eines 2-Metall-Sensors genutzt. Mit zwei Sensorelementen aus unterschiedlichen Materialien in unmittelbarer Nähe zueinander, können Dehnung und Temperatur aus den Widerständen errechnet werden. Hierzu wurde Gold als weiteres Element neben dem erprobten Platin verwendet; beide mit einer Haftsicht aus Titan. Die Sensoren sind vor der Einbettung in der Lage Temperatur und Dehnung zu trennen. Eine Einbettung dieser Sensoren erfolgte nicht mehr, da die Druckgussmaschine nicht zur Verfügung stand.

In Zusammenarbeit mit der Forschergruppe um Eric McDonald wurden piezoresistive Dickschichtsensoren auf Substraten aus Stahl hergestellt und im Verfahren des Laserauftragsschweißens in Stahl eingebettet. Sowohl das Bauteil in Form einer Zugprobe als auch das Substrat sind dabei im Laserauftragsschweißen generiert worden. Mit den eingebetteten Sensoren kann Dehnung gemessen werden.

Abstract

The presented work deals with the development, design and characterization of piezoresistive sensors for direct embedding in components made of aluminum during the casting process. The aim is to develop a piezoresistive sensor on a substrate made of aluminum. The sensor is to distinguish between temperature and strain.

Initially, pure thick film sensors were produced and investigated on substrates made of aluminum. In experiments, the sensors are able to measure the failure of the cast matrix at an early stage. However, the resistances and the temperature coefficient of the embedded thick film sensors are not reproducible and show a large deviation. From the results of the investigated thick-film sensors in high pressure die casting and permanent mold casting, it was deduced that a higher melting point of the sensor element is required for the sensors.

The technology combination of thin and thick film developed for this purpose combines the robust thermo-mechanically stable thick films with the reproducible high-temperature resistant thin films for the piezoresistive sensor element. For this purpose, the processes already proven for the insulation and conductive path of the sensor made of thick film were used as the basis for a sensor. Subsequently, a lift-off process for patterning PVD metallizations was developed on the thick film base of insulation and conductive path on a substrate made of aluminum. The thin film is finally protected from the metal cast by another thick film insulation. With the developed technology fusion, sensors exhibit low deviation following the casting process and are reproducible.

To achieve a separation between temperature and strain, the concept of a 2-metal-sensor was applied. With two sensor elements made of different materials in close proximity to each other, strain and temperature can be calculated from the resistances. For this purpose, gold was used as another element in addition to the proven platinum, both with an adhesive layer of titanium. Before embedding, the sensors are able to distinguish temperature from strain. The sensors were not embedded, because the die-casting machine was not available.

In collaboration with Eric McDonald's research group, piezoresistive thick-film sensors were fabricated on substrates made of steel and embedded in steel using the laser cladding process. Both the component in the form of a tensile specimen and the substrate were generated in the laser cladding process. Strain can be measured with the embedded sensors.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Motivation.....	1
1.2.	Sensorintegration	2
1.3.	Stand der Forschung (Sensorintegration in Metalle).....	3
1.4.	Ziele der Arbeit.....	8
2.	Theoretische Grundlagen	10
2.1.	Dehnung von Bauteilen	10
2.2.	Piezoresistiver Effekt.....	11
2.3.	Thermoresistiver Effekt und dessen Kompensation.....	13
2.4.	Arten von Dehnungsmessstreifen.....	17
2.4.1.	Folien-DMS.....	17
2.4.2.	Dickschicht-DMS	17
2.4.3.	Dünnschicht-DMS.....	18
2.4.4.	Silizium-DMS	19
2.5.	Grundlagen der Schichtaufbringung	19
2.6.	Dünnschichten auf Substraten aus Aluminium unter dem Einfluss des CTE	22
2.7.	Verfahren zur Strukturierung	24
3.	Versuchsumfeld und gießtechnische Integration	26
3.1.	Verfahren zur Einbettung von Sensoren im Aluminiumguss	26
3.2.	Kokillenguss.....	26
3.3.	Druckguss	28
3.4.	Aluminiumlegierungen.....	30
3.5.	Mechanische und thermische Einflüsse.....	31
3.6.	Anbindung der Sensoren an die Gussmatrix durch Stoffschluss.....	32
3.7.	Anbindung durch Formschluss	33
4.	Dickschichtsensoren auf Substraten aus Aluminium	36
4.1.	Vorversuche.....	36
4.2.	Genereller Aufbau	36
4.3.	Herstellung der Sensoren.....	37
4.3.1.	Ablauf zur Sensorherstellung.....	37
4.3.2.	Siebdruck.....	38
4.3.3.	Trocknung.....	39
4.3.4.	Sinterprozess.....	40
4.4.	Sensordesign und Zusammensetzung	42
4.4.1.	Widerstandselement.....	42
4.4.2.	Leiterbahn.....	43
4.4.3.	Entwicklungsstufen	44

4.4.4.	Zusammensetzung der Dickschichtpasten.....	45
4.5.	Sensorcharakterisierung	46
4.5.1.	Widerstandsänderung durch Einbettung	46
4.5.2.	Temperatur	47
4.5.3.	Brucherkennung mit eingebettetem Sensor	48
4.6.	Der Effekt des Fremdkörpers	51
4.7.	Halbautomatischer Siebdruck.....	54
5.	Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht.....	56
5.1.	Temperaturstabiles Sensorelement.....	56
5.2.	Sensordesign	56
5.3.	Herstellung der Sensoren.....	58
5.4.	Materialauswahl und Strukturierung des DMS.....	59
5.5.	Topisolation.....	61
5.5.1.	Fertigungsparameter im Überblick	62
5.6.	Einbettung im Kokillenguss	63
5.7.	Sensorcharakterisierung	66
5.7.1.	Nach der Einbettung	67
5.8.	Temperaturkompensation durch 2-Metall-Sensor.....	69
5.8.1.	Design und Aufbau	69
5.8.2.	Messung Klimakammer	71
5.8.3.	Erste Lastwechsel und die Ermittlung der K-Faktoren.....	72
5.8.4.	Auswertung der Lastwechsel mit 2-Metall Sensor Modell	73
5.8.5.	Lastwechsel-Versuche unter dem Einfluss von Temperatur.....	75
6.	Sensoren auf Substraten aus Stahl	80
6.1.	Pulverauftragsschweißen	80
6.2.	Konzept zur Einbettung in Stahl	81
6.3.	Verwendete Dickschichtpasten.....	82
6.4.	Sensordesign und Herstellung	83
6.5.	Einbettung im Pulverauftragsschweißen.....	84
6.6.	Sensorcharakterisierung	86
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	89
7.1.	Zusammenfassung der Ergebnisse	89
7.2.	Ausblick.....	90
	Literaturverzeichnis	93
	Anhang A – Programmcode zum Modell	98
	Tabellenverzeichnis.....	99
	Abbildungsverzeichnis.....	100
	Eigene Veröffentlichungen	104

Studentische Arbeiten im Rahmen der Dissertation.....	105
Danksagung	106

1. Einleitung

1.1. Motivation

Traditionell werden Bauteile während der Konstruktion auf den jeweiligen Anwendungsfall ausgelegt und mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Während der Lebensdauer des Bauteils wird oftmals keine Überwachung der Struktur vorgenommen. Fahrzeuge hingegen werden jährlich optisch und Flugzeuge nach einer gewissen Anzahl an Betriebsstunden, Flügen oder bei der Überschreitung einer maximalen Zeit ausgehend von der letzten Prüfung kontrolliert. Durch Digitalisierung können große Mengen von Informationen preiswert erfasst, verarbeitet und versendet werden; dies ermöglicht den zunehmenden Einsatz von Sensoren bei der Überwachung von Bauteilen und Maschinen.

Durch den Einsatz von optischen Sensoren zum Beispiel in automatischen Fräsmaschinen kann die Abnutzung der Werkzeuge vor jeder Zerspanung ermittelt werden, um die optimale Zustellung des Werkzeuges zum Werkstück zu ermöglichen. Zunehmend wird jedoch nicht nur das Werkzeug überwacht, sondern auch die Maschine und ihre Bauteile selbst. Durch die Überwachung relevanter Bauteile im Betrieb findet der Übergang einer schadensbezogenen Reparatur hin zu einer vorausschauenden Wartung statt. Sensordaten werden genutzt, um das Versagen eines Bauteils wie einer Linearführung durch Messdaten vorherzusagen. Wird das Versagen einer Linearführung rechtzeitig erkannt, kann die Verfügbarkeit der Maschine in einer laufenden Produktion erhöht werden.

Durch die sensorische Überwachung von sicherheitskritischen Bauteilen an Flugzeugen könnten die Wartungsintervalle verlängert und Beschädigungen frühzeitiger erkannt werden. Geringere Standzeiten bieten außerdem einen wirtschaftlichen Anreiz zur zunehmenden Überwachung. Mit ausreichend Informationen kann der Zustand eines Bauteils in Echtzeit erfasst werden. Dehnungsmessstreifen (DMS) eignen sich zur Erfassung elastischer und plastischer Dehnung. Im Gegensatz zu piezoelektrischen Sensoren kann durch eine absolute Erfassung der Dehnung mittels piezoresistivem DMS ein Defekt von Bauteilen in Form von plastischer Verformung jederzeit erfasst werden, unabhängig davon, ob der Moment des Schadens aufgezeichnet wurde. Werden zum Beispiel DMS in die Hinterradschwinge eines Motorrades integriert, kann die Fahrzeugelektronik das Versagen des Bauteils frühzeitig erkennen und den Fahrer vor einem Unfall bewahren, auch wenn der Schaden während der Standzeit entstanden ist. Dies ist ein großer Vorteil der Überwachung in Echtzeit gegenüber der jährlichen optischen Kontrolle, da die strukturelle Integrität sofort erkannt werden kann. Langfristig können aktiv überwachte Bauteile mit einem geringeren Sicherheitsfaktor beaufschlagt werden. Durch Gewichtsreduktion können Ressourcen bei der Herstellung und bei mobilen Anwendungen auch im Betrieb von Bauteilen eingespart werden.

1.2. Sensorintegration

Um den Zustand eines Bauteils zu erfassen, können Sensoren auf der Oberfläche des Bauteils angebracht oder in das Bauteil integriert werden. Externe Sensoren sind auf die Anbringung an der Oberfläche limitiert und den Umwelteinflüssen während der Nutzung ausgesetzt. Dazu gehören unter anderem Steinschlag, Salzwasser und schnelle Temperaturschwankungen. Klassische Folien-Dehnungsmessstreifen werden auf der Oberfläche mit einem Kleber aufgeklebt und je nach Einsatzgebiet aufwendig vor den Umwelteinflüssen durch Schutzschichten gekapselt. Diese aufwendige und kostenintensive Überwachung wird daher oftmals nur in der Forschung und Entwicklung neuer Bauteile wie z. B. einer Hinterradschwinge angewendet.

Zur Montage der Sensoren müssen sowohl die Oberfläche des Bauteils als auch der DMS selbst frei von Verunreinigungen und Fett sein. Die Oberfläche des Bauteils muss je nach verwendetem Kleber angeraut werden, um eine optimale Haftung zu gewährleisten. Die Klebstoffe haften durch Adhäsion und Kohäsion. In den Randbereichen zwischen Bauteil und Klebstoff sowie zwischen Klebstoff und DMS ist die Adhäsion entscheidend, welche die Verformungen unverändert weitergibt. Im kohäsiven Bereich muss ein Klebstoff gewählt werden, welcher der Anwendung des DMS entspricht. Sollen kleine Dehnungen gemessen werden, so wird ein Klebstoff mit hohem E-Modul zur Weitergabe der Dehnung an den DMS gewählt. Bei großen zu messenden Dehnungen muss ein weicherer, nicht spröder Klebstoff gewählt werden. Idealerweise nimmt der Klebstoff keine Feuchtigkeit auf, außerdem ist der Klebstoff kriech- und hysteresefrei. Eine Hinterradschwinge müsste an den entsprechenden Stellen der DMS Montage gereinigt und der Klebstoff inkl. DMS aufgebracht werden. Anschließend müssen die aufgeklebten DMS inkl. elektrischer Leitungen vor Salzwasser und Steinschlag durch eine weitere Schicht geschützt werden.

Ein auf der Oberfläche eines Bauteils aufgebrachter Sensor kann nur lokal auf der Oberfläche Dehnung erfassen. Um den Belastungszustand an einem bestimmten Punkt im Material zu erfahren, müssen mechanische Modelle eingesetzt werden. Eine Möglichkeit, die Sensoren von der Oberfläche in das Material unter die Oberfläche zu versetzen, besteht in der Sensorintegration während der Bauteilherstellung im Gussprozess. Integrierte Sensoren können oberflächennah oder mittig im Bauteil platziert werden, abhängig davon, wo im Material der Belastungszustand des Bauteils erfasst werden soll. Ein im Bauteil integrierter Sensor ist durch die Außenhaut des Bauteils selbst vor Umwelteinflüssen wie Steinschlag oder Salzwasser geschützt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit der Sensorintegration in Metalle. Der Fokus liegt auf der gießtechnischen Integration piezoresistiver Sensoren in Bauteilen aus

Aluminiumguss. Die gießtechnische Integration in Metalle stellt besonders hohe mechanische und thermische Anforderungen an Sensoren. Bei der Integration im Aluminiumguss sind die Sensoren der Temperatur der Aluminiumschmelze von ca. 700 °C ausgesetzt. Außerdem weist Aluminium einen hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf, welcher zu mechanischen Spannungen beim Abkühlen der Gussmatrix führen kann. Während ein piezoresistiver DMS in einem elektrisch isolierenden Material aus wenigstens einer Zuleitung sowie einem Mäander besteht, wird für die Einbettung in eine elektrisch leitfähige Matrix eine zusätzliche elektrische Isolation zum umgebenden Metall oder Substrat benötigt. Jede zusätzliche Schicht steigert die Komplexität eines Sensors und bringt weitere Prozesse während der Herstellung sowie eventuell zusätzliche Haftsichten mit sich. Im folgenden Kapitel wird der Stand der Forschung zur Sensorintegration in Metalle im weiteren Umfeld dargestellt sowie die Nutzung metallischer Substrate für Sensoren erläutert.

1.3. Stand der Forschung (Sensorintegration in Metalle)

Zur Erfassung von Dehnung wurde von Li et al. eine modifizierte Glasfaser in Form eines Faser-Bragg-Gitters in eine Probe aus Stahl integriert. Dazu wurde die Glasfaser mit 100 nm Titan als Haftsicht sowie einer 150 nm dicken Schicht aus Nickel versehen. Das Substrat als untere Hälfte des Bauteils wird durch Sandstrahlen aufgeraut. Die Glasfaser wurde auf der unteren Hälfte des Bauteils befestigt und mit einer 1 mm dicken Schicht aus galvanisiertem Nickel überzogen. Anschließend konnte Stahl im Verfahren des Pulverauftragsschweißens aufgetragen werden. In Abbildung 1 ist der Aufbau des Sensors dargestellt [1].

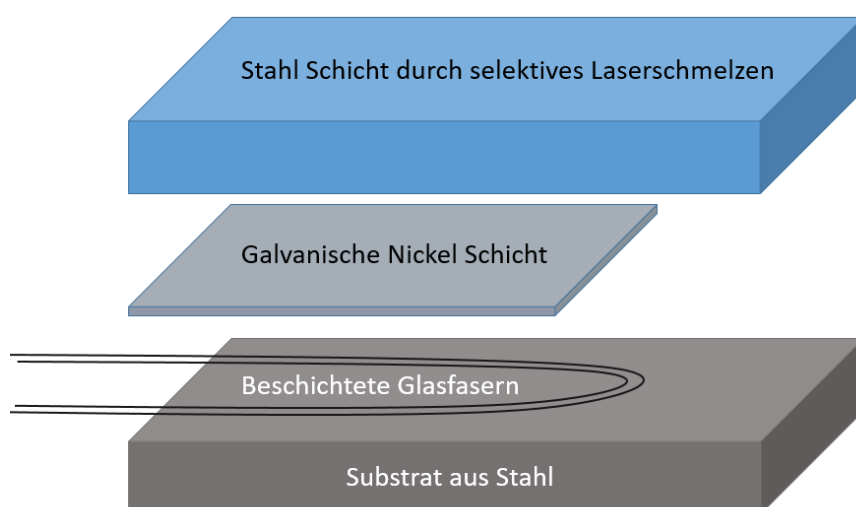


Abbildung 1: Explosionszeichnung der Einbettung einer Glasfaser in Stahl, in Anlehnung an [1]

Die von Li genannten Nachteile dieser Methode sind die geringe Haftung zwischen der Schicht aus Nickel und dem aufgetragenen Stahl sowie die mechanische Beschädigung der Glasfaser in Form von Rissen durch thermischen Stress während des Laserauftragsschweißens. Des Weiteren stellt der Ein- und Austritt der Glasfaser aus dem Metall eine Schwachstelle dar. In weiteren Versuchen wurde die Glasfaser aus Siliziumdioxid durch eine hitzebeständigere Faser aus Saphir ersetzt. Die Saphir-Faser sollte durch einen Sinterprozess bei 1300 °C in Aluminiumoxid eingebettet werden. Während der Abkühlphase im Anschluss an den Sinterprozess wurde die Faser jedoch durch thermisch induzierten Stress zerstört.

Der erste optische Sensor in Form eines Interferometers wurde 1991 von Lee et al. im Aluminiumguss eingebettet, dazu wurden am Ein- und Austritt der optischen Faser aus der Metallmatrix Stahlhülsen verwendet, um die mechanische Belastung während des Abkühlens der Gussmatrix zu verringern. Mit den eingebetteten Sensoren konnten sowohl die Temperatur im Bauteil als auch Ultraschallwellen von der Bauteiloberfläche gemessen werden [2].

Kobiliska zeigt erste Ergebnisse zur gießtechnischen Einbettung von Thermoelementen in Aluminiumguss. Als Grundlage wurden Substrate aus 3,8 mm dickem Stahl verwendet. Das Dünnschicht Thermoelement wird durch ein 2 µm dickes Schichtpaket bestehend aus 0,5 µm Aluminiumoxid, 1 µm Siliziumnitrid sowie erneut 0,5 µm Aluminiumoxid elektrisch isoliert. Dieses Schichtpaket zur elektrischen Isolation wird über eine 50 nm dicke Haftschrift aus Titan mit dem Substrat verbunden. Eine weitere Haftschrift wird auf der oberen Seite des Sensors verwendet und mit einer 150 nm dicken PVD-Nickel Schicht erweitert. Auf diese Schicht aus Nickel folgt eine weitere 300 µm dicke Schicht aus galvanischem Nickel. In Abbildung 2 ist der Sensor dargestellt. Zwei von sechs Sensoren haben die Einbettung im Kokillenguss überstanden, die anderen Sensoren sind durch thermischen und/oder mechanischen Stress während der Formfüllung und Abkühlung zerstört worden [3, 4, 5].

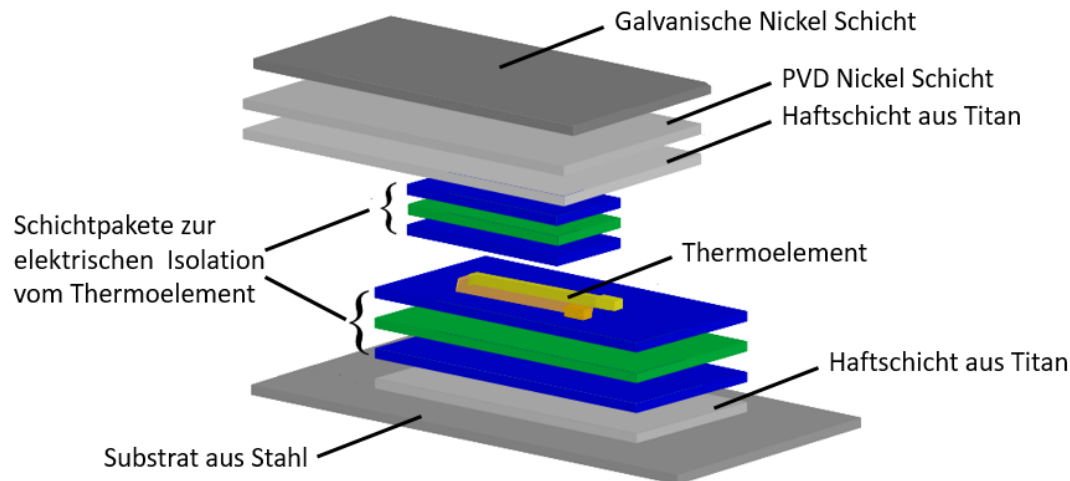


Abbildung 2: Explosionszeichnung des eingebetteten Thermoelements, in Anlehnung an [4] © 2006 IEEE

Einen anderen Ansatz verfolgt die schwedische Forschergruppe um Raul Carlsson. Die Forscher möchten Dehnung, Temperatur, Scherkräfte und Vibrationen in Bauteilen aus Eisen und Aluminium erfassen. Dazu wird ein Metalldraht aus Wolfram oder Titan in die Gussform gelegt, welcher zu beiden Seiten aus der Kokille ragt. Nach der Einbettung im Kokillenguss wird ein Ende des Drahtes mit mechanischen Schwingungen angeregt. Am anderen Ende des Drahtes wurde die Amplitude gemessen. Wird das Bauteil mechanisch belastet, verändert sich die gemessene Amplitude je nach mechanischer Belastung. Erste Messungen mit einem absichtlich unterbrochenen Draht zeigten, dass eine mechanische Belastung des Bauteils eine Änderung der Resonanzfrequenz verursacht. Dadurch kann die mechanische Belastung des Bauteils aus der Resonanzfrequenz bestimmt werden. Ob mit dieser Methode eine präzise Dehnungsmessung an einem vorher festgelegten Punkt im Material möglich ist, wird nicht diskutiert [6, 7, 8, 9].

Thermogenerator

Ibragimov hat 2011 einen Thermogenerator vorgestellt, welcher im Aluminium Druckguss eingebettet werden kann. Der Thermogenerator wurde auf einem Silizium Wafer hergestellt und anschließend anodisch auf einen 500 µm starken Borosilikatglas Wafer gebondet. Das amorphe Borosilikatglas übersteht den Prozess der Einbettung, insbesondere während der Abkühlung, besser als kristallines Silizium. Der Thermogenerator wurde auf der einen Seite durch das Substrat aus Borosilikatglas geschützt. Auf der anderen Seite wird der Thermogenerator durch den auf ca. 40 µm Dicke geätzten Silizium Wafer sowie eine weitere 40 µm starke Dickschicht aus Glas geschützt [10, 11].

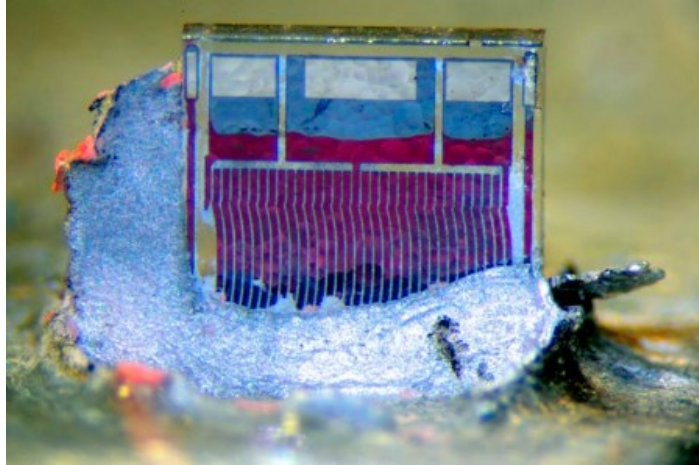


Abbildung 3: Thermogenerator auf einem Substrat aus Borosilikatglas [11] © 2012 IEEE

Einbettung piezoelektrischer Keramik

Die Arbeitsgruppe um Singer hat sich mit der Integration piezoelektrischer Sensoren im Aluminiumdruckguss beschäftigt. Gegen den thermischen Schock während der Einbettung wurden die Sensoren mit einer Schutzfolie aus Polyimid ummantelt. Zur Positionierung des Sensors innerhalb der Gussform wurde eine Gitterdraht-Stützstruktur aus 99,5 % Aluminium verwendet. Durch unterschiedliche Drahtstärken der Stützstruktur zu beiden Seiten der Kammerwand erfolgte die Feinpositionierung. Die Sensoren wurden durch die geringe Materialstärke des Bauteils einer geringen thermischen Last während der Integration ausgesetzt. Im Anschluss an die Integration waren die piezoelektrischen Sensoren intakt und konnten mechanische Belastung in ein elektrisches Signal umwandeln. Durch die Simulation des Gussprozesses konnte ein möglicher Mechanismus zur Schädigung der Keramik identifiziert werden. Die Zeit zur Formfüllung im Druckguss beträgt insgesamt 25 ms. Während 4 ms dieser Zeit ist das Volumen auf der gröberen Stützstruktur-Seite der Kammer bereits ausgefüllt, wohingegen das Volumen der feinmaschigeren dünneren Stützstruktur noch nicht vollständig mit Schmelze gefüllt ist. In dieser kurzen Zeit besteht eine Druckdifferenz, die zur Schädigung der Piezokeramik führen kann [12, 13, 14, 15].

C. Pille hat an der Einbettung von RFID-Transpondern (engl. „Radio-Frequency Identification“ - RFID) sowie piezoelektrischen Sensoren im Aluminium- und Zink-Druckguss gearbeitet. Die Transponder werden genutzt, um eine eindeutige Identifizierung der Bauteile zu ermöglichen. Die äußere Glashülle des Transponders wurde zusätzlich mit einem Polymer ummantelt, welches gleichzeitig auch zur Halterung in der Gussform eingesetzt wird. In die Kurbel für ein Fahrrad wurden piezoelektrische Sensoren eingebettet. Die Sensoren wurden zur Aufnahme von Last eingesetzt. Um Druckbelastung zu messen, wurden die Enden der zylindrischen Sensoren dem Druckguss ausgesetzt, während die

Seiten mit Polymer vor der Schmelze geschützt wurden. Für den Druckguss der Kurbel wurde eine AlSi9Cu3 Legierung verwendet [16, 17].

In weiteren Versuchen wurden piezoresistive Sensoren auf 1 mm dicken Substraten aus Stahl im Aluminium-Druckguss eingebettet. Dazu wurde eine piezoresistive diamantähnliche Kohlenstoffschicht (engl. „diamond like carbon“ – DLC) auf dem Stahlsubstrat aufgebracht und über eine strukturierte Schicht aus Chrom kontaktiert. Die elektrische Isolation erfolgte mit einer anderen DLC-Schicht, welcher Silizium und Sauerstoff zugesetzt wird. Der Sensor ist insgesamt 10 µm dick. Für den Druckguss wurde eine AlSi9MgMn Legierung bei 710 °C verwendet. Durch die Einbettung im Druckguss verringert sich der Ausgangswiderstand um ca. 85 %; die Sensitivität verringert sich durch die Einbettung jedoch nicht [18].

Signalübertragung

Eine Forschergruppe um Tseng arbeitet an drahtlosen Energie- und Datentransportsystemen in Metallen. Dafür wird eine nieder-schmelzende Legierung aus einem Indium-Bismut-Eutektikum mit einem Schmelzpunkt von 79 °C genutzt, um die verwendete Elektronik der eingebetteten Sensorsysteme nicht zu beschädigen. Die Gruppe hat gezeigt, dass der Energie- und Datentransport mit Ultraschallwellen durch solides Metall möglich ist. Durch die sukzessive Weiterentwicklung dieser Übertragungstechnik können die Sensoren auf lange Sicht vollständig in das Material integriert werden, ohne elektrische Leitungen an den Bauteilrand legen zu müssen [19].

Metall als Substrat

Ein Sensor in Dünnschichttechnik auf einem Stahlsubstrat zur Integration in die Zylinderwand von Dieselmotoren wurde von Bödecker 2011 vorgestellt. Dieser Sensor misst den Abrieb der Zylinderwand und kann in eine Bohrung in der Zylinderwand integriert werden. Für den Sensor wurden 5 µm Siliziumnitrid als Isolation zum Stahlsubstrat verwendet. Die Struktur zur Verschleißmessung besteht aus einer 200 nm Legierung aus 90 % Wolfram und 10 % Titan. Der Widerstand der Struktur, welche als Schleife aufgebaut ist, steigt mit zunehmendem Verschleiß. Als obere Isolation dient eine weitere 5 µm starke Schicht aus Siliziumnitrid [20].

Sama und Dumstorff haben Dünnschicht DMS auf 42CrMo4 Stahl aufgebracht, um auftretende mechanische Kräfte von Schleifprozessen zu erfassen. Dazu wurden 2 mm dicke Stahlplatten aus Ronden von 150 mm Durchmesser geschnitten. Um Dünnschichttechnik zur Sensorherstellung verwenden zu können, wurde die Oberfläche vom Stahl durch Läppen und Polieren geglättet. Mit einer 50 nm Haftschiicht aus Titan, einer 200 nm Schicht aus Aluminiumoxid zur elektrischen Isolation und einem 900 nm dicken Mäander aus Aluminium konnten Sensoren auf Stahl hergestellt werden. Für Temperaturen

unterhalb von 100 °C konnte auch eine 1 µm dicke Schicht aus SU-8 Fotolack zur elektrischen Isolation zum Stahlsubstrat verwendet werden [21, 22].

Lei hat Thermoelemente und DMS mit Schattenmasken direkt während der Abscheidung auf einer Turbinenschaufel strukturiert. Die Turbinenschaufel besteht aus einer Nickellegierung und wird mit einer 120 µm NiCrAlY Nickel Chrom Aluminium Yttrium Schicht im Sputterverfahren bedeckt, welche nach einer Wärmebehandlung bei 1100 °C zu Aluminiumoxid umgewandelt wird. Anschließend folgt eine ca. 6 µm Schicht Aluminiumoxid, welche bei 800 bis 900 °C Substrattemperatur im Sputterverfahren oder durch Elektronenstrahl-Verdampfen aufgebracht wird. Die erhöhte Temperatur während der Beschichtung führt zu einer erhöhten Mobilität der Atome und ermöglicht eine elektrisch isolierende Schicht. Auf dieser Aluminiumoxidschicht wurden 5 µm dicke Thermoelemente aus Platin und Pt13Rhodium bei 400 °C Substrattemperatur mit einer Schattenmaske gesputtert. Außerdem wurden 8 µm dicke DMS aus Palladium-Chrom bei 300 °C Substrattemperatur gesputtert und nasschemisch strukturiert. Zur elektrischen Kontaktierung werden Platin-Drähte mit einem 75 µm Durchmesser für die DMS gewählt. Die Verbindung zwischen Draht und Dünnschicht wird über Parallelspaltschweißen hergestellt. Die Leitungen werden mit Hochtemperatur-Keramik-Zement auf dem Substrat befestigt. Als obere Isolation wird eine weitere 2,5 µm dicke Aluminiumoxid-Schicht verwendet. Der DMS sowie das Thermoelement haben anschließende Temperaturtests überstanden, der DMS wurde um 1100 °C/s erhitzt und hat den Thermoschock überstanden [23].

1.4. Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von piezoresistiven DMS zur gießtechnischen Integration im Aluminiumguss. Die Sensoren müssen thermisch und mechanisch so stabil sein, dass die Sensoren den Prozess der Einbettung überstehen. Nach der Einbettung sollen die Sensoren die mechanische Dehnung in Form von Zug- und Druckbelastung im Aluminium erfassen können. In Abbildung 4 ist der aktuelle industrielle Standard zur Erfassung von Dehnung dargestellt sowie das Konzept zur integrierten sensorischen Erfassung von Dehnung, welches als Ziel dieser Arbeit gesetzt ist.

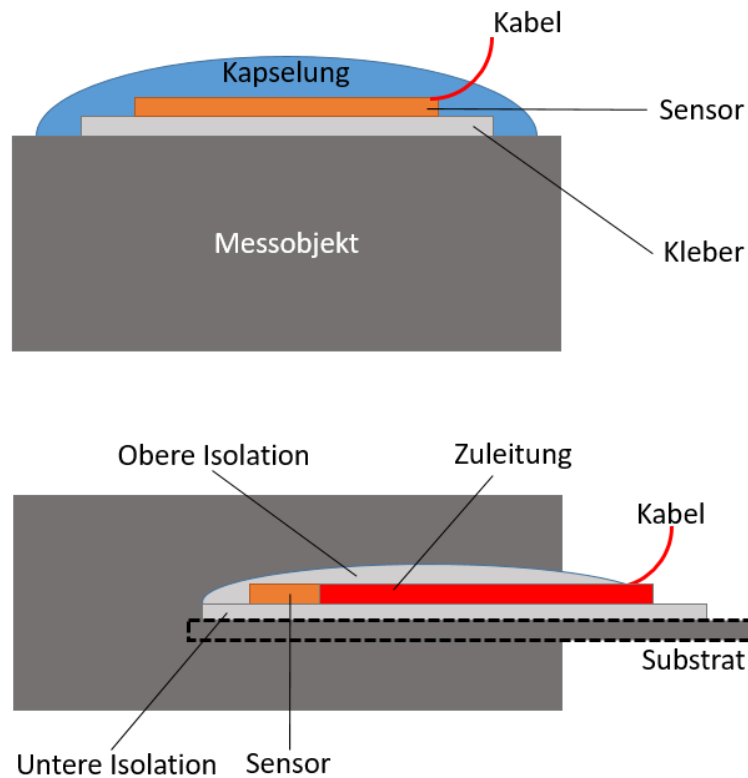


Abbildung 4: Stand der Technik zur Sensorintegration (oben) mit Konzept für zukünftige sensorische Bauteile mit eingebettetem Sensor (unten)

Die Sensoren sollen auf einem Substrat aus Aluminium gefertigt werden, um nach dem Gussprozess in Bauteilen nicht als Fremdkörper zu fungieren, sondern mit der Gussmatrix zu verschmelzen. Übrig bleibt eine unter 200 µm dicke Schicht aus Isolator, Zuleitung und Sensor. Der Sensor ist in der Lage die Einbettung unbeschadet zu überstehen und die Dehnung in Bauteilen zu erfassen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Dehnung von Bauteilen

Wird ein Körper mechanisch belastet, verursacht dies eine Verformung. Dabei wird zwischen elastischen und plastischen Verformungen sowie der Einschnürung unterschieden.

Elastische Verformungen sind reversibel, während plastische Verformungen nach der Entlastung des Körpers bleiben. Im Bereich der Einschnürung versagt das Bauteil und der verbleibende Querschnitt zur Lastaufnahme wird geringer. Diese Eigenschaften sind in Abbildung 5 als Spannungs-Dehnungs-Diagramm im einachsigen Spannungszustand eines duktilen Materials wie Aluminium dargestellt.

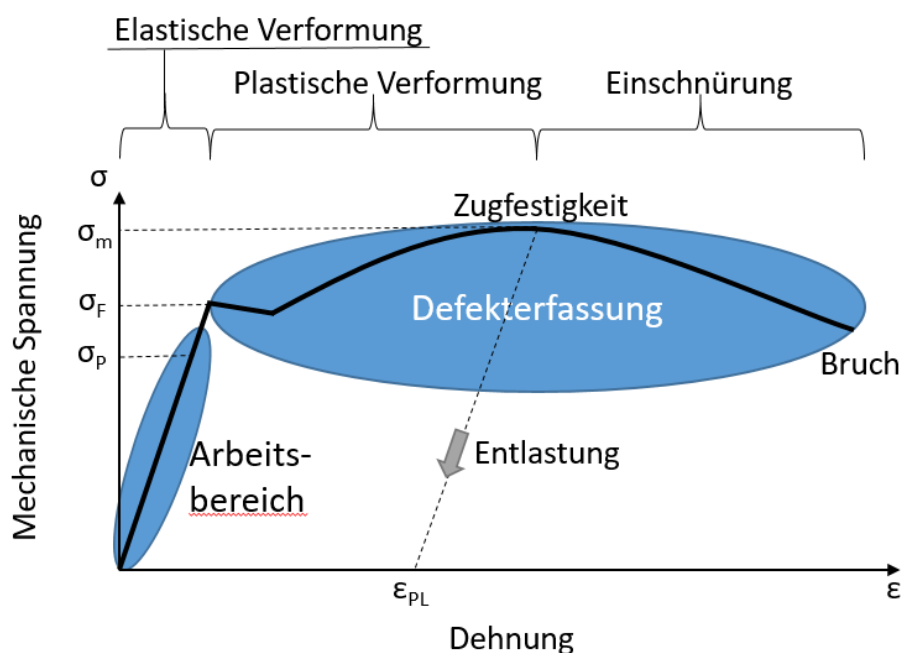


Abbildung 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Aluminiumlegierung

Bis zur Proportionalitätsgrenze σ_P besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Dehnung ϵ und der mechanischen Spannung σ . Oberhalb der Fließgrenze σ_F wird das Material plastisch verformt. Das Verhalten bei Entlastung einer Probe nach Überschreiten der Fließgrenze wird anhand der gestrichelten Linie gezeigt. Wird ein Material mit einer Spannung, die zu einer plastischen Verformung führt, beansprucht, bleibt die plastische Dehnung ϵ_{PL} auch nach der Entlastung dauerhaft erhalten. Am Hochpunkt der gezeigten Kurve liegt die Zugfestigkeit σ_m des Materials, eine weitere Dehnung geht mit einer Querschnittsverringeringer einher und führt zum Versagen des Materials.

Strukturmechanische Bauteile werden oft nur bis zur Proportionalitätsgrenze, also im elastischen Bereich beansprucht. In diesem Bereich wird die Beziehung zwischen der mechanischen Spannung σ und der Dehnung ϵ durch das hookesche Gesetz beschrieben.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Das Elastizitätsmodul E beschreibt als Proportionalitätskonstante zwischen Spannung und Dehnung einen materialspezifischen Wert. Die mechanische Spannung σ wird dabei in Kraft F pro Fläche A angegeben.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Wird ein Stab aus Aluminium mit einem E -Modul von 75000 N/mm^2 und einem Querschnitt von 3 cm^2 mit einer Kraft von $-22,5 \text{ kN}$ belastet, wird der Stab um $\varepsilon = 0,1 \%$ gedehnt. Die Veränderung der Form eines Zugstabes durch eine einachsige Zugbelastung ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Formänderung durch Zugspannung

Die Dehnung kann über Sensoren in Form von DMS durch den piezoresistiven Effekt erfasst werden. Mit bekannter Dehnung lässt sich die äußere Krafteinwirkung am Beispiel des Zugstabes bei bekanntem E -Modul bestimmen. Der zur Dehnungsmessung genutzte piezoresistive Effekt wird im nächsten Kapitel beschrieben.

2.2. Piezoresistiver Effekt

Das piezoresistive Prinzip eines Sensors basiert auf der Widerstandsänderung eines Leiters durch Verformung via Dehnung oder Stauchung. Der einheitslose Proportionalitätsfaktor k beschreibt den Zusammenhang zwischen Widerstands- und Längenänderung eines Leiters:

$$\frac{dR}{R} = k \frac{dl}{l} \quad (3)$$

Die relative Längenänderung wird durch die Dehnung ε beschrieben:

$$dR = Rk\varepsilon; \text{ mit } \varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (4)$$

Der Widerstand R eines Leiters lässt sich mit dem spezifischen Widerstand ρ , der Länge l und dem Querschnitt A berechnen [24]. Durch eine konstante gleichmäßige Dehnung des Leiters ergibt sich:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l^2}{V} \quad (5)$$

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial V} dV + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho = 2 \frac{\rho l}{V} dl - \frac{\rho l^2}{V^2} dV + \frac{l^2}{V} d\rho \quad (6)$$

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dl}{l} - \frac{dV}{V} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (7)$$

Wenn die Dehnung des Leiters in eine der drei Raumrichtungen erfolgt, kommt es zur Volumenänderung durch die Querkontraktion ε_q in den beiden anderen Richtungen.

$$\frac{dV}{V} = \varepsilon + 2\varepsilon_q \quad (8)$$

Die Querkontraktion ε_q kann auch über die materialspezifische Querkontraktionszahl ν und Dehnung ε beschrieben werden.

$$\varepsilon_q = -\nu\varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{dV}{V} = \varepsilon(1 - 2\nu) \quad (10)$$

Setzt man Gleichung 10 in Gleichung 7 ein, erhält man nach Umstellung den K-Faktor in der Klammer:

$$\frac{dR}{R} = \left(1 + 2\nu + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon}\right)\varepsilon \quad (11)$$

Die materialspezifische Querkontraktionszahl ν liegt für Metalle oft zwischen 0,2 und 0,4. So ergibt sich allein aus der geometrischen Verformung mit

$$k = 1 + 2\nu + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon}; \text{ mit } k_{geom} = 1 + 2\nu \quad (12)$$

ein K-Faktor von 1,4 bis 1,8 für Metalle.

Die Widerstandsänderung des Leiters setzt sich aus dem geometrisch bedingten Teil sowie einem materialspezifischen Term zusammen. Der spezifische Widerstand ρ ändert sich ebenfalls in geringem Ausmaß durch einen vergrößerten Abstand der Atome bei gegebener Dehnung. Insgesamt liegt der K-Faktor daher für Metalle häufig um 2. Halbleiter- und Composite-Materialien können durch einen höheren spezifischen Widerstand K-Faktoren von über 100 aufweisen.

Gesondert zu nennen sind Nickel, Chrom und Platin, da der K-Faktor dieser Metalle und Legierungen über 2 liegen kann. Mit einer Legierung aus 80 % Nickel und 20 % Chrom kann ein K-Faktor von 2,2 erreicht werden. Platin kann als Metall einen K-Faktor von 6 erreichen. Ein sinkender spezifischer Widerstand ist bei der Dehnung des Halbmetalls Bismut zu beobachten [25].

2.3. Thermoresistiver Effekt und dessen Kompensation

Ein idealer DMS reagiert nur auf die Dehnung des Bauteils und bleibt von anderen Faktoren unbeeinflusst. Ein reales Sensorsignal wird jedoch durch Umwelteinflüsse verändert. Neben der Widerstandsänderung durch Dehnung wird der Widerstand bei den meisten Metallen und Legierungen auch durch eine Änderung der Temperatur beeinflusst. Dabei ist die Änderung des Widerstandes durch die Temperatur fast immer größer als die Änderung durch Dehnung. Zur Erfassung der Dehnung ist die Widerstandsänderung durch Temperatur daher zu berücksichtigen.

$$R_{\vartheta} = R_{20}(1 + \alpha_{20}\Delta T) \quad (13)$$

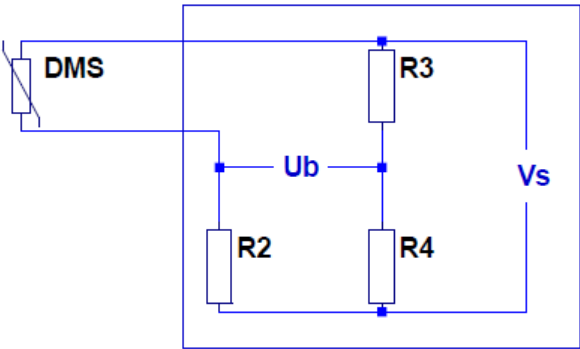
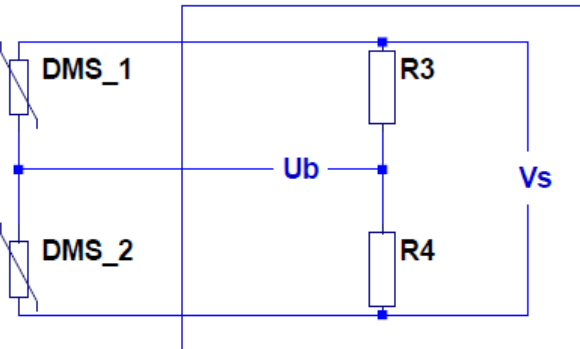
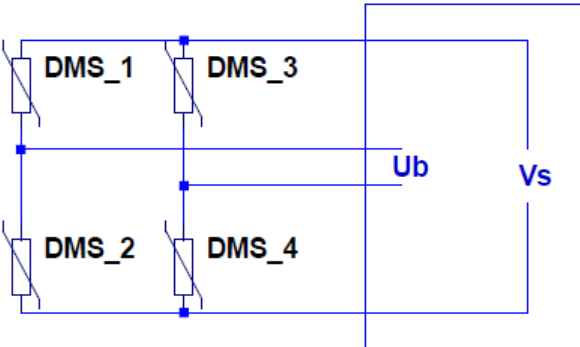
Der thermoresistive Koeffizient (engl. „thermoresistive coefficient of resistance“ - TCR) α geht linear in die Widerstandsänderung ein.

Wird ein 1k Ohm Gold-DMS um 0,2 % gedehnt, was für die meisten Bauteile die Obergrenze darstellt, so verändert sich der Widerstand aufgrund der Dehnung um ca. 4 Ohm auf 1004 Ohm. Eine Änderung des Widerstands um ca. 4 Ohm ist auch durch eine Erhöhung der Temperatur um ca. 1 Kelvin zu erreichen. Dieses Beispiel zeigt, dass eine korrekte Erfassung der Dehnung in der Praxis nur unter Berücksichtigung der Temperatur erfolgen kann.

Zur Kompensation der Temperatur gibt es sowohl konstruktive als auch rechnerische Methoden. Konstruktiv kann durch die Verwendung einer Legierung aus 55 % Kupfer, 44 % Nickel und 1 % Mangan mit einem TCR von 0 gearbeitet werden. Bekannt ist die Legierung oft unter ihrem Markennamen Konstantan der Firma VDM Metals, vormals ThyssenKrupp. Die Messung des Widerstandes ist durch den TCR von 0 bei Konstantan nicht durch die Temperatur beeinflusst.

Weitere konstruktive Möglichkeiten zur Temperaturkompensation sind durch den Aufbau einer Wheatstone-Brückenschaltung gegeben. Bei einer Brückenschaltung werden meistens zwei oder vier DMS auf dem zu messenden Bauteil angebracht. Wenn zwei Messgitter auf dem Bauteil platziert sind, sind die DMS im 90 Grad Winkel zueinander angeordnet. Ein DMS wird in Messrichtung platziert und erfährt die mechanisch hervorgerufene Dehnung, der orthogonal dazu ausgerichtete DMS erfährt die Dehnung nicht. Beide DMS unterliegen dem Einfluss der Temperatur auf dem Bauteil gleichermaßen. Durch die Verschaltung in eine Halbbrücke ist die Messspannung von der Temperatur unabhängig. Werden vier DMS verwendet, sind zwei DMS in Messrichtung, zwei weitere orthogonal dazu ausgerichtet. Durch die Verwendung von vier DMS kann die Sensitivität der Brückenspannung verdoppelt werden. Die verschiedenen Brückenschaltungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Schaltbilder der Brückenschaltungen als Übersicht

Schaltbild	Erläuterung
	<p>Viertelbrücke: Temperaturabhängig</p> <p>Möglichkeit der Temperaturkompensation durch aktiven DMS anstelle R3 auf zusätzlichem passiven Bauteil gegeben.</p>
	<p>Halbbrücke: Temperaturkompensation</p>
	<p>Vollbrücke: Temperaturkompensation Doppelte Sensitivität</p>

Eine Möglichkeit zur Umsetzung einer Temperaturkompensation innerhalb einer Viertelbrücke stellt die Verwendung von zwei DMS in einer Viertelbrücke dar. Ein aktiver DMS auf dem Bauteil wird in einer Wheatstone-Halbbrücke zusammen mit einem weiten passiven DMS an der Stelle R3 eingesetzt. Der passive DMS sollte auf einem unbelasteten gleichartigen Bauteil angebracht und derselben Temperatur ausgesetzt werden. Beide DMS unterliegen der gleichen Temperaturänderung, die Dehnung erfährt nur der aktive DMS, dadurch kann eine Temperaturkompensation erreicht werden.

Die Gruppe um Zymelka und Kobayashi hat eine Temperaturkompensation durch die Sensorgeometrie erreicht. Der Sensor ist als symmetrische Vollbrücke aufgebaut und erlaubt je nach Anordnung des Sensors entweder die Erfassung von Torsion oder Dehnung auf Strukturen wie Biegebalken [26, 27].

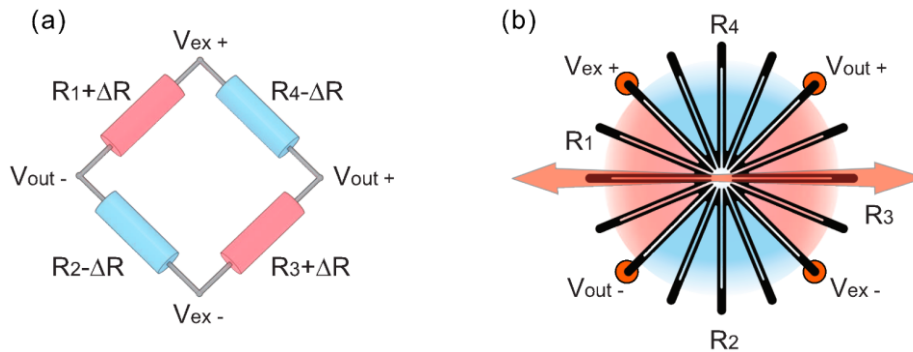


Abbildung 7: Symmetrische Vollbrücke zur Temperaturkompensation; a) Darstellung der Brückenschaltung, b) Aufbau des Sensors. Die Pfeile deuten auf die Achse der höchsten Sensitivität [27] © 2020 CC BY 4.0

Ein rechnerisches Verfahren stellt die Verwendung eines Temperatursensors in Verbindung mit einem physischen Mäander dar. Durch die Messung der Temperatur kann die Widerstandsänderung bei bekanntem TCR des DMS berechnet und von der Änderung durch die Dehnung unterscheiden werden.

2-Metall-Sensor

Auch der Einsatz von zwei DMS aus unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften in Bezug auf den TCR und K-Faktor zur Temperaturkompensation ist möglich. Beide DMS werden als aktive DMS eingesetzt und sind der gleichen Dehnung sowie Temperatur ausgesetzt. Dazu werden die Mäander direkt nebeneinander oder wie in Abbildung 8 dargestellt ineinander hergestellt.

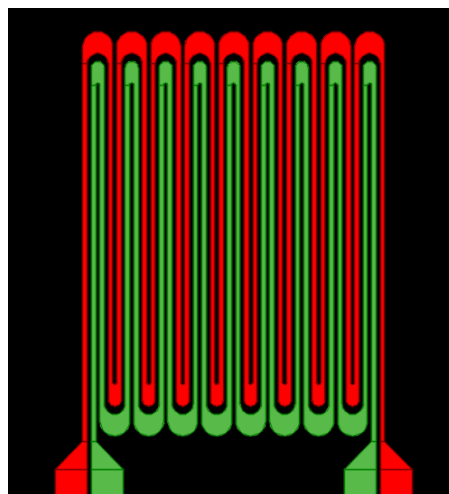


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines 2-Metall-Sensors

Der Widerstand beider DMS wird durch Temperatur T und Dehnung ε beeinflusst. Durch unterschiedliche K-Faktoren ist die Widerstandsänderung bei gleicher Dehnung unterschiedlich. Mit abweichendem TCR zwischen beiden DMS führt eine Temperaturänderung ebenfalls zu unterschiedlichen Widerstandsänderungen. Bei gegebenen Ausgangswiderständen R_1, R_2 , sowie ermittelten K-Faktoren k_1, k_2 und Temperaturkoeffizienten α_1, α_2 können Temperatur und Dehnung errechnet werden [28, 29, 30]. Dies kann z. B. durch Aufstellung und Lösung eines linearen Gleichungssystems erfolgen.

$$R_1(T, \varepsilon) = R_1(1 + \alpha_1(T - T_0) + k_1 * \varepsilon) \quad (14)$$

$$R_1(T, \varepsilon) = R_1 + R_1\alpha_1T - R_1\alpha_1T_0 + R_1k_1\varepsilon \quad (15)$$

$$R_1\alpha_1T + R_1k_1\varepsilon = R_1(T, \varepsilon) + R_1\alpha_1T_0 - R_1 \quad (16)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_1\alpha_1 & R_1k_1 \\ R_2\alpha_2 & R_2k_2 \end{bmatrix}}_{v_1} * \begin{bmatrix} T \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} R_1(T, \varepsilon) + R_1\alpha_1T_0 - R_1 \\ R_2(T, \varepsilon) + R_2\alpha_2T_0 - R_2 \end{bmatrix}}_{v_2} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} T \\ \varepsilon \end{bmatrix} = v_1^{-1} * v_2 \quad (18)$$

Da beiden Mäandern die Dehnung des Bauteils aufgezwungen wird, stellt der im Klimakammerversuch ermittelte TCR automatisch einen Wert dar, welcher die aufgezwungene Dehnung durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten (engl. „coefficient of thermal expansion“ – CTE) berücksichtigt beziehungsweise kompensiert. Durch die Ermittlung der K-Faktoren in einer Klimakammer wäre es auch möglich, die Effekte zweiter Ordnung zu berücksichtigen.

Der CTE kann ebenfalls einen Einfluss auf die Messung mit einem DMS haben. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten zwischen einem DMS aus z. B. Platin ($\alpha_{Pt} = 8,8 * 10^{-6} * K^{-1}$) und einem Bauteil aus Aluminium ($\alpha_{AlSi12} = 21 * 10^{-6} * K^{-1}$) ergibt sich eine Differenz in der natürlichen Ausdehnung. Der DMS ist fest mit dem Bauteil verbunden und erfährt daher die Dehnung des Bauteils. Die Differenz $\Delta\alpha = \alpha_{AlSi12} - \alpha_{Pt} = 12,2 * 10^{-6} * K^{-1}$ zwischen dem CTE des DMS und des Bauteils entspricht der aufgezwungenen Dehnung des DMS und muss in der Messung berücksichtigt werden. Mit einer Halb- oder Vollbrücke kann dieser Einfluss kompensiert werden.

Auch der K-Faktor kann temperaturabhängig sein und verhält sich analog zum thermoresistiven Effekt mit $k_t = k(1 + \alpha_k\Delta T)$. Der Einfluss ist bei Metallen im Allgemeinen gering und wird vernachlässigt, eine Kompensation durch eine Halb- oder Vollbrücke kann erreicht werden.

2.4. Arten von Dehnungsmessstreifen

2.4.1. Folien-DMS

Ein häufig verwendeter Sensoraufbau zur Dehnungsmessung ist der Folien-DMS. Zur Herstellung wird eine auf 5 bis 8 μm gewalzte Metallfolie auf ein Substrat aus Kunststoff geklebt und fotolithografisch strukturiert [31]. Konstantan ist eine häufig verwendete Legierung, da der elektrische Widerstand annähernd temperaturunabhängig ist. Diese Sensoren werden mit dem Substrat, welches häufig aus einem dünnen Polymer besteht, direkt auf das Messobjekt geklebt. Diese Folien-DMS erreichen mit Konstantan einen K-Faktor von 2 und können durch die Verwendung von Platin einen K-Faktor von 6 erreichen. In Abbildung 9 ist ein Folien-DMS dargestellt.

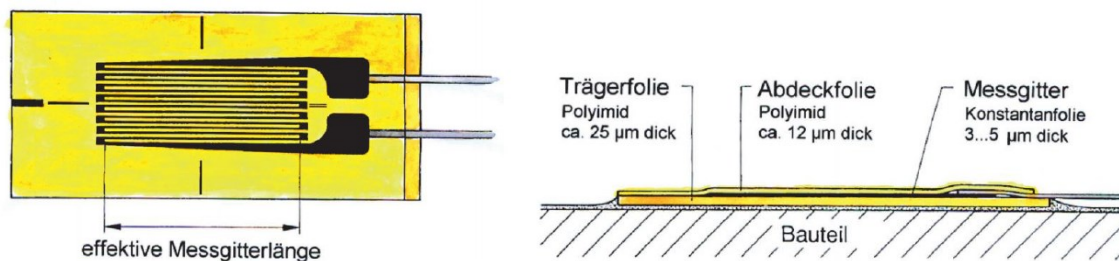


Abbildung 9: Aufbau eines DMS, links als Draufsicht, rechts als Querschnitt [32]

Der generelle Aufbau eines Metall-Folien-DMS besteht aus einem ca. 5 μm dicken Messgitter, welches auf einem Substrat aus 25 μm dickem Polyimid aufgebracht wird. Das Messgitter wird durch eine 12 μm dicke Abdeckfolie aus Polyimid geschützt. Ein solcher Folien-DMS wird direkt auf das Bauteil geklebt [32].

2.4.2. Dickschicht-DMS

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von piezoresistiven Sensoren ist die Dickschichttechnik. Die sensorischen Schichten werden hier durch ein strukturiertes Sieb direkt auf ein Substrat gedruckt. Im Siebdruck hergestellte Widerstände sind häufig 10 – 100 μm dick. Die gedruckten Widerstände werden anschließend bei Temperaturen von bis zu 1700 $^{\circ}\text{C}$ eingebrannt, um sich mit dem Substrat zu verbinden. Das Substrat besteht aufgrund der Temperatur häufig aus einer Keramik wie zum Beispiel Aluminiumoxid. Die druckbaren Widerstandspasten bestehen neben einem Lösemittel oft aus fein gemahlenem Glaspulver, Bindemitteln sowie Metalloxiden wie Rutheniumdioxid oder Bismutoxid. Ein K-Faktor von 10 oder mehr kann je nach Zusammensetzung der Materialien sowie der Partikelgröße der Materialien erzielt werden.

Neben den Dickschichtpasten auf Keramiksubstraten, die bei hohen Temperaturen eingebrannt werden, gibt es auch Pasten, die bei niedrigeren Temperaturen verarbeitet werden können. Dadurch können piezoresistive Sensoren auch auf Substraten mit einem Schmelzpunkt von unter 300 °C aufgebracht werden. Zu den verwendeten Materialien gehören leitfähige Polymere oder Verbundmaterialien, die mit leitfähigen Partikeln gemischt werden sowie druckfähige Fluide. Diese Pasten enthalten Lösemittel, die für den Druckprozess notwendig sind und anschließend beim Aushärten verdampfen, das Einbrennen bei hohen Temperaturen entfällt hier. Neben dem Siebdruckverfahren können diese piezoresistiven Widerstandspasten auch im Aerosoljetdruck oder Tintenstrahldruck verarbeitet werden. In Abbildung 10 ist ein DMS auf einem Substrat aus Aluminium zu sehen. Als Isolator wurde ein Polymer verwendet, für den DMS wurde Silber als piezoresistives Material im Aerosoljetdruck auf den Isolator gedruckt und bei 350 °C für mindestens eine Stunde eingebrannt. Der erzielte K-Faktor liegt bei 3,35 [33].

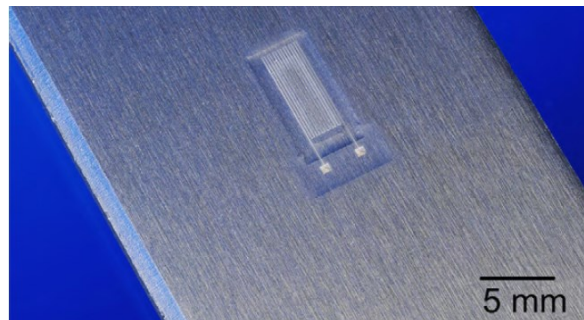


Abbildung 10: Aerosoljetdruck Dickschicht DMS auf einem Substrat aus Aluminium mit einer Isolationsschicht aus Polymer [33]

2.4.3. Dünnschicht-DMS

Piezoresistive Widerstände, die in Dünnschicht realisiert sind, haben in der Regel eine Materialstärke von unter 1 μm und sind damit wesentlich dünner als Widerstände aus der Dickschichttechnik. Die Herstellung der piezoresistiven Widerstände kann mit verschiedenen vakuumbasierten Abscheideverfahren wie der physischen Gasphasenabscheidung (engl. „physical vapour deposition“ - PVD) oder chemischen Gasphasenabscheidung (engl. „chemical vapour deposition“ - CVD) erzeugt werden. Als PVD-Verfahren sei hier das Verfahren der Kathodenzerstäubung (Sputtern) genannt, welches bei Prozesstemperaturen unterhalb von 350 °C die Abscheidung von Materialien ermöglicht, die einen Schmelzpunkt oberhalb der Prozesstemperaturen aufweisen. Dabei können nahezu alle Substrate verwendet werden, die dem Vakuum sowie der Prozesstemperatur standhalten. Das können sowohl keramische als auch metallische Substrate sein, ein Wafer aus Silizium oder das Bauteil selbst, auf dem der Widerstand benötigt wird. Die Strukturierung der Dünnschicht erfolgt meistens fotolithografisch. Der erzielbare K-Faktor beträgt für metallische Schichten

oft 2, kann für DLC Schichten jedoch auch weit über 20 liegen. Der in Abbildung 11 dargestellte Dünnschicht-DMS kann auf ein Gewinde aus Stahl geschweißt und als Druckmesszelle in hydraulischen Anlagen verwendet werden. Zur Isolation wird Titanoxinitrid TiON verwendet, als piezoresistives Material wird eine Nickel-Chrom-Schicht verwendet [34].

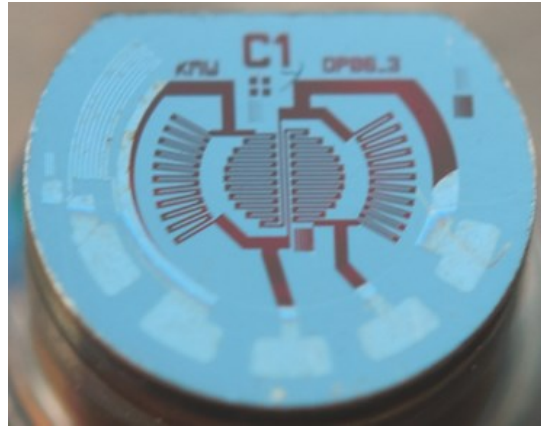


Abbildung 11: Dünnschicht-DMS als Druckmesszelle für Hydraulik auf einem Substrat aus Stahl

2.4.4. Silizium-DMS

Eine Eigenschaft von Silizium ist die Änderung des materialspezifischen Widerstandes ρ durch Verformung. Wird Silizium verformt, ändert sich das Energielevel der Elektronen, dadurch können die Elektronen zwischen dem Valenz- und Leitungsband wechseln und der Widerstand kann sich stark ändern. Durch diesen Wechsel der Elektronen in ein anderes Band wird der letzte Term aus Gleichung 7 dominant und bestimmt den K-Faktor. Durch die kristalline Struktur von Silizium ist die Leitfähigkeit abhängig vom Winkel zwischen dem Stromfluss und der mechanischen Spannung. Des Weiteren ist die Leitfähigkeit abhängig von der Dotierung, so liegt der K-Faktor zwischen +100 und -100. Das Energielevel der Elektronen wird neben der mechanischen Verformung auch durch eine Temperaturänderung beeinflusst. Polysilizium zum Beispiel kann sowohl im CVD-Verfahren bei höheren Temperaturen als auch im PVD-Verfahren bei Temperaturen unter 350 °C abgeschieden werden [35].

2.5. Grundlagen der Schichtaufbringung

Ausgehend von dem verwendeten Substrat, der herzustellenden Schicht und dem zur Verfügung stehenden Temperaturbereich können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden.

Ein Verfahren zur Schichtaufbringung bei Temperaturen unter 50 °C stellt unter anderem die Galvanik dar, in der ein elektrischer Strom durch ein elektrolytisches Bad geleitet wird. Die Anode besteht z. B. aus Zink und wird während des Prozesses aufgelöst, während die Zink-

Ionen sich durch Reduktion auf einer Kathode wie z. B. einem Aluminiumsubstrat ablagern. Die Galvanik ermöglicht dadurch die temperaturschonende Herstellung einer Zink-Schicht, obwohl Zink einen Schmelzpunkt von ca. 420 °C aufweist.

Ein weiteres Verfahren stellt das Aufschleudern (engl. „spin coating“) dar. Durch das Aufschleudern können flüssige Fotolacke oder in Lösung gebrachte Emulsionen bei Raumtemperatur gleichmäßig auf Substrate aufgetragen werden. Durch anschließende Trocknung kann so eine Schicht auf einem Substrat aufgebracht werden.

Mit dem Verfahren der chemischen Gasphasenabscheidung, können verschiedenste Materialien durch eine chemische Reaktion mehrerer Gase auf dem Substrat abgeschieden werden. Siliziumnitrid ist eine häufig verwendete Isolationsschicht, welche auf Substraten durch die chemische Reaktion von Ammoniak und Dichlorsilan erzeugt werden kann. Das Plasmaunterstützte-CVD-Verfahren (engl. „plasma enhanced chemical vapour deposition“ - PECVD) stellt erhöhte Temperaturanforderungen im Bereich von 250 bis 400 °C an das Substrat. Höherwertige Siliziumnitrid-Schichten sowie Polysilizium können unter anderem im Niederdruck-CVD (engl. „low pressure chemical vapour deposition“ - LPCVD) bei Temperaturen zwischen 600 und 1200 °C hergestellt werden. Das Temperaturbudget für Substrate aus Aluminium verhindert die Nutzung des LPCVD-Verfahrens. Die Nutzung dieser hochwertigeren LPCVD-Schichten wäre daher im Wafer-Transfer-Verfahren umsetzbar. Die Sensoren werden auf einem Substrat aus Silizium gefertigt und anschließend z. B. durch eutektisches Bonden auf Substrate aus Aluminium transferiert.

Im Folgenden wird das Verfahren der physikalischen Gasphasenabscheidung zur Abscheidung von oftmals metallischen Schichten näher beschrieben. Das zur Beschichtung verwendete Material wird in einem technischen Vakuum in die Gasphase überführt und auf dem gewünschten Substrat kondensiert. Im Bereich des PVD-Verfahrens gibt es unterschiedliche Methoden, um das verwendete Material in die Gasphase zu überführen, dabei ist die jeweilige Methode namensgebend. So wird im PVD-Verfahren des Elektronenstrahlverdampfens das Material, welches zur Beschichtung in die Gasphase überführt wird, durch einen gerichteten Elektronenstrahl erhitzt und verdampft. Dadurch können auch elektrisch nicht leitfähige Materialien wie Aluminiumoxid oder Zirkoniumdioxid in die Gasphase überführt und zur Beschichtung verwendet werden. Für Versuchsmuster und erste Tests eignet sich das Elektronenstrahlverdampfen gut, da nur eine geringe Menge des zu verdampfenden Materials im Schmelztiegel des Elektronenstrahls benötigt wird. Nachteil ist die geringe Schichtqualität, welche sich durch Fehlstellen auszeichnen kann und z. B. eine elektrische Isolation bei größeren Strukturen erschwert.

Im PVD-Verfahren der Kathodenzerstäubung, auch Sputtern genannt, wird das Beschichtungsmaterial mit beschleunigten Ionen aus dem Target gelöst um auf dem zu

beschichtenden Objekt wieder zu kondensieren. Als Target wird ein Objektträger mit aufbereitetem Ausgangsmaterial zur Beschichtung wie z. B. Gold, Platin, Aluminiumoxid oder auch Legierungen wie Wolframtitan bezeichnet. Das Target ist dabei gegenüber dem zu beschichtenden Substrat in einer evakuierten und mit Prozessgas durchflossenen Reaktionskammer positioniert. In Abbildung 12 ist der Aufbau einer im Projekt verwendeten Beschichtungskammer inklusive Aluminiumoxid-Target dargestellt. Es handelt sich um eine PVD-Anlage mit der Bezeichnung LA 440 S der Firma Ardenne Anlagentechnik GmbH.

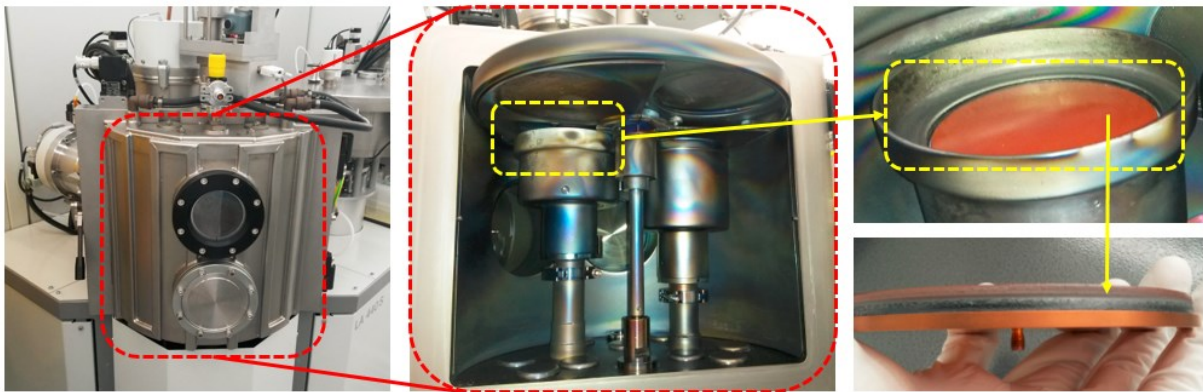


Abbildung 12: Aufbau einer PVD-Sputter Anlage mit Großaufnahme eines Aluminiumoxid-Targets im ein- und ausgebauten Zustand. Das Target ist unterhalb vom Substrat positioniert.

Mit einer Spannungsquelle wird beim DC-Sputtern ein elektrisches Feld zwischen Target und Substrat erzeugt. Das Target stellt die negativ geladene Kathode dar und das zu beschichtende Substrat die positiv geladene Anode. Freie Elektronen im Feld lösen weitere Elektronen aus den Argon-Atomen des Prozessgases, die dadurch positiv geladenen Argon-Ionen werden in das negativ geladene Target beschleunigt. Die auf dem Target auftreffenden Ionen lösen Atome aus dem Target, welche schlussendlich auf dem Substrat kondensieren können. Elektrisch leitfähige Targets wie Gold können mit einer Gleichspannungsquelle zerstäubt werden. Sollen Isolatoren abgeschieden werden, wird eine Wechselspannungsquelle verwendet. Während des Prozesses wird kontinuierlich das jeweilige Prozessgas z. B. Argon über Ventile zugeführt. Über weitere Zugänge sind Vakuumpumpen angeschlossen, welche die Prozesskammer kontinuierlich räumen, um den Gasdruck gering zu halten. Jedes aus dem Target gelöste Atom kann mit Gasteilchen zusammenstoßen oder auf einer Oberfläche bzw. dem Substrat kondensieren. Daher steigt die Menge der auf dem Substrat abgeschiedenen Atome bei geringerem Gasdruck unter sonst gleichen Bedingungen. Die schematische Darstellung vom Prozess ist in Abbildung 13 dargestellt.

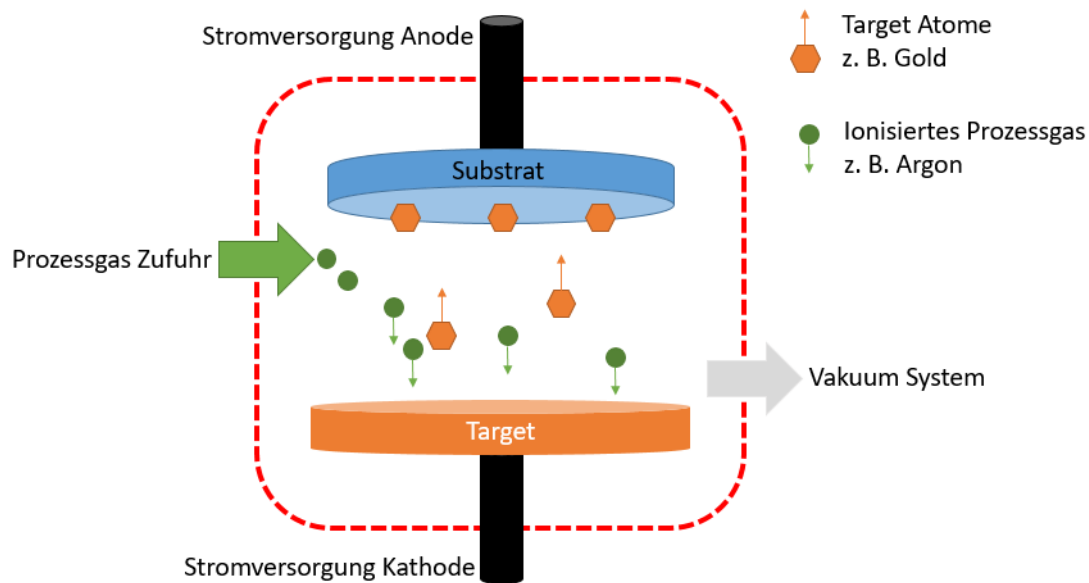


Abbildung 13: Schematische Darstellung des PVD-Verfahrens DC-Sputtern

Wenn dem Prozessgas Sauerstoff beigefügt wird, können auch reaktive Prozesse stattfinden. So können mit einem Substrat aus Aluminium und einer kontinuierlichen Sauerstoffzufuhr Aluminiumoxidschichten reaktiv abgeschieden werden.

2.6. Dünnschichten auf Substraten aus Aluminium unter dem Einfluss des CTE

Wird Aluminium als Substrat verwendet, kann es durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten zu Spannungen in den Materialien bei verschiedenen Temperaturen kommen. Die Spannungen können sich z. B. in Form einer Wölbung des Substrats, als Risse oder kleinere kreisförmige Abplatzungen äußern. Risse treten auf, wenn die maximale Zugspannung der aufgetragenen Dünnschicht durch die größere Ausdehnung des Substrats überschritten wird. Kreisförmige Abplatzungen zeugen von zu hohen Druckspannungen der Dünnschicht.

Werden Schichten bei höheren Temperaturen auf Aluminium Substraten abgeschieden, erfahren die Dünnschichten mit einem kleineren CTE bei Raumtemperatur Druckspannung und neigen zu kreisförmigen Abplatzungen oder zur Wölbung des Substrats. Die höhere Temperatur kann prozessbedingt notwendig sein, oder zur verbesserten Schichtqualität durch eine Substrateheizung eingestellt werden. Sowohl höhere Temperaturen als auch eine höhere Spannung des Plasmas führen zu einer erhöhten Mobilität der Target-Atome während der Abscheidung. Dadurch können homogenere Schichten entstehen.

Die Substratheizung kann jedoch auch dazu verwendet werden, die Abscheidung absichtlich bei erhöhten Temperaturen durchzuführen um die Druckvorspannung entsprechend der Parameter und jeweiligen CTE aktiv einzustellen. Die Spannungen im Zug- und Druckbereich müssen sowohl bei Raumtemperatur, als auch während der gießtechnischen Einbettung in einem Bereich bleiben, welcher die Schichten intakt lässt. In den meisten Fällen wird es erforderlich sein, die Dünnschichten bei Raumtemperatur unter Druckvorspannung zu setzen, damit die Schichten während der Einbettung nicht durch Zugspannung zerstört werden.

Die Schichtspannung σ der Dünnschicht setzt sich aus intrinsischer σ_i , thermischer σ_t und externer Spannung σ_e zusammen.

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_t + \sigma_e \quad (19)$$

Die thermische Schichtspannung σ_t wird durch die Ausdehnungskoeffizienten der Dünnschicht α_f und des Substrats α_s , der Temperaturdifferenz zwischen Abscheidetemperatur T_a und der Temperatur zum Untersuchungszeitpunkt T_u , sowie der Querkontraktionszahl ν_f der Dünnschicht beeinflusst [36].

$$\sigma_t(T) = \frac{(\alpha_s - \alpha_f) * (T_a - T_u) * E_f}{1 - \nu_f} \quad (20)$$

Mearini und Hoffman haben reaktiv hergestellte PVD-Aluminiumoxid-Dünnschichten untersucht und z. B. für eine 260 nm dicke Schicht eine maximale Zugspannung von 261 MPa bei einem E-Modul von 107 GPa ermittelt [37]. Für die folgende überschlägige Rechnung zur maximalen Zugspannung während der Einbettung wird für die Dünnschicht aus Aluminiumoxid eine Querkontraktionszahl von $\nu_f = 0,22$ sowie ein Ausdehnungskoeffizient von $\alpha_f = 8,8 * 10^{-6} * K^{-1}$ angenommen. Für das Substrat wird eine AlSi12 Legierung mit $\alpha_s = 21 * 10^{-6} * K^{-1}$ und einem Schmelzpunkt bei 580 °C angenommen.

$$\sigma_t = \frac{(21 - 8,8 * 10^{-6} * K^{-1}) * (430 \text{ °C} - 580 \text{ °C}) * 107 \text{ GPa}}{1 - 0,22} = 251 \text{ MPa} \quad (21)$$

Bei einer Abscheidetemperatur der Dünnschicht von 430 °C ergibt sich mit den obigen Werten eine maximale Zugspannung von ca. 251 MPa bei 580 °C. Die maximale Zugspannung der Dünnschicht wird bei der Einbettung damit nicht überschritten.

Im Druckguss erreicht das Substrat den Schmelzpunkt nicht zwingend, da die Schmelze in der temperierten Form aktiv abgekühlt wird und der Vorgang der Formfüllung nur wenige Sekunden dauert. Im Kokillenguss mit großem Gussvolumen ist es hingegen wahrscheinlich, dass das Substrat den Schmelzpunkt erreicht.

Die folgende Abbildung bezieht sich auf den Aspekt der thermischen Spannungen durch unterschiedliche CTE.

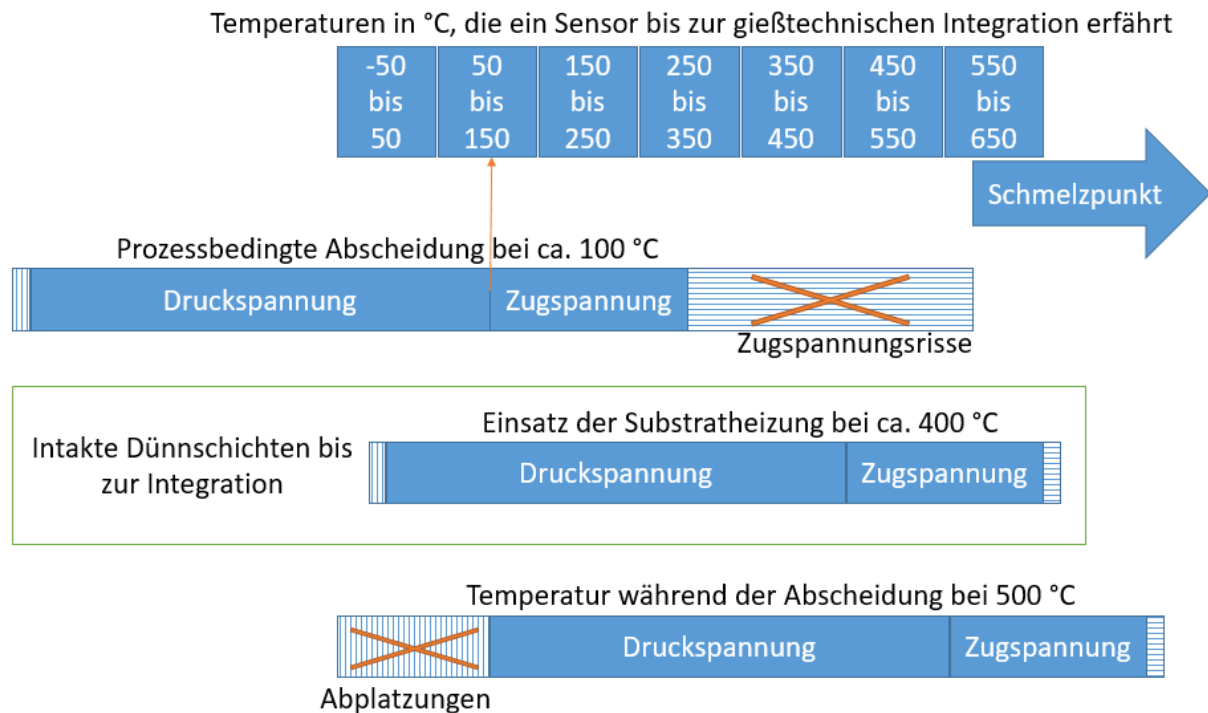


Abbildung 14: Thermische Zug- und Druckspannungen durch verschiedene Abscheidetemperaturen

Weitere Möglichkeiten zur Einstellung der Schichtspannung sind z. B. abweichende Prozessparameter der Spannungsquelle oder die Prozessgaszusammenstellung. Einige Schichten eignen sich dabei besser als andere. So weist Aluminiumoxid als Keramik eine hohe theoretische Fähigkeit aus, Druckspannung aufzunehmen. Die Zugspannungsfähigkeit ist bei Keramiken wesentlich geringer. Dies ist jedoch vom Stoff und den Prozessparametern der Abscheidung abhängig und muss im Einzelfall betrachtet werden.

2.7. Verfahren zur Strukturierung

Um abgeschiedene Schichten zu strukturieren gibt es verschiedene Methoden. Direkt während der Abscheidung kann eine Schattenmaske eingesetzt werden. Die Maske wird als Schablone zwischen Wafer und Target positioniert um eine gerichtete Abscheidung wie bei PVD-Prozessen durch Öffnungen in der Maske nur auf den gewünschten Flächen des Wafers zu erzeugen. Masken haben durch die jeweils notwendige mechanische Stabilität und den physischen Aufbau Grenzen in der Anwendbarkeit. So können z. B. keine Inseln innerhalb zu beschichtender Flächen verschattet werden. Sofern Masken zur Anwendung kommen können, entfallen chemische Prozesse zur anderweitigen

Strukturierung. Dies ist besonders bei chemisch leicht anfälligen Substraten aus Aluminium hilfreich.

Die beiden weiteren häufig eingesetzten Verfahren zur Strukturierung bedienen sich jeweils der Fotolithografie. Es kann hier zwischen dem Lift-off-Verfahren und der klassischen Strukturierung durch Ätzen unterschieden werden. Im klassischen Verfahren wird auf eine zu strukturierende und bereits auf dem Substrat abgeschiedene Schicht ein Fotolack aufgeschleudert. Im Anschluss an die Trocknung des Lacks wird dieser in einem fotolithografischen Prozess durch UV-Licht an den gewünschten Stellen ausgehärtet. Je nach Art des Lacks werden über eine Maske die zu entfernenden oder zu schützenden Stellen belichtet. In Abbildung 15 sind die häufig verwendeten Varianten zur Strukturierung dargestellt.

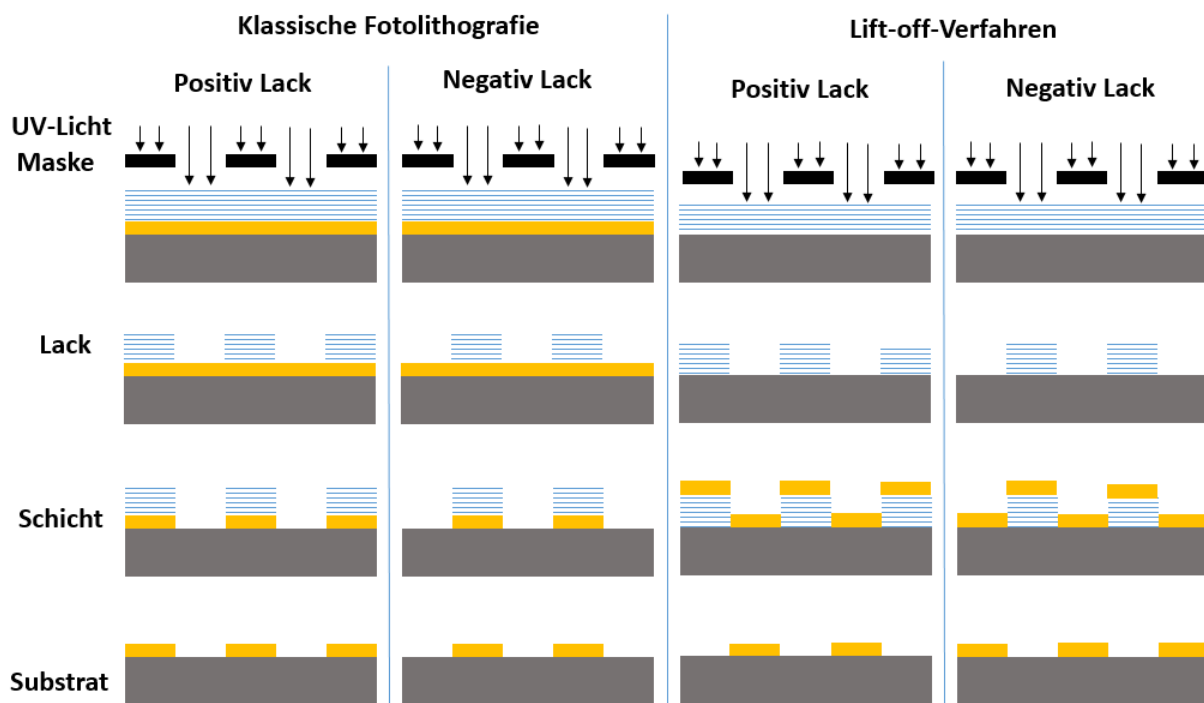


Abbildung 15: Übersicht verschiedener Verfahren zur Strukturierung von Dünnschichten

In der klassischen Fotolithografie müssen Lack und Substrat bei chemischen Ätzprozessen resistent gegen die Ätzlösung zur Strukturierung der Schicht sein. Im Lift-off-Verfahren genügt es, den unter der Schicht liegenden Lack zu lösen, um die nicht gewünschte Metallisierung zu entfernen. Durch das Lift-off-Verfahren werden Wafer aus Aluminium effektiv vor zu stark ätzenden Lösungen präventiv geschützt. Neben den chemischen Ätzverfahren gibt es weitere Verfahren wie das physikalische Trockenätzen. Hier werden Teilchen dazu genutzt Atome aus dem Wafer zu schlagen. Es handelt sich dabei um ein gerichtetes anisotropes Verfahren, welches sich für besonders feine Strukturen eignet.

3. Versuchsumfeld und gießtechnische Integration

3.1. Verfahren zur Einbettung von Sensoren im Aluminiumguss

Im Aluminiumguss wird flüssiges Metall zur Herstellung von Bauteilen verwendet. Der Aluminiumguss kann in verschiedene Arten und Untergruppen unterteilt werden, die zwei häufigsten und in dieser Arbeit vorkommenden Arten werden näher beschrieben. Zum einen gibt es den Schwerkraftguss, dabei wird nur die Schwerkraft genutzt, um eine Form mit der flüssigen Schmelze zu füllen. Innerhalb des Schwerkraftgusses wird zwischen einer verlorenen und einer dauerhaften Form unterschieden. Eine im Schwerkraftguss wiederverwendbare Form aus z. B. Stahl wird als Kokille bezeichnet und es wird daher in diesem Bereich vom Kokillenguss gesprochen.

Zum anderen gibt es neben dem Schwerkraftguss den Druckguss. Im Druckguss wird zwischen Nieder- und Hochdruck-Druckguss unterschieden. Im Hochdruck-Druckguss wird die Schmelze durch einen Kolben unter hohem Druck bei bis zu 1.200 bar in eine Dauerform getrieben, der Vorgang dauert wenige Sekunden. Durch eine temperierte Form wird die Schmelze im Hochdruck-Druckguss aktiv gekühlt, dies ermöglicht kurze Gießzyklen und damit große Stückzahlen. Wenn im Folgenden von Druckguss gesprochen wird, ist der Hochdruck-Druckguss gemeint. In Abgrenzung zum Druckguss wird im Niederdruckguss die Schmelze mit Druckluft durch ein Steigrohr in eine Form gedrückt. Der Vorgang der Formfüllung und des Abkühlens dauert deutlich länger als im Druckguss, kann jedoch eine bessere Qualität sowie höhere Festigkeitswerte des Bauteils bieten.

3.2. Kokillenguss

Der Aufbau und die Komplexität einer Gussform ist dabei vom verwendeten Prozess abhängig. Im Kokillenguss ist die Kokille so konstruiert, dass die Schmelze über den Anguss in die Form geleitet wird. Der Anguss muss so dimensioniert sein, dass ein ausreichender Volumenstrom flüssiger Schmelze in die Form gelangt. Durch die höhere Dichte des flüssigen Aluminiums wird die Luft aus der Form verdrängt. Um das Einschließen von Luftblasen zu vermeiden, werden an entsprechenden Stellen sogenannte Steiger in die Form eingearbeitet. Durch diese Steiger kann Luft entweichen und Gussfehler werden vermieden. Um einen Sensor in die Gussmatrix zu integrieren, muss die Sensoraufnahme in der Konstruktion der Gussform berücksichtigt werden. Die elektrischen Zuleitungen zum Sensor müssen aus der Gussmatrix herausgeführt werden und der Sensor muss mechanisch befestigt sein. Um das erstarrte Bauteil besser entformen zu können, weisen Kokillen meistens keine 90-Grad-Winkel auf, sondern werden mit einer kleinen Fase versehen.

Eine der im Projekt verwendeten Kokillen besteht aus zwei Halbschalen aus Stahl. Die Halbschalen werden durch Stifte zentriert und mit einer Schraubzwinge fest verschlossen. Damit sich der Steiger am höchsten Punkt in der Kavität befindet, wurde die Kokille auf der Seite der Sensoraufnahme leicht aufgebockt, um eine ca. 10 Grad Steigung zu erzielen. In der folgenden Abbildung ist eine der genutzten Kokillen inklusive Bauteil näher dargestellt.

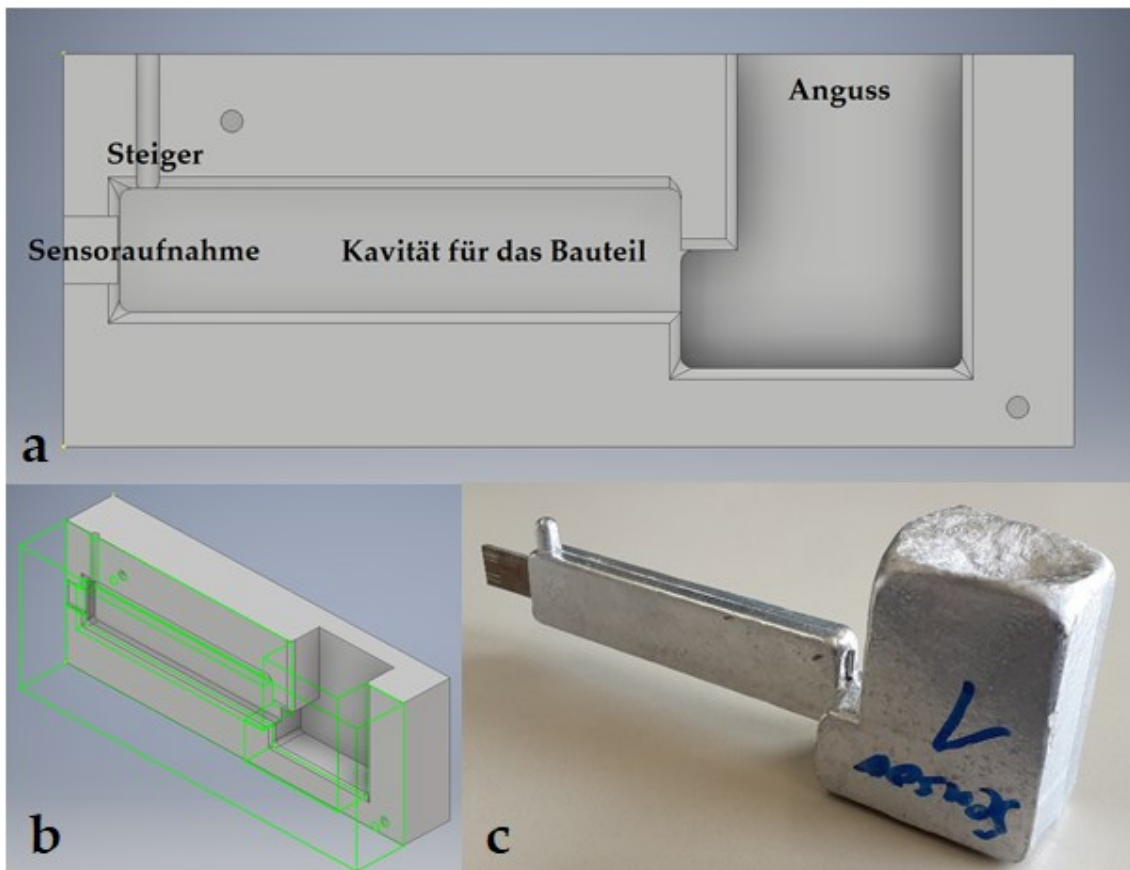


Abbildung 16: Kokille mit Sensoraufnahme; a) Halbschale in Draufsicht, b) Vollständige Kokille, c) Gussobjekt inklusive eingebettetem Sensorelement

Der Kokillenguss stellt besonders hohe thermische Anforderungen an einzubettende Sensoren. Die Anforderungen hängen im Einzelnen von der verwendeten Gusslegierung sowie der Geometrie der Gussform, dessen Volumen und der Position des Sensors ab. Die Schmelze wird bei Temperaturen von ca. 750 °C in eine oftmals temperierte Gussform gefüllt und bleibt dort für einige Sekunden flüssig. Die Temperatur fällt degressiv mit abnehmender Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur. Zwei Minuten nach dem Einfüllen der Schmelze ist die Temperatur wieder unter 500 °C und nach insgesamt 10 Minuten unter 300 °C. Der Temperaturverlauf, gemessen in der Mitte der Kokille am Sensorelement für eine an Luft abkühlende Kokille, ist in Abbildung 17 zu sehen. Die Aluminiumlegierung wurde bei ca. 720 °C in die Kokille eingefüllt.

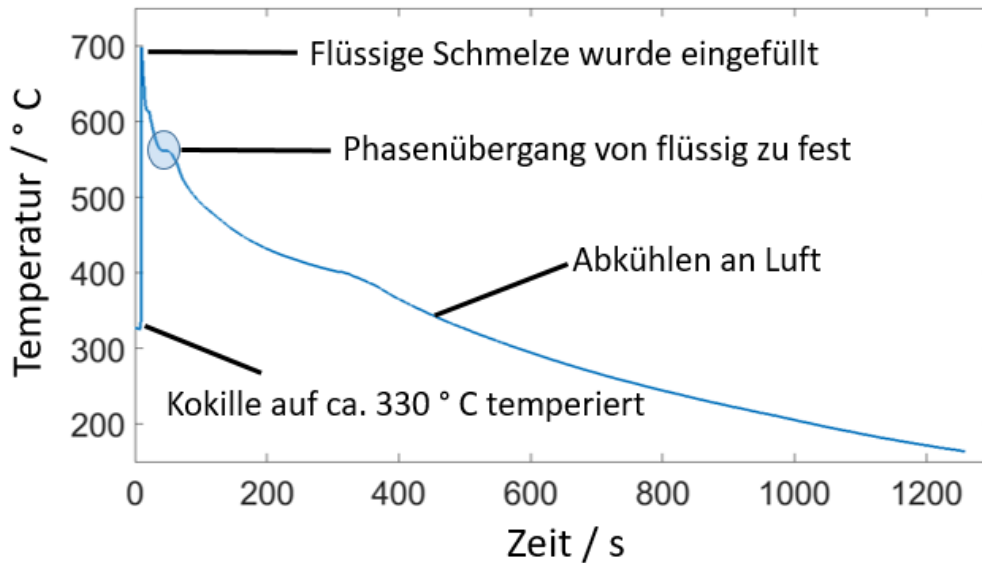


Abbildung 17: Temperaturverlauf im inneren einer Schwerkraft-Kokille

3.3. Druckguss

Im Gegensatz zum Schwerkraft-Kokillenguss zeichnet sich der Druckguss durch eine hohe Taktrate besonders für die Serienproduktion aus. Im Druckguss wird die Schmelze unter hohem Druck in kurzer Zeit in eine temperierte Form gepresst. Vor jedem Zyklus wird die Form mit einem Trennmittel benetzt, damit die Schmelze nicht an der Druckgussform haftet. Zusätzlich wird in dieser Arbeit der Sensor in der Form platziert. Das Sensorsubstrat aus Aluminium erhält eine eingepresste Unterlegscheibe mit ferromagnetischen Eigenschaften. Dadurch kann der in der Druckgussform eingelassene Magnet das Substrat halten. Der eigentliche Druckguss wird in drei Phasen unterteilt. In der Vorfüllphase wird die Schmelze in den Gießzylinder gefüllt und der Kolben bewegt die Schmelze bis zum Anschnitt der Gießkammer und die verbleibende Luft entweicht über Entlüftungskanäle. In der anschließenden Formfüllphase wird die Schmelze unter hohem Druck und bei hoher Geschwindigkeit durch den Kolben in die Form getrieben. Die abschließende Nachdruckphase sorgt dafür, dass flüssige Schmelze während der Erstarrung und des Schrumpfs nachfließt. Durch die Nachverdichtung wird die Bildung von Hohlräumen, auch Lunkern genannt, vermindert. Im Druckguss muss die Form so konstruiert sein, dass der Sensor vollständig in der Form gekapselt ist, bevor die Schmelze eingeschossen wird. In der Abbildung 18 sind die drei Phasen schematisch dargestellt.

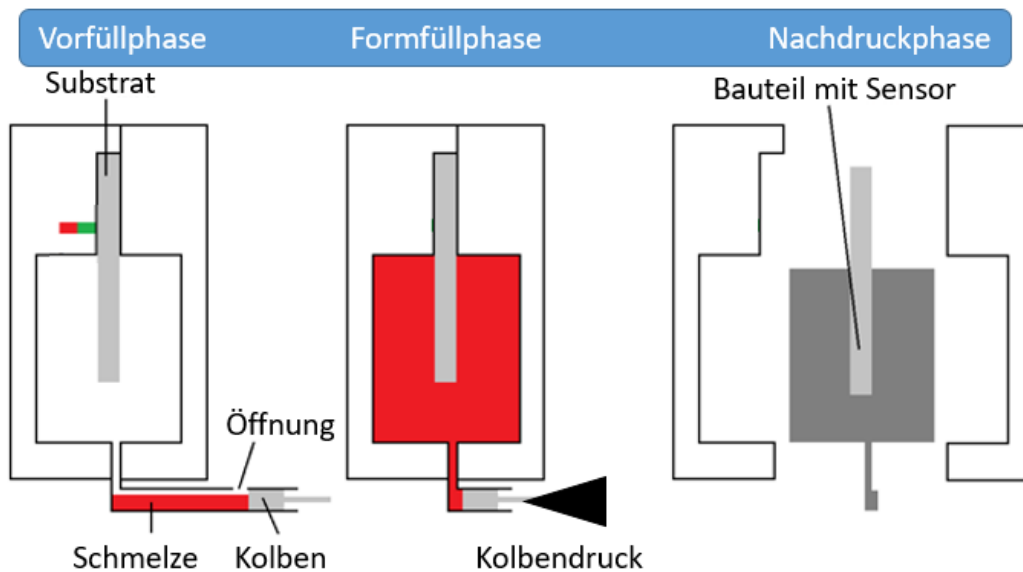


Abbildung 18: Darstellung des Aluminiumdruckgusses in drei Phasen, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [5]}

Der Druckguss stellt höhere Anforderungen an die mechanische Festigkeit der einzubettenden Sensoren. Die einströmende Schmelze trifft mit einer hohen kinetischen Energie auf den Sensor. Die Kraft auf das Sensorsubstrat der einströmenden Schmelze ist dabei abhängig von der verwendeten Kolbengeschwindigkeit sowie dessen Beschleunigung. Die kinetische Energie der Schmelze kann zur Verformung des Substrates führen. Obstruktiv für die Positioniergenauigkeit des Sensors ist das durch die steigende Substrattemperatur abnehmende E-Modul während der Formfüllung. Der Druckguss zeichnet sich durch eine aktive Temperierung der Form aus, dadurch wird das Bauteil innerhalb von 10 Sekunden auf unter 500 °C gekühlt. Die Temperatur der Schmelze während der Formfüllung kann ebenfalls geringer gehalten werden als im Kokillenguss, da die Formfüllung in kurzer Zeit bei hohem Druck erfolgt. Eine erhöhte Temperatur der Schmelze zur Vermeidung von Fehlern während der Formfüllung durch eine vorzeitige Erstarrung der Schmelze ist nicht notwendig. Eine Übersicht zur Einschätzung der Gussverfahren ist in Tabelle 2 zu sehen. Für die Sensorintegration ist im Kokillenguss das Temperatur-Zeit-Budget herausfordernd. Im Druckguss ist durch die einströmende Schmelze eine hohe Kraftereinwirkung auf das Substrat und die damit einhergehende Gefahr der mechanischen Verformung herausfordernd.

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Gussverfahren zur Einschätzung der Belastung des Sensors

	Kokillenguss	Druckguss
Maximale Temperatur	750 °C	Ca. 700 °C
Zeit über 500 °C	Mehr als 1 Minute	Weniger als 10 Sekunden
Mechanische Belastung	Gering	Hoch
Druck	atmosphärischer Druck	Bis zu 1200 bar
Einsatzgebiet	Hohe Maßhaltigkeit Serienfertigung	Bauteile mit glatten Oberflächen; geringe Wandstärken bis zu 1 mm; Massenproduktion
Vor- / Nachteile	Geringe kinetische Lastaufnahme durch Schmelze, dafür höhere Temperaturen	Geringere Temperatur für kürzere Zeit, dafür höhere kinetische Last durch Schmelze bei höherem Druck

3.4. Aluminiumlegierungen

Neben dem Gussverfahren selbst hat auch die verwendete Aluminiumlegierung einen Einfluss auf das Ergebnis der Einbettung. Der Schmelzpunkt von reinem Aluminium liegt bei 660 °C und kann durch Legierungsbestandteile gesenkt werden. Für technische Bauteile werden der Aluminiumschmelze weitere Elemente zugefügt, um gewünschte Eigenschaften wie eine verbesserte Fließfähigkeit oder eine höhere Zugfestigkeit zu erzielen. Eine häufig verwendete Legierung für den Kokillenguss ist AlSi12. Bei ca. 12 % Siliziumanteil ist das Eutektikum mit einem Schmelzpunkt von ca. 576 °C erreicht. Durch die Zugabe von Silizium wird die Schmelze fließfähiger, dadurch können kleinere und feinere Strukturen in der Gussform ausgefüllt werden. Übereutektische Legierungen mit einem Siliziumanteil von bis zu 25 % führen zu einem geringeren CTE sowie einer erhöhten Verschleißfestigkeit. Durch die Zugabe von Kupfer wird z. B. die Korrosionsbeständigkeit verringert, die Zerspanbarkeit wird jedoch verbessert und die Festigkeit wird erhöht. Legierungen mit Silizium und Magnesium bieten die Möglichkeit zur anschließenden Wärmebehandlung um eine erhöhte Festigkeit durch Magnesiumsilizid-Verbindungen zu erzielen. Durch die Zugabe von Titan und Bor wird die durchschnittliche Korngröße verringert, dies führt zu einer erhöhten Festigkeit. In Druckguss-Legierungen ist oft ein geringer Anteil Eisen oder Mangan vorhanden, um die Anhaftung an der Gussform zu verhindern. Eisen senkt die Bruchdehnung und Festigkeit; Mangan weist diese negativen Eigenschaften nicht auf, ist

dafür jedoch teurer. In der folgenden Tabelle 3 ist eine kurze Übersicht zur Funktion der Legierungsbestandteile aufgeführt.

Tabelle 3: Funktion der Legierungsbestandteile in Gusslegierungen

Bestandteile	Fließfähigkeit	Festigkeit	Bruchdehnung	Wärmebehandlung	Geringere Anhaftung
Silizium	+	+	+		
Silizium & Magnesium	+	+	+	+	
Kupfer		+			
Eisen		-	-		+
Mangan					+

Die Firma Tesla Incorporated (www.tesla.com) hat ein Patent auf eine AlSi7-Legierung mit weiteren Legierungsbestandteilen von unter 1 % angemeldet [38]. Die Legierung ist speziell auf den Druckguss für strukturelle Komponenten wie das Fahrzeugchassis abgestimmt, weist eine Festigkeit von 130 MPa und bedarf keiner anschließenden Wärmebehandlung. Die Bestrebung liegt hier auf der Reduzierung von Bauteilen und Arbeitsschritten durch den Druckguss größerer Verbundstrukturen. So wird ca. ¼ des Chassis aus vormals 171 einzelnen Teilen und 1.600 Schweißnähten des Model 3 durch zwei Druckgussbauteile im Model Y ersetzt. Der Trend geht hier zu komplexeren und intelligenteren Bauteilen bei gleichzeitiger Minimierung von Arbeitsschritten.

3.5. Mechanische und thermische Einflüsse

Eine Eigenschaft von Aluminium ist der sogenannte Schrumpf, beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand verringert sich das Volumen von Aluminium um ca. 6 % und die Dichte nimmt dementsprechend zu. Einzubettende Sensoren können durch den Schrumpf mechanisch unter Spannung gesetzt werden. Der Schrumpf ist eine der Ausfallursachen von Sensoren, die gießtechnisch eingebettet werden. Durch den Schrumpf können außerdem sogenannte Lunker entstehen; während der Erstarrung bilden sich Stellen in der Gussform aus, welche nicht ausreichend mit Schmelze gespeist werden können. Dort, wo nachfließendes Metall fehlt, können sich Lunker bilden. Vom Schrumpf abzugrenzen ist der Begriff der Schwindung, welcher eine alternative Darstellung des CTE ist und im Bereich der Gießereitechnik verwendet wird.

Neben der Differenz des CTE zwischen dem Sensor und der Gussmatrix ist auch die Differenz im CTE der verwendeten Sensormaterialien untereinander zu beachten. Das Substrat des Sensors wird während der Einbettung durch die flüssige Schmelze erhitzt und dehnt sich entsprechend dem CTE des Substrates aus. Durch die Differenz im CTE zwischen dem Substrat und den verwendeten Materialien für den Sensor entstehen mechanische Spannungen. Wenn die mechanischen Spannungen zu groß sind, kann es zur Beschädigung oder zum Ausfall des Sensors kommen. Als Ausfallursachen können unter anderem Risse, Abplatzungen oder Haftungsprobleme genannt werden. Festgestellt werden kann ein ausgefallener Sensor beispielsweise durch den Isolationsverlust oder die Unterbrechung des piezoresistiven Widerstandes.

Im Anschluss an die Einbettung ist der Sensor der Belastung des Bauteils ausgesetzt. Je nach Positionierung des Sensors und in Abhängigkeit vom Belastungsfall treten unterschiedliche Belastungen auf. Eine geringere mechanische Belastung am Sensor tritt auf, wenn der Sensor in der Nähe der neutralen Faser zur Belastungsrichtung positioniert ist. Wird der Sensor einachsiger Zug belastet, ist der Sensor derselben Belastung ausgesetzt wie das Bauteil. Durch abweichende E-Module oder eine unterschiedliche Temperaturleitfähigkeit zwischen Substrat und Gussmatrix kann es zu einer Schwachstelle im Bauteil kommen. Generell sollte das Substrat den Eigenschaften der Gussmatrix nah kommen, um eine geringere Schwachstelle zu erzeugen. Da der Sensor abweichende Materialien zur Gusslegierung aufweist, sind folgende Designrichtlinien anzustreben: Das Substrat sollte möglichst dünn sein und ein vergleichbares oder geringeres E-Modul als die Gussmatrix aufweisen [39].

3.6. Anbindung der Sensoren an die Gussmatrix durch Stoffschluss

Eine gute Anbindung des Sensors an die Gussmatrix kann durch Stoffschluss erfolgen. Verhindert wird dies zum Aluminiumsubstrat des Sensors durch eine native Aluminiumoxidschicht. Papis hat 2008 das Konzept einer Zinkbeschichtung der Aluminiumsubstrate nach vorheriger Entfernung der Aluminiumoxidschicht veröffentlicht. In einem galvanischen Prozess wird Zink stoffschlüssig mit dem Aluminiumsubstrat verbunden. Im Kontakt mit flüssigem Aluminium wird das Zink durch den niederen Schmelzpunkt von ca. 420 °C teilweise flüssig und kann sich mit der Gussmatrix verbinden. Exemplarisch ist unterhalb in der Abbildung 19 die Benetzung eines Aluminiumsubstrates mit Aluminium zu sehen. Unbehandelt verhindert die native Oxidschicht den Stoffschluss. Durch die Entfernung der nativen Oxidschicht und das Aufbringen einer dünnen Zinkbeschichtung kann der Stoffschluss erfolgen [40].

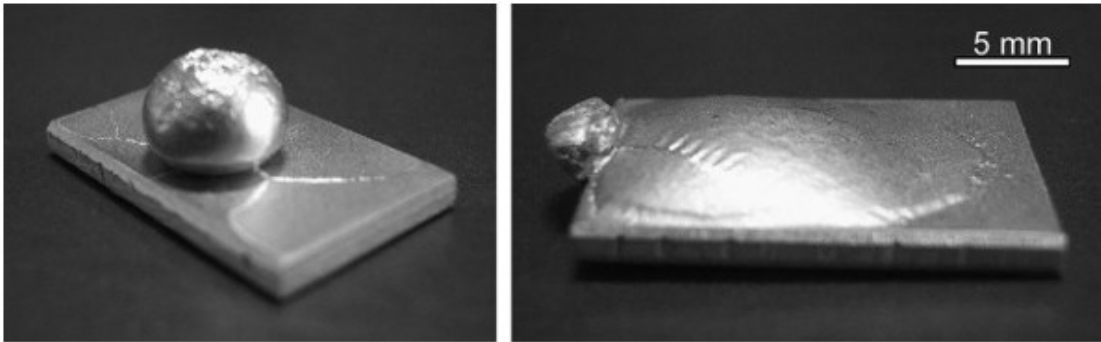


Abbildung 19: Benetzungsverhalten von Aluminium auf Aluminium, links keine Benetzung aufgrund der nativen Aluminiumoxidschicht, rechts ein gutes Benetzungsverhalten durch eine dünne Schicht aus Zink [40].

Für einen Stoffschluss im Druckguss ist die Dicke der Zinkschicht entscheidend. In Untersuchungen wurden dicke Schichten über 10 μm im Druckgussprozess flüssig und vollständig abgetragen oder führten in anschließenden mechanischen Tests zu einer spröden Verbindung. Probleme, die hierbei außerdem auftreten können, sind Heißrisse zwischen Substrat und Gussmatrix. Ein Heißriss entsteht, wenn die Gussmatrix unterhalb von 600 °C vom flüssigen in den festen Zustand übergeht, das Zink jedoch noch flüssig ist. Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand verkleinert sich das Volumen des Zinks und haftet sowohl am Substrat als auch an der Gussmatrix an, lässt jedoch einen Spalt durch die Schwindung. Sowohl der Prozess der Verzinkung als auch die Vorbereitung des Substrates für die Verzinkung haben entscheidenden Einfluss auf die Güte der Verbindung [41, 42].

C. Körner hat sandgestrahlte und vorbehandelte Aluminiumsubstrate im Eintauchprozess mit einer $<1 \mu\text{m}$ dicken Schicht verzinkt und anschließend im Druckguss eingebettet. Die stoffschlüssige Verbindung erreicht in Schertests über 2/3 des theoretischen Wertes einer Al99,5-Legierung [43].

Eutektische Verbindungen bieten eine mögliche Alternative zur stoffschlüssigen Anbindung zwischen Substrat und Gussmatrix. Mit Beschichtungen aus Silber, Germanium, Silizium oder Kupfer kann Aluminium eine eutektische Verbindung um 600 °C eingehen. Mit Silber beschichtete und nach der Einbettung bei 570 °C wärmebehandelte Substrate könnten eine gute stoffschlüssige Anbindung durch das Eutektikum erreichen. Wichtig ist hierbei die Vermeidung einer nativen Aluminiumoxidschicht [44, 45, 46].

3.7. Anbindung durch Formschluss

Um eine Kraftübertragung per Formschluss zu erreichen, wurden Gussversuche mit gelöcherten Blechen im Druckguss durchgeführt. Die Bleche sind 1,5 mm dick und wurden mit Bohrungen bis zu einem Durchmesser von 0,3 mm versehen. Die anschließende

Untersuchung hat gezeigt, dass alle Löcher vollständig gefüllt sind. Ein Substratdesign kann dementsprechend um kleine Durchgangsbohrungen ergänzt werden, um einen Formschluss mit der Gussmatrix sicherzustellen. Wenn das Substrat in einer Raumrichtung eine größere Fläche einnimmt und eine thermische Barriere darstellt, können Durchgangsbohrungen auch für einen besseren Wärmefluss sorgen.

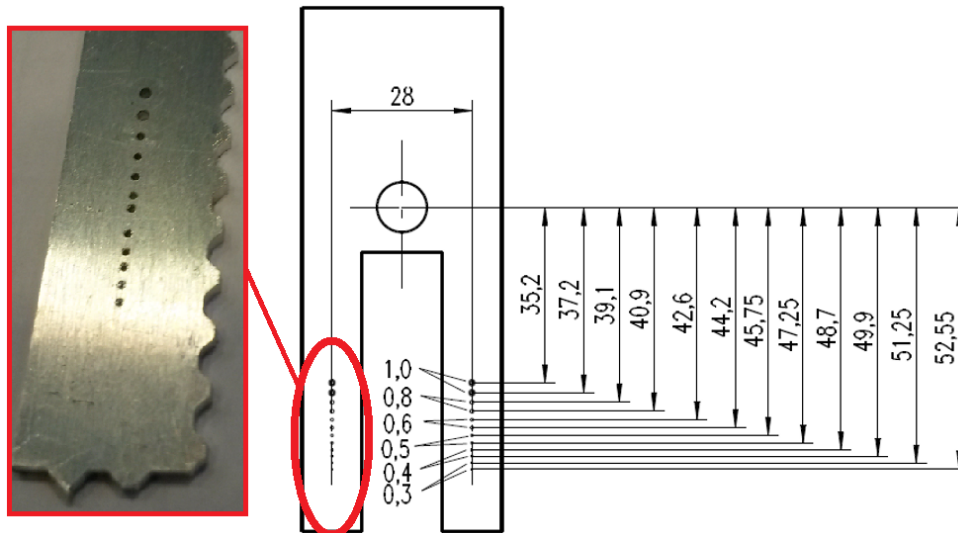


Abbildung 20: Formschlussversuche auf Blech mit abnehmendem Bohrungsdurchmesser auf bis zu 300 µm

Eine alternative Methode, um Formschluss zu erreichen, kann ein angepasstes Design der äußeren Sensorschicht oder die Aufbringung einer zusätzlichen Schicht sein, welche den Kontakt zur Gussmatrix darstellt. Die Kontaktschicht kann durch die Ausgestaltung von Mulden, welche von der Gussmatrix gefüllt werden, für einen guten Formschluss sorgen. Auch die Erweiterung des Siebdruck-Maskensatzes um eine Schicht speziell für eine gute formschlüssige Anbindung ist denkbar. In Abbildung 21 ist im Schliffbild eine wellige Dickschicht zu sehen, welche von der Gussmatrix abgeformt wird.

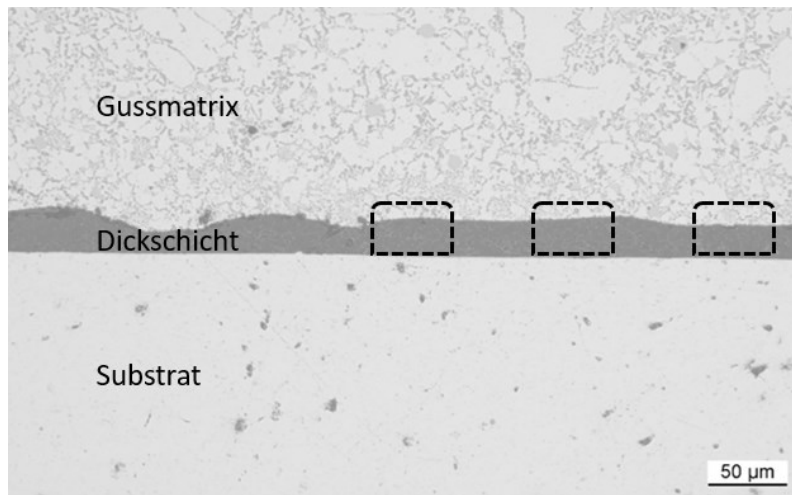


Abbildung 21: Schliffbild eines innerhalb der Arbeit eingebetteten Sensors mit Dickschicht; angedeutet sind druckbare Muster zur Erzeugung einer formschlüssigen Verbindung

Da das Substrat größer als die Sensorstruktur ist, kann durch die Kombination aus einer speziell für den Formschluss strukturierten Sensorschicht sowie einem ebenfalls strukturierten oder perforierten Substrat ein guter Formschluss mit der Gussmatrix ermöglicht werden.

4. Dickschichtsensoren auf Substraten aus Aluminium

4.1. Vorversuche

In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass Dickschichtsensoren auf Substraten aus Aluminium die Einbettung im Druckguss grundsätzlich überleben können [47]. Von den insgesamt 35 Dickschichtsensoren haben 18 die Einbettung überstanden. Mit einer Schutzschicht aus Silikon am Übergang zwischen Kavität und Substrathalterung konnte die Ausbeute von ca. 50 auf 75 % gesteigert werden. Auf Grundlage dieser Vorversuche wurden Dickschichtsensoren hergestellt, um zu untersuchen, ob piezoresistive Dickschichtsensoren zuverlässig und reproduzierbar Dehnung im Aluminium messen können. Innerhalb des Projektes konnte auf eine Druckgussform zurückgegriffen werden, welche es erlaubt, 1,5 mm starke und 40 mm breite Objekte mit einer Länge von bis zu 130 mm einzubetten. Der aus der Kavität ragende Teil ist dabei 60 mm lang. Das verwendete Substrat für diese Sensoren ist daher 1,5 mm dick um die vorhandene Druckgussform nutzen zu können. Dünnere Substrate weisen ein geringeres Widerstandsmoment gegen Verformung auf und können im Druckguss dann verwendet werden, wenn eine für die Einbettung optimierte Druckgussform zur Verfügung steht.

4.2. Genereller Aufbau

Die im Siebdruck hergestellten Dickschichtsensoren bestehen aus mehreren Schichten, welche einzeln nacheinander im Siebdruckverfahren auf das Substrat aus Aluminium gedruckt und eingebrannt werden. Funktional lassen sich die Schichten in Isolator, Leiter und Sensorelement unterteilen. Da das Aluminiumsubstrat elektrisch leitfähig ist, beginnt der Sensoraufbau mit einer Schicht zur elektrischen Isolation. Anschließend erfolgen die funktionalen Schichten aus Leiterbahn und Sensorelement, dazu wird eine elektrisch leitfähige Schicht in Form einer Leiterbahn auf den Isolator gedruckt und mit der Schicht des Sensorelementes verbunden. Da der Sensor in Aluminium eingebettet wird, erfolgt eine weitere Schicht zur elektrischen Isolation des Sensors gegenüber der Gussmatrix. Die oberste Schicht mit Kontakt zur Gussmatrix ist den Kräften im Druckgussprozess während der Einbettung in besonderer Weise ausgesetzt. Einige Sensoren haben daher eine weitere Schicht, die den Kontakt zur Gussmatrix herstellt und den Thermoschock auf den Sensor während der Einbettung verringert. Der generelle Aufbau ist in Abbildung 22 dargestellt.

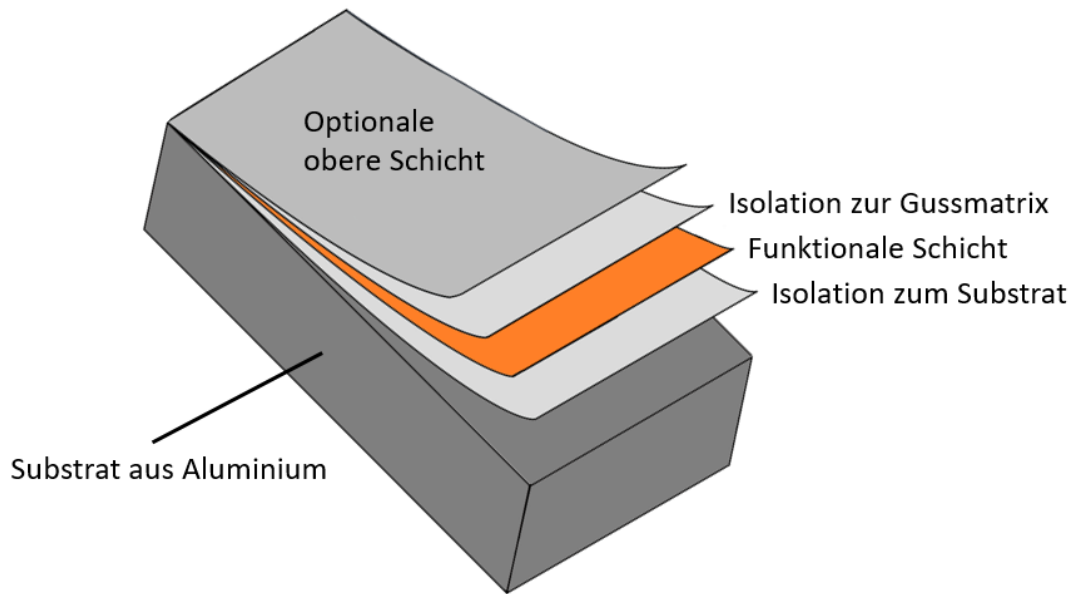


Abbildung 22: Genereller Aufbau der Siebdruckschichten auf dem Substrat, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [5]}

4.3. Herstellung der Sensoren

4.3.1. Ablauf zur Sensorherstellung

Aus dem Sensordesign ergeben sich die verschiedenen Siebdruckmasken, die Substratgeometrie sowie die Halterung für das Substrat im Siebdrucker. Die Substrate müssen auf Defekte wie Kratzer, herausstehende Wülste sowie scharfe Kanten geprüft werden. Die Grundisolation besteht aus drei einzeln gedruckten, getrockneten und gebrannten Schichten der dielektrischen Dickschichtpaste. Anschließend werden jeweils einzeln die Leiterbahn sowie der Widerstand als Sensorelement gedruckt, getrocknet und gesintert. Abschließend erhält der Sensor durch weitere Schichten der dielektrischen Paste, welche schon zur Grundisolation verwendet wurde, die notwendige Schicht zur elektrischen Isolation des Sensors gegenüber der Gussmatrix. Die Prozessschritte zur Herstellung der Sensoren aus Dickschichtpasten im Siebdruck werden in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 23: Siebdruckprozess in der Übersicht

4.3.2. Siebdruck

Im Siebdruck wird eine Paste mit einer Rakel durch ein strukturiertes Sieb auf das zu bedruckende Substrat gepresst. Zwischen dem zu bedruckenden Substrat und dem Sieb besteht ein Abstand von 0,5 bis 2 mm, welcher als Absprung bezeichnet wird. Das Sieb wird durch die Rakel elastisch verformt und berührt während des Druckens das Substrat; dadurch kann sich die Paste auf dem Substrat anlagern. Wenn die Rakel nach dem Auftragen der Paste das Sieb wieder entlastet, geht das Sieb in die Ausgangslage und stellt den Absprung wieder her. Die Paste befindet sich nun auf dem Substrat.

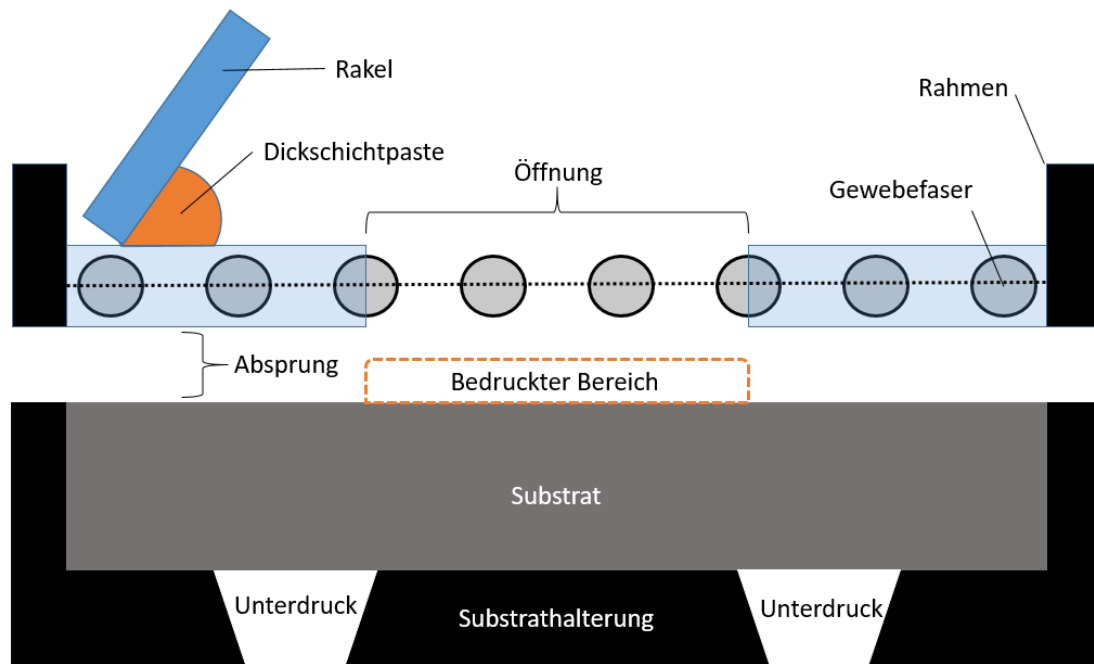


Abbildung 24: Aufbau Siebdruckprozess

Die Substrathalterung hat auf der Unterseite einen Anschluss, um die Substrate per Unterdruck in der Halterung zu positionieren. Die Schichtdicke sowie auch die Auflösung des Druckbildes kann durch die Eigenschaften des Siebes beeinflusst werden. Ein Sieb aus Stahl- oder Kunststofffasern unterscheidet sich unter anderem in der Anzahl der Fäden pro Zoll, der Emulsionsdicke sowie dem Öffnungsgrad. Klassisch sind Siebe mit einem Fotopolymer beschichtet, durch UV-Licht lässt sich die Beschichtung in Verbindung mit einer Maske selektiv härten und freibleibende, nicht belichtete Strukturen lassen sich auswaschen. Der Öffnungsgrad ist eine Kennzahl, welche die durchlässige Fläche in % angibt. Durch die Dicke der Emulsion, den Sieböffnungsgrad sowie die Fadenstärke kann das verdruckte Volumen sowie die Schichtdicke der zu druckenden Schicht beeinflusst werden.

4.3.3. Trocknung

Nach dem Aufbringen der Paste auf dem Substrat nivellieren die im Projekt verwendeten Pasten acht Minuten. Beim Nivellieren werden durch die Siebstruktur eingebrachte Unregelmäßigkeiten durch ein Verfließen der Paste verringert. Nach dem Nivellieren erfolgt das Trocknen der Paste bei einer Spitztemperatur von 150 °C für einen Gesamtzeitraum von mindestens 15 Minuten, um Lösemittel aus der Paste zu entfernen. Das Trocknungsprofil ist in der folgenden Abbildung 25 dargestellt.

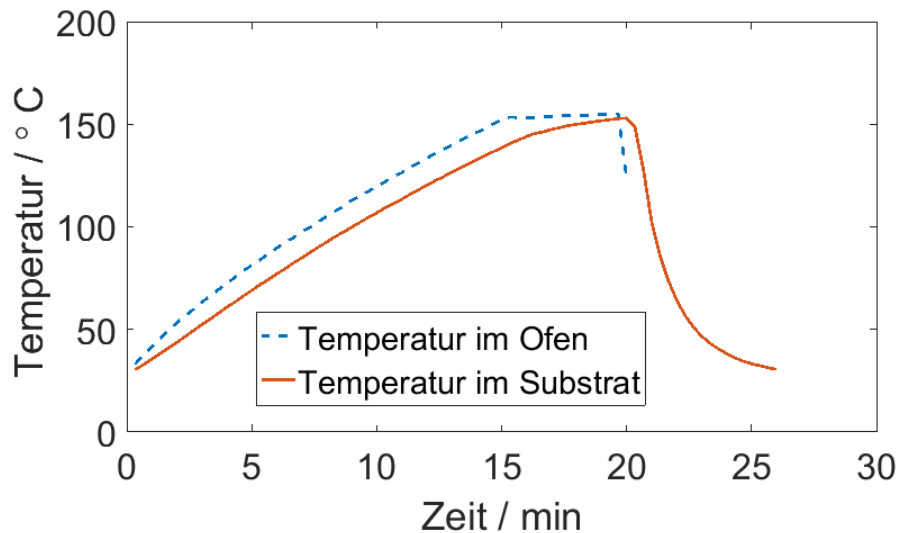


Abbildung 25: Temperaturprofil der Trocknung

Im Anschluss wird die getrocknete Paste auf dem Substrat in einem Durchlaufofen nach einem vorgegebenen Temperaturprofil eingebrannt.

4.3.4. Sinterprozess

Das Einbrennen der Dickschichtpaste erfolgt mit einem Durchlaufofen, welcher sieben Temperaturzonen besitzt. Das Temperaturprofil ist so eingestellt, dass das Substrat für ca. 15 Minuten einer Temperatur oberhalb von 150 °C und in der Spitze zwei Minuten über 550 °C ausgesetzt ist. So verbrennen erst alle organischen Stoffe und die Paste verbindet sich mit dem Substrat während der Spitzentemperatur. Das Sinterprofil für die dielektrische Paste kann der Abbildung 26 entnommen werden. In der Abbildung ist eine Messung mit einem Temperatursensor auf der Laufkette sowie eine Messung in einem Substrat dargestellt. Für die Messung im Substrat wurde ein Temperaturfühler in einen 1 cm tiefen Bohrkanal eingelassen.

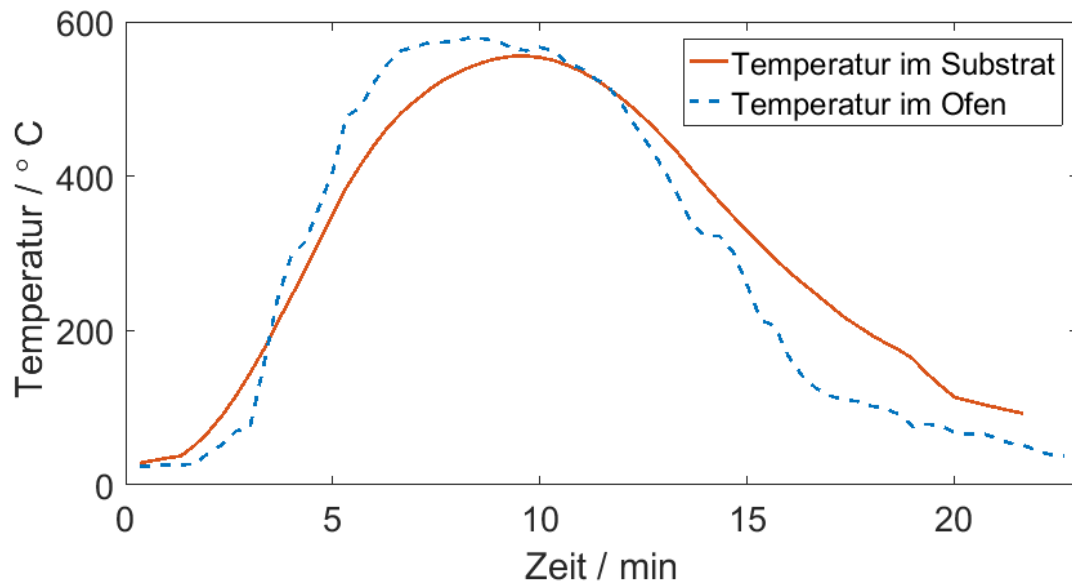


Abbildung 26: Temperaturprofil des Sinterprozesses

Verschiedene Durchlaufgeschwindigkeiten und Anpassungen der Temperaturzonen wurden getestet, zu schnelle Abkühlraten und kürzere als im Temperaturprofil aus Abbildung 25 dargestellte Durchlaufzeiten führen zur Delamination der Dickschicht. Eine längere Durchlaufzeit bietet keine erkennbaren Vorteile. Da die Substrate mit den Abmessungen 100 x 40 x 1,5 mm eine große Oberfläche bieten und insgesamt eine geringe thermische Kapazität aufweisen, weicht die Temperatur im Substrat nur geringfügig von der Temperatur im Ofen ab.

4.4. Sensordesign und Zusammensetzung

Der Sensor mit Schichtaufbau inklusive der Schichtdicke wird im Folgenden erläutert. Der Sensor ist ca. 150 μm dick und besteht aus acht im Siebdruck aufgetragenen Dickschichten. Zur Herstellung der Sensoren sind acht Sintervorgänge notwendig, da jede Schicht einzeln gedruckt, getrocknet und gesintert wird.


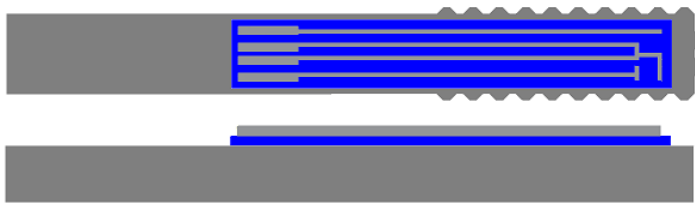
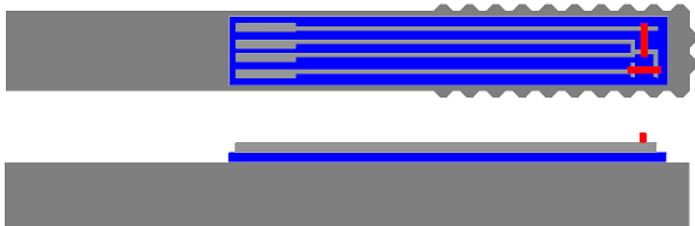
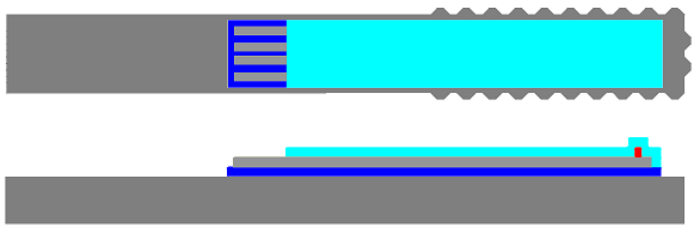
Schichtaufbau in Draufsicht und im Querschnitt	Schicht	Schichtdicke
	3 x 20 μm Grundisolation	60 μm
	16 μm Leiterbahn	76 μm
	10 μm Widerstand	86 μm
	3 x 20 μm Topisolation	146 μm

Abbildung 27: Schichtaufbau der Dickschichtsensoren im Detail

4.4.1. Widerstandselement

Das gedruckte piezoresistive Widerstandselement hat die Abmessungen 0,7 x 4 mm sowie einen zu beiden Seiten der Leiterbahn 0,5 mm überlappenden Teil. Der aktiv freistehende Teil des DMS hat daher eine Abmessung von 3 x 0,7 mm. Die Dicke beträgt 10 μm und wird

durch das verwendete Sieb festgelegt. Der Schichtwiderstand sollte laut Datenblatt in der ausgewählten Geometrie bei ca. 85 Ohm liegen. Durch die Vorversuche ist bekannt, dass die zusätzlichen Topisolationen und damit einhergehende zusätzliche Sinterprozesse zu höheren Ausgangswiderständen führen. Im Median wurde ein Widerstand nach dem Sintern der Topisolation, vor der Einbettung in Aluminium, von 367 Ohm erreicht. Der Ausgangswiderstand ist stark von der Dimensionierung abhängig und unterliegt verschiedenen Einflüssen. Durch die Diffusion von Silberatomen in den Widerstand kann der vorgesehene Schichtwiderstand erst ab einer Länge von 6-7 mm annähernd erreicht werden. Kürzere Widerstände erreichen ihren Schichtwiderstand durch den Einfluss der Diffusion von Silberatomen laut Literatur nicht (siehe Abbildung 28) [48].

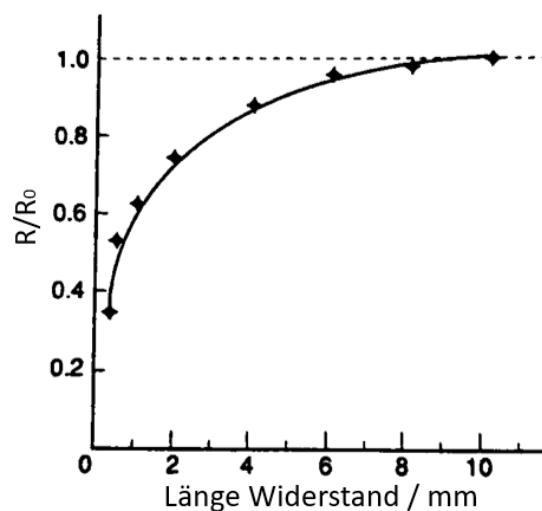


Abbildung 28: Effektiver Schichtwiderstand R in Abhängigkeit der Länge vom Widerstand; R ist normalisiert auf den Schichtwiderstand R_0 bei 10 mm Länge, in Anlehnung an [48]

4.4.2. Leiterbahn

Die im Siebdruck hergestellte Leiterbahn hat nach dem Sintern und der Einbettung einen ca. 1,4-fach höheren Ausgangswiderstand als ein vergleichbarer Leiter aus reinem Silber. Die Differenz erklärt sich durch die größeren Abstände der einzelnen Silberatome gegenüber derselben Geometrie aus Vollmaterial. Die Leitfähigkeit der gesinterten Silber-Dickschichtpaste liegt bei 70 % von Silber-Vollmaterial. Die Leiterbahn macht mit einem absoluten Widerstand von unter 0,3 Ohm weniger als 0,1 % des gesamten Widerstandes aus. Der Siebdruck aus Silber erfüllt die Anforderungen an eine Leiterbahn durch einen sehr geringen Widerstand im Verhältnis zum Widerstand des Sensors. Alternativen zu Silber sind Pasten mit Kupfer, diese müssen unter Schutzatmosphäre gesintert werden; Vorteil ist eine geringere Diffusion gegenüber Silber. Andere Pasten für Dickschichtleiterbahnen bestehen anteilig aus Platin, Gold oder Palladium; dadurch wird ein

größerer Schichtwiderstand möglich. Pasten mit größerem Widerstand werden oft auch als Heizer verwendet.

4.4.3. Entwicklungsstufen

Abbildung 29 zeigt die einzelnen Entwicklungsstufen des Sensors ohne die Topisolation.

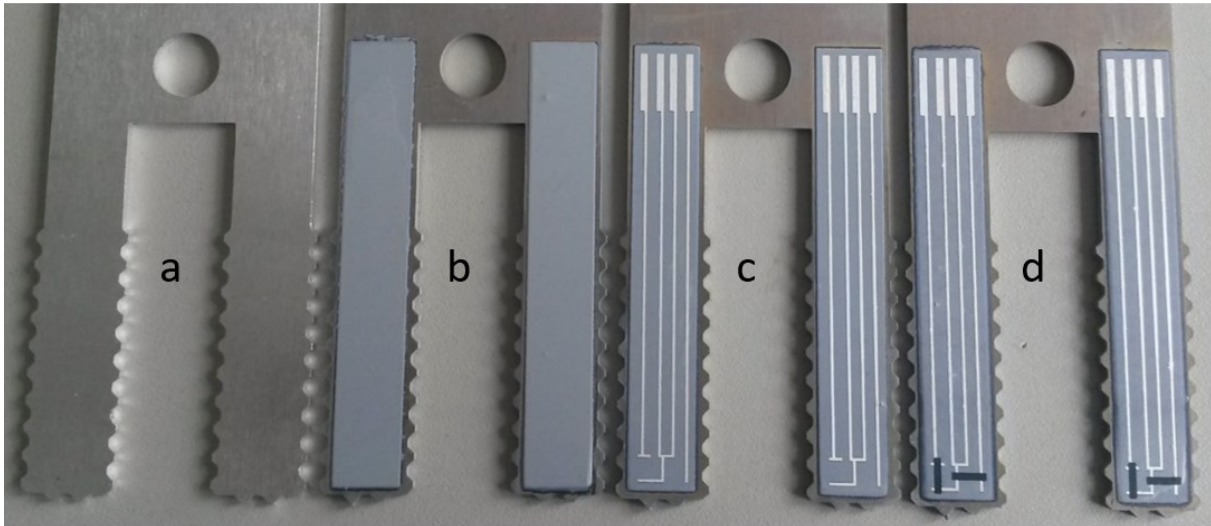


Abbildung 29: Schichtaufbau des Dickschichtensors; (a) Gereinigtes Substrat, (b) Substrat mit drei Schichten Grundisolation, (c) Substrat mit Grundisolation und Leiterbahn aus Silber, (d) Substrat mit Grundisolation, Leiterbahn und Widerstandselement ohne Topisolation

Abschließend wird die Topisolation aufgebracht und gesintert, dann wird eine eisenhaltige Unterlegscheibe in die Aussparung gepresst. Die Unterlegscheibe wird in Verbindung mit einem innerhalb der Gussform integrierten Magneten als Positionierhilfe für die Substrate genutzt. Abbildung 30 zeigt einen Dickschichtsensor mit Topisolation und eingepresster Unterlegscheibe vor und nach der Einbettung sowie ein abschließend zum Probenkörper verarbeitetes Bauteil für Biegeversuche. Für den Druckguss wurde eine AlSi10MgMn (Silafont-36) Legierung verwendet [49].

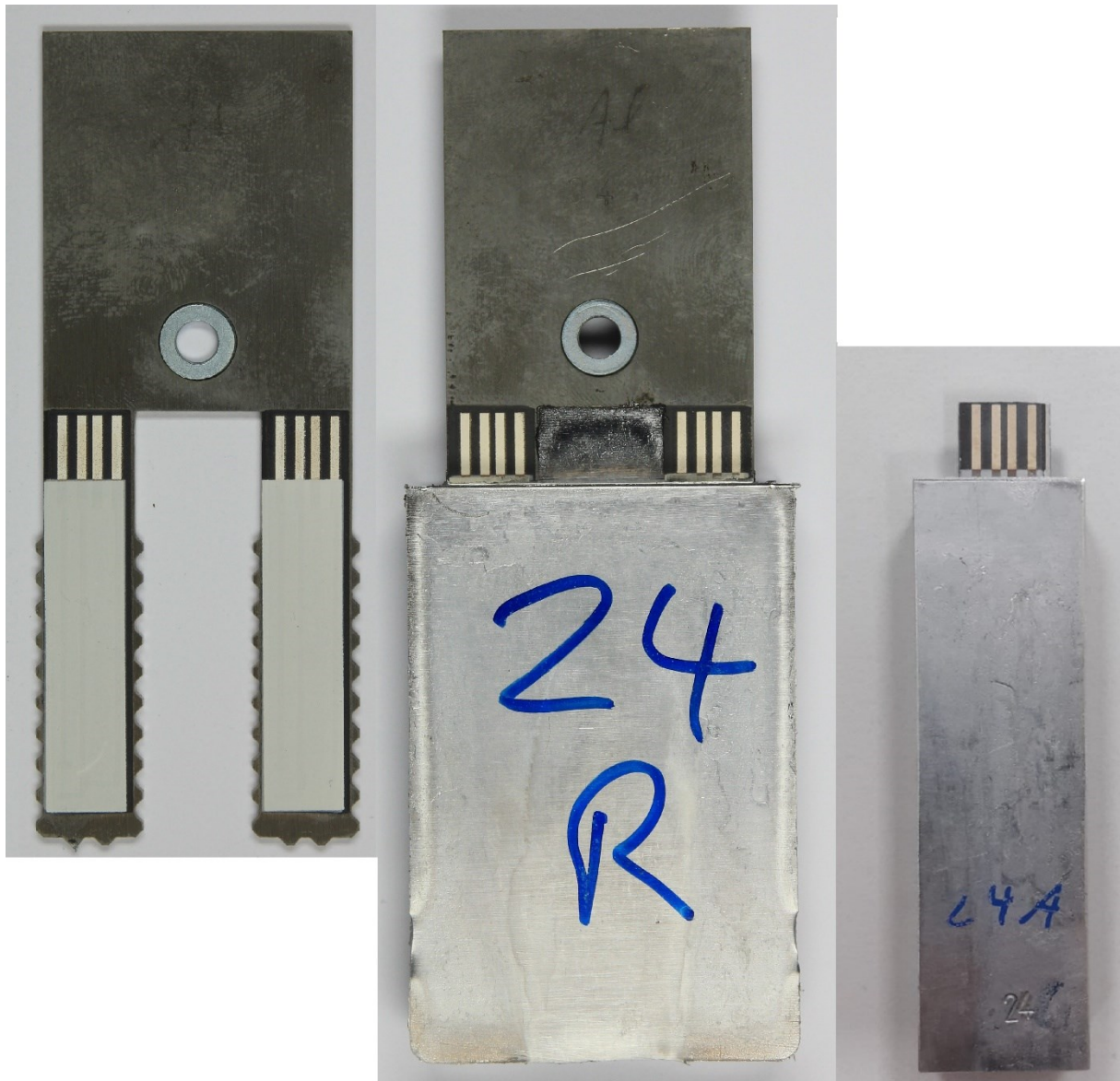


Abbildung 30: Vom Sensor zum sensorischen Bauteil: für die Einbettung wurde eine „Bühler SC N/66“ Kaltkammer Druckgussmaschine verwendet

4.4.4. Zusammensetzung der Dickschichtpasten

Die verwendeten Siebdruckpasten der Firma Heraeus sind speziell auf Aluminiumsubstrate angepasst und weisen eine Sintertemperatur von unter 600 °C auf [50]. Die Zusammensetzung der Heraeus Celcion Dickschichtpasten: IP 6075 [51] zur elektrischen Isolation, C8829D [52] zur Verwendung als Leiterbahn sowie die HTR12020AR [53] zur Verwendung als piezoresistives Widerstandselement ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Werte stammen aus einer EDX-Analyse in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM).

Tabelle 4: Zusammensetzung der verwendeten Dickschichtpasten aus EDX-Analyse

IP 6075 Isolation		C8829D Leiterbahn		HTR12020AR Widerstand	
Element	Masse %	Element	Masse %	Element	Masse %
Sauerstoff	38,25	Silber	89,88	Ruthenium	36,85
Titan	16,39	Kohlenstoff	5,79	Bismut	32,38
Kohlenstoff	12,26	Sauerstoff	4,07	Calcium	14,92
Silizium	10,2	Aluminium	0,25	Sauerstoff	10,92
Natrium	7,57			Silicium	1,76
Kalium	5,55			Zink	1,35
Bismut	3,4			Kalium	1,33
Calcium	2,72			Aluminium	0,5
Strontium	1,58				
Zink	1,29				
Phosphor	0,48				
Aluminium	0,3				

Die Heraeus Celcion HTR12020AR Dickschichtpaste zur Herstellung von Widerständen besteht laut EDX-Analyse zu großen Teilen aus Ruthenium und Bismut. Rutheniumoxid wird in Dickschichtpasten vielfach verwendet, da es als Widerstand eine hohe Stabilität und relativ hohe Leitfähigkeit gegenüber anderen Oxiden bietet. Vor allem jedoch bietet Rutheniumoxid in der Glasmatrix von Dickschichtpasten reproduzierbare Ergebnisse, weswegen es hauptsächlich in der klassischen Dickschichttechnik zum Einsatz kommt.

Weiterhin wurde die Paste RR-41 der *Tanaka Kikinzoku International* Gruppe mit einem dehnungsabhängigen K-Faktor lt. Datenblatt von 10-20 auf der IP 6075 Dickschichtisolation getestet [54]. Leider konnten diese Pasten nicht mehrere Sintervorgänge überstehen. Diese Paste kommt unter anderem unter den Sitzschalen in PKW als Personenerkennung für die Anschnallwarnung zum Einsatz.

4.5. Sensorcharakterisierung

4.5.1. Widerstandsänderung durch Einbettung

Mit diesen Dickschichtpasten wurden insgesamt über 120 Sensoren auf drei verschiedenen Substratmaterialien im manuellen Siebdruck hergestellt und eingebettet. Als Substratmaterial wurden eine AlMg₃, eine AlMg₁, sowie eine 1.4301 Stahl-Legierung gewählt. Die größere Menge an Sensoren bzw. Proben wurde unter anderem dazu genutzt festzustellen, wie sich verschiedene Substrate in Dauerschwingversuchen auf die mechanischen Eigenschaften der

Bauteile auswirken. In Abbildung 31 ist der Widerstand von Sensoren auf AlMg3 Substraten vor und nach der Einbettung im Druckguss dargestellt. Der Median von insgesamt 67 Sensoren auf AlMg3-Substraten liegt bei 367 Ohm vor der Einbettung und steigt um den Faktor 2,37 auf 872 Ohm nach der Einbettung.

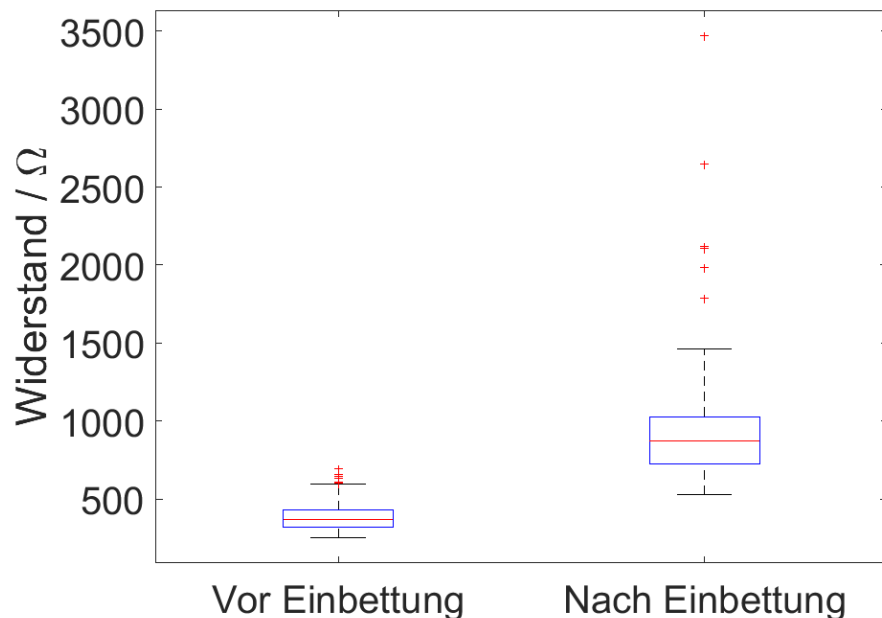


Abbildung 31: Widerstandsänderung durch die Einbettung der Sensoren im Druckguss in der Darstellung als Boxplott; die rote Linie stellt den Median dar, der Kasten begrenzt nach unten das erste und nach oben das dritte Quartil der Messwerte (Sensoren ab einem Widerstand über 3500 Ohm gelten als defekt)

4.5.2. Temperatur

Der TCR dieser Dickschichtsensoren, welche als Hauptbestandteil Bismut und Ruthenium enthalten, ist ca. eine Potenz geringer als der von Metallen und weist eine große Streuung auf. Sowohl der absolute Ausgangswiderstand als auch der TCR ändern sich durch den Einfluss von Temperatur. Widerstandsänderungen werden bei Dickschichtpasten wie Ruthenium durch Oberflächeneffekte an den Korngrenzen hervorgerufen. Zusätzliche Einbrennvorgänge im Ofen sowie die Einbettung im Druckguss oder Kokillenguss führen zu einer Steigerung des absoluten Ausgangswiderstandes und einer Verminderung des TCR. In Abbildung 32 ist das Ergebnis der thermischen Charakterisierung vor und nach Einbettung eines Sensors im Aluminiumguss dargestellt. Der ermittelte TCR vor der Einbettung sinkt von $\alpha_{20\text{ }^\circ\text{C}} = 0,682 \text{ E-3 K}^{-1}$ auf $\alpha_{20\text{ }^\circ\text{C}} = 0,348 \text{ E-3 K}^{-1}$.

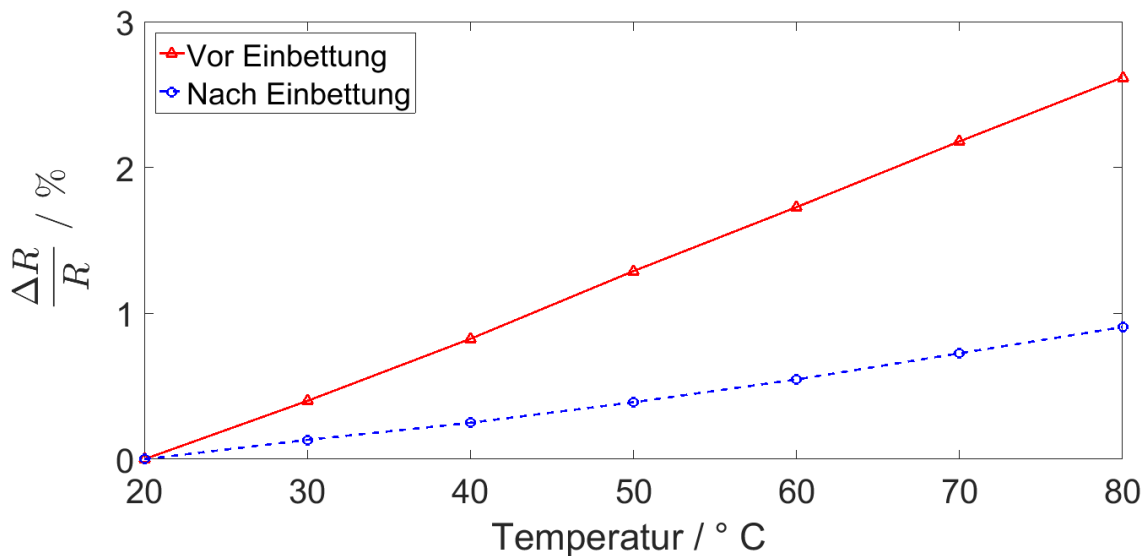


Abbildung 32: Veränderung eines TCR durch die Einbettung

4.5.3. Brucherkennung mit eingebettetem Sensor

Ein im manuellen Siebdruck hergestellter und anschließend im Druckguss eingebetteter Sensor auf einem Substrat aus AlMg3 wird in einem Dauerschwingversuch mechanisch belastet. In diesem Dauerschwingversuch wird das Bauteil bei einer Mittenlast von 5000 N mit einer Amplitude von 3000 N belastet. Dazu wurde eine DYNA-MESS TP 10 HF Prüfmaschine verwendet. Die maximale Last am Bauteil beträgt 164,5 N/mm², die minimale Last beträgt 41,1 N/mm². Da der Sensor nahe der neutralen Faser positioniert ist, wird dieser mit 15 bis 60 N/mm² belastet. Bei einer Frequenz von 2 Hz läuft der Versuch bis zum Versagen des Bauteils. Die Widerstandsänderung des Sensors wird mit einer Brückenschaltung und 500-facher Verstärkung aufgezeichnet. Weiterhin wird die Raumtemperatur mit einem PT1000 im Schutzraum der Prüfmaschine nahe der Probe erfasst.

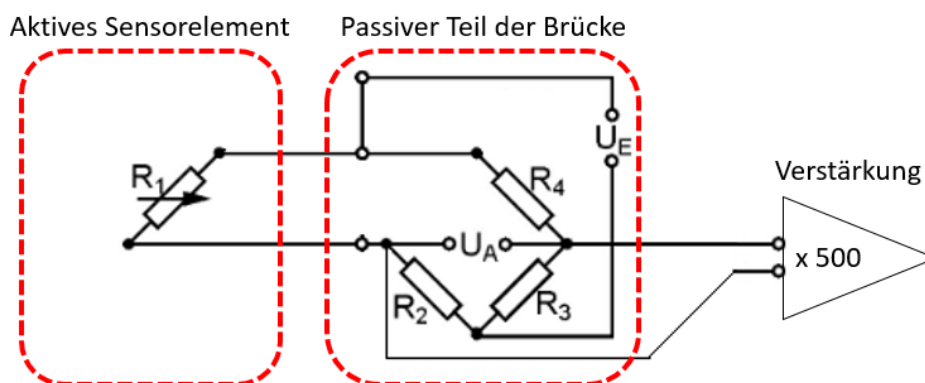


Abbildung 33: Verwendete Schaltung für den Versuch, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [5]}

In Abbildung 34 ist die 3-Punkt-Biegeauflage inklusive des Stempels der Prüfmaschine mit eingespanntem Druckguss-Bauteil und integriertem Dickschichtsensor dargestellt.

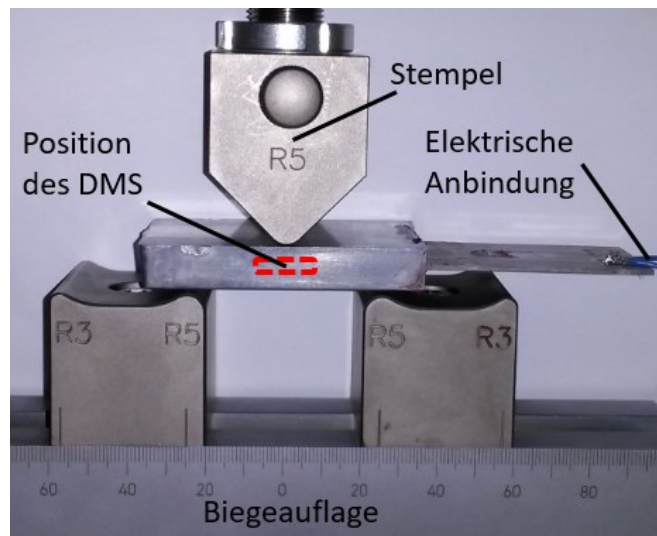


Abbildung 34: Eingebetteter Sensor auf dem Prüfstand im 3-Punkt-Biegeversuch

Das Bauteil wird einer Druckschwelllast ausgesetzt. Zu Beginn des Versuches arbeitet sich der Stempel in die Gussprobe. Dann ist der Weg des Stempels für ca. 500.000 Lastwechsel stabil, die Mikrorisse und Versetzungsbewegungen im Material sind gering. Zwischen 500.000 und 600.000 Lastwechseln verändert sich die Brückenspannung, während der Weg des Stempels gleichbleibend ist. Die Änderung der Brückenspannung lässt sich durch eine Änderung der Temperatur im Schutzraum der Prüfmaschine erklären. Gegen Ende der Prüfung bei rund 700.000 Lastwechseln und einer fortschreitenden Einschnürung der Gussmatrix findet die größte Änderung in der Brückenspannung statt. Unter der Einschnürung versteht man die abnehmende Querschnittsfläche einer lastaufnehmenden Struktur. Auf der Unterseite der Probe vollziehen sich vereinzelt Mikrorisse und die Kraft muss über einen geringeren Querschnitt aufgenommen werden. Durch den abnehmenden Querschnitt bei konstanter Prüfkraft verstärkt sich der Vorgang und das Bauteil versagt. Während der Einschnürung wird der eingebettete Sensor stark gestaucht und die Brückenspannung ändert sich.

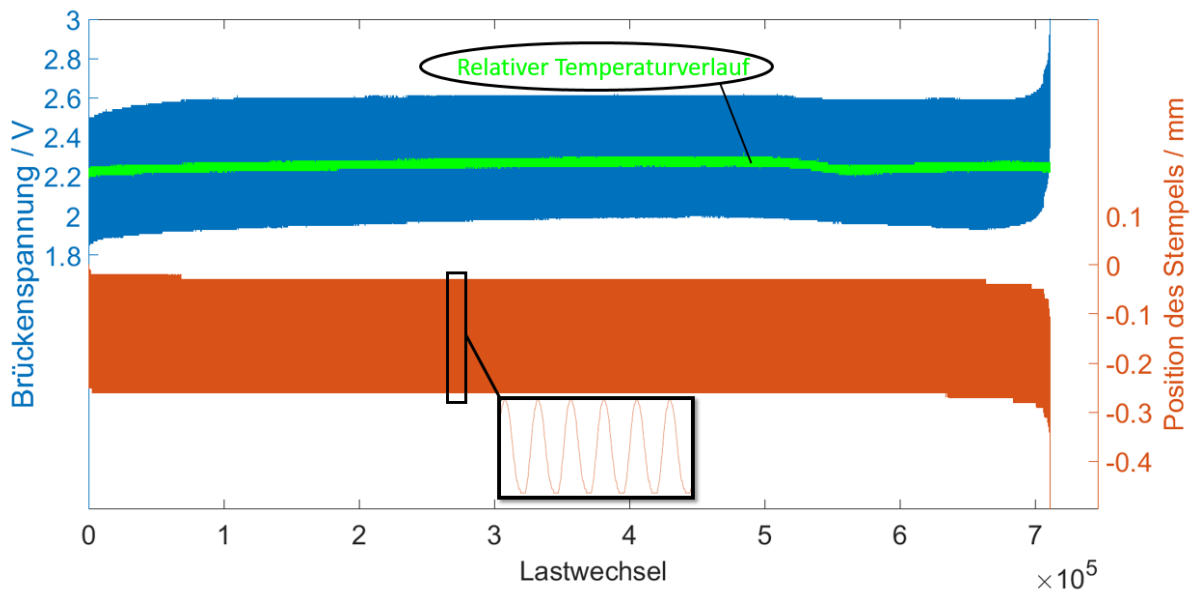


Abbildung 35: Gesamter Verlauf von über 710.000 Lastwechseln im 3-Punkt-Biegeversuch

Die letzten 30.000 Lastwechsel werden in der folgenden Abbildung 36 größer dargestellt. Während der Stempel die Probe weiter durchbiegt, steigt das Signal der Brückenspannung kontinuierlich an und zeigt das Versagen der Gussprobe auf. Der Verlauf im Weg des Stempels ist durch die Auflösung der Prüfmaschine digital auf 0,01 mm begrenzt.

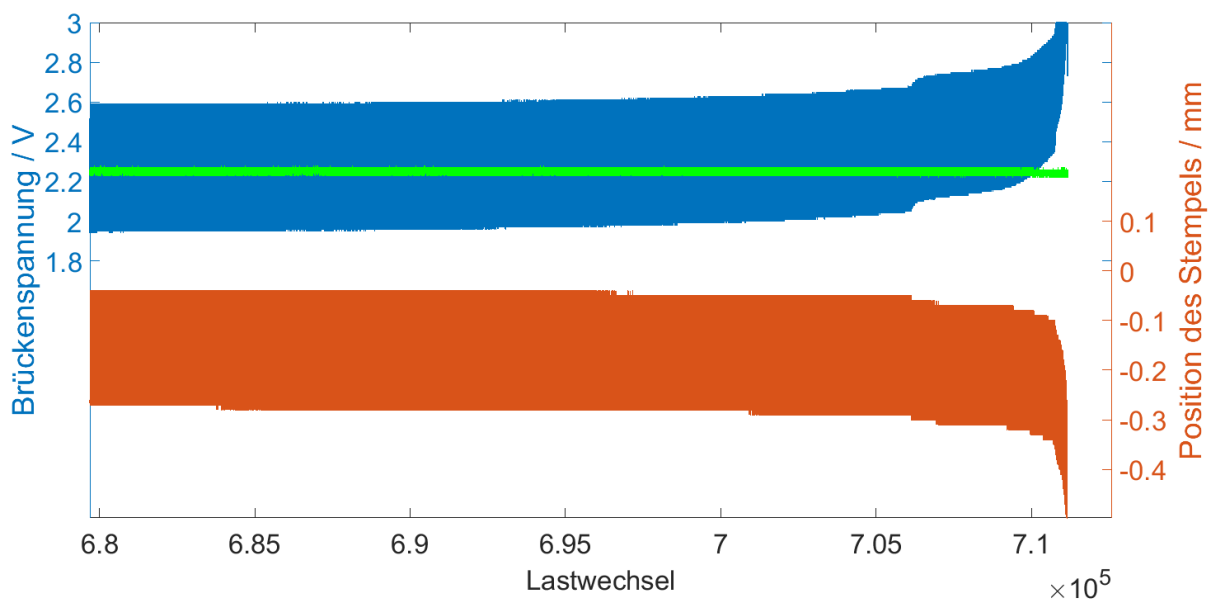


Abbildung 36: Darstellung der letzten 30.000 Lastwechsel vor dem Versagen des Bauteils

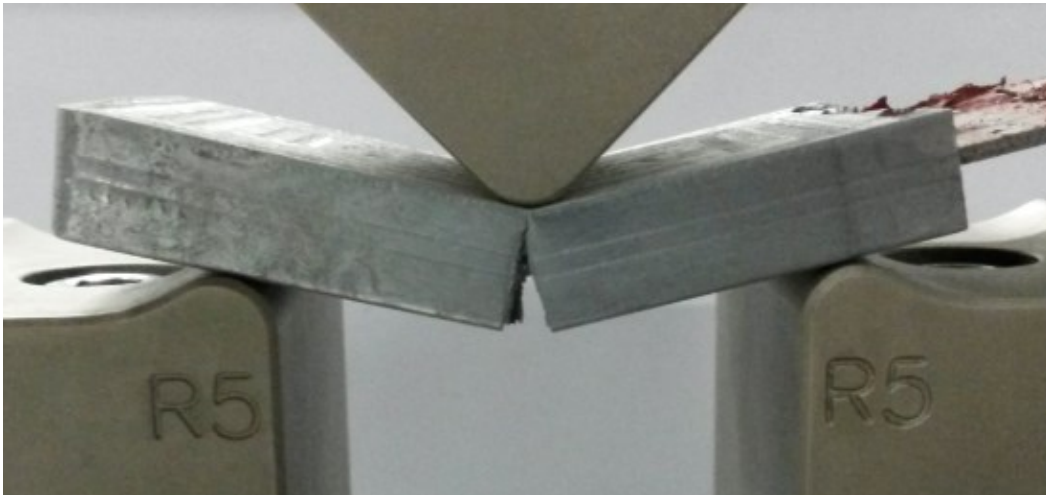


Abbildung 37: Versagen der Gussmatrix am sensorischen Bauteil im 3-Punkt-Biegeversuch

Abschließend konnte durch diese experimentellen Untersuchungen mit Dickschichtsensoren gezeigt werden, dass eine gießtechnische Einbettung von piezoresistiven Sensoren zur Kraftmessung möglich ist. Die im Druckguss nahe der neutralen Faser eingebetteten Dickschicht Sensoren können das Versagen der Gussmatrix aufzeichnen. Der Widerstand der Sensoren ist jedoch im eingebetteten Zustand nicht reproduzierbar und der resultierende TCR schwankt. Eine Temperaturkompensation ist daher nicht durch eine Halb- oder Vollbrücke realisierbar.

4.6. Der Effekt des Fremdkörpers

Um den Effekt des eingebetteten Substrates als Fremdkörper in der Gussmatrix auf die statische und zyklische Belastbarkeit eines Bauteils zu ermitteln, wurden Wöhlerversuche bzw. Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt. August Wöhler (1819–1914) erkannte, dass zyklisch beanspruchte Werkstoffe eine geringere Belastbarkeit aufweisen können als statisch belastete.

Um den Effekt zu untersuchen, wurden präparierte Proben ohne integrierten Sensor aus Vollmaterial mit Proben verglichen, die ein Sensorsubstrat aus Stahl oder Aluminium integriert haben. Die im Wöhlerversuch auf die Probe einwirkende Spannung ergibt sich aus dem Widerstandsmoment W der Probengeometrie, der maximalen Kraft F_{max} des Stempels, sowie der Schenkelweite l_s im Versuchsaufbau.

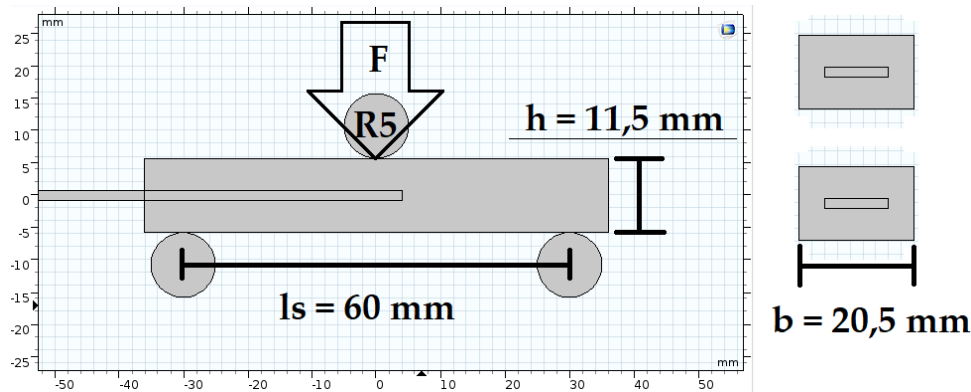


Abbildung 38: Aufbau Dauerschwingversuch mit Probengeometrie

Die Biegespannung σ_b wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_b [MPa] = \frac{F_{max} [N] * l_s [mm]}{4 * W [mm^3]} \quad (22)$$

Mit dem Widerstandsmoment W für eine rechteckige Probengeometrie:

$$W [mm^3] = \frac{b * h^2}{6} \quad (23)$$

Die Maximalspannung auf der Probe beträgt bei einer Schenkelweite l_s von 60 mm, einer Höhe der Probe von 11,5 mm und einer Breite der Probe von 20,5 mm bei einer Kraft des Stempels von 2000 N ca. 66,4 N/mm².

$$W = \frac{20,5 \text{ mm} * (11,5 \text{ mm})^2}{6} = 451,85 \text{ mm}^3 \quad (24)$$

$$\sigma_b = \frac{2000 \text{ N} * 60 \text{ mm}}{4 * 451,85 \text{ mm}^3} = \frac{120.000 \text{ N} * \text{mm}}{1807,4166 \text{ mm}^3} = 66,393 \text{ MPa} \quad (25)$$

Die Versuche wurden als Druckschwellversuche im Drei-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Dabei wird die Probe von einer mittleren Drucklast am Stempel von z. B. 1000 N sinusförmig mit einer Amplitude von weiteren 1000 N beaufschlagt. Der Stempel wirkt dadurch mit einer schwellenden Drucklast von 0 bis 2000 N auf die Probe ein. Um das Wandern der Probe während vieler Lastwechsel von der Drei-Punkt-Biegeauflage zu vermeiden, wurde die Drucklast auf minimal 50 N begrenzt. Die geringe Minimallast durch den Stempel auf die Probe verhindert eine Bewegung des Bauteils aus der Solllage. Der sinusförmige Lastverlauf des Stempels wurde kraftgesteuert ausgeführt. Eine Probe konnte entweder als Durchläufer 10⁷ Lastwechsel bei gegebener Maximalkraft ohne Bruch absolvieren oder frühzeitig nach Einschnürung durch Bruch versagen. In Abbildung 39 ist ein CAD-Modell einer belasteten Biegeprobe nebst einer für die Dauerschwingversuche vorbereiteten Probe mit eingebettetem Sensor auf einem Substrat aus einer AlMg3-Legierung abgebildet.

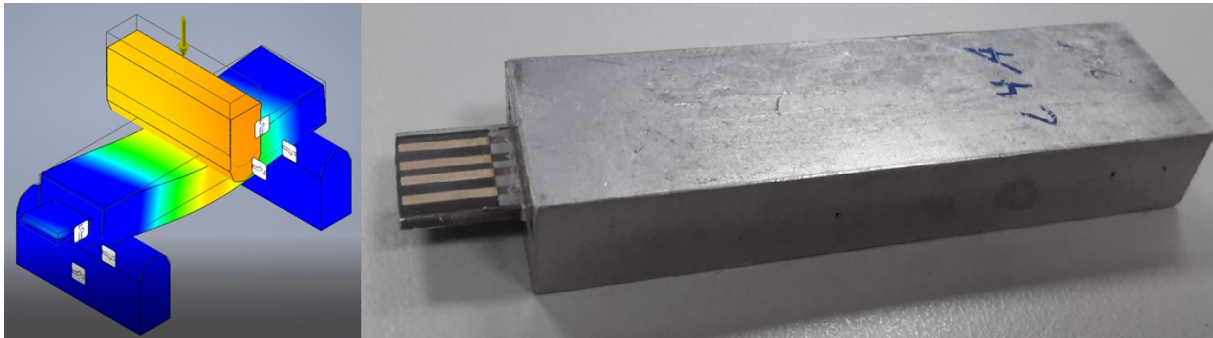


Abbildung 39: CAD-Modell mit Nahaufnahme einer vorbereiteten Probe

Aus einem im Druckguss erzeugten Bauteil können zwei Proben für die Dauerschwingversuche hergestellt werden. Dazu werden die Gussteile schonend mit einer Fräse so halbiert, dass jeweils zwei Proben entstehen. Die Bearbeitung erfolgt mit Kühlschmiermittel bei geringer Kraft- und Temperatureinwirkung, um den Einfluss auf die Dauerschwingversuche zu minimieren.

Unterhalb in Abbildung 40 ist auf der horizontalen Achse die Anzahl der Lastwechsel aufgetragen und auf der vertikalen Achse die Maximalspannung pro Amplitude, die auf die Probe eingewirkt hat. Die drei Kurven zeigen die Anzahl der Lastspiele bis zum Versagen der Proben durch Bruch. Im Bereich der Kurzzeitfestigkeit bis zu 10^4 Lastwechsel zeigt sich, dass die Proben aus Vollmaterial ohne Sensoreinleger um ca. 50 N/mm^2 stärker belastet werden können. Proben mit einem Sensorblech aus Stahl oder Aluminium weisen eine geringere Belastbarkeit auf. Auch im Zeitfestigkeitsbereich zwischen 10^4 und 10^6 Lastwechsel zeigt sich, dass die Proben ohne eingebettetes Sensorblech bei gleicher Amplitude mehr Lastwechsel bis zum Bruch durchlaufen können. Bei einer Maximalspannung von 100 N/mm^2 können Proben aus Vollmaterial eine um den Faktor 2 höhere Lastspielzahl absolvieren als Proben mit eingebettetem Substrat. Im Bereich der Dauerfestigkeit nähern sich die Kurven einander an, dennoch weisen die Proben aus Vollmaterial eine höhere Durchläuferanzahl auf.

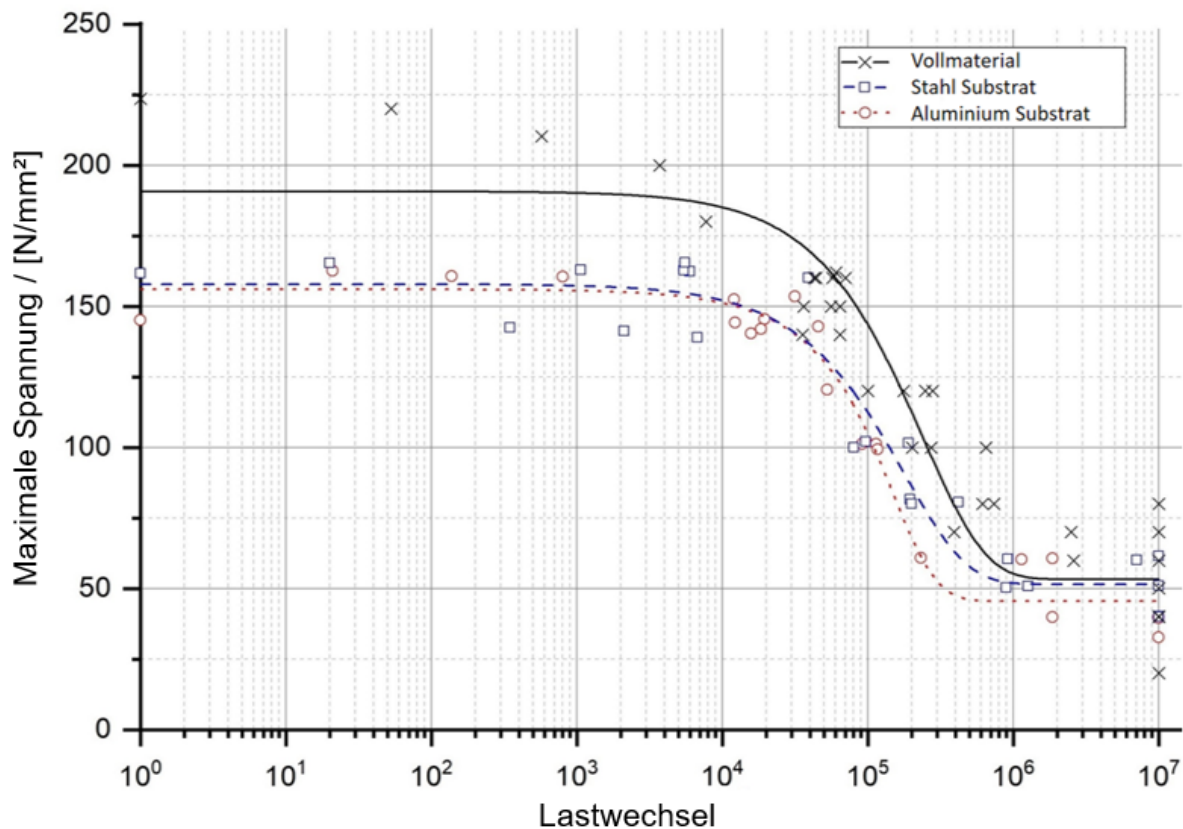


Abbildung 40: Dauerschwingversuche von Proben aus Vollmaterial im Vergleich zu Proben mit Sensoreinleger aus Aluminium und Stahl. Die Versuche wurden zusammen mit Martin Fischer von Fraunhofer IFAM durchgeführt

Die Versuche zeigen, dass der Sensoreinleger in der gegebenen Geometrie einen Einfluss auf die Festigkeit der Probe hat. Um die Eigenschaften eines Bauteils aus Vollmaterial durch ein Bauteil mit integrierter Sensorik zu erreichen, gibt es verschiedene Ansätze. Der integrierte Sensor sollte so klein wie möglich aufgebaut werden, sofern seine Eigenschaften nicht denen der Gusslegierung entsprechen und eine stoffschlüssige Anbindung gegeben ist. Um den Fremdkörperanteil zu verringern und gleichzeitig einen verbesserten Form- und Stoffschluss zu erreichen, kann das Substrat des Sensors z. B. durch Löcher perforiert werden. Mit Mulden im Substrat oder durch im Siebdruck erzeugte und strukturierte Erhebungen kann der Stoffschluss ebenfalls erhöht werden. Stoffschlüssig kommen eventuell galvanisch erzeugte Zink-Schichten oder eutektische Verbindungen zur Gussmatrix infrage.

4.7. Halbautomatischer Siebdruck

Zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit und zur Verringerung der Ausschussquote wurde vom manuellen Siebdruck auf die Herstellung mittels eines halbautomatischen Siebdruckers mit der Bezeichnung EKRA-MAT S 30 A umgestellt. Durch die Umstellung auf den halbautomatischen Siebdruck konnte der Einflussfaktor Mensch im Prozess weitgehend

minimiert werden. Die folgende Tabelle 5 zeigt die Daten der Auswertung zur Qualitätsverbesserung. Der Probenumfang ausgewerteter Widerstände beträgt beim halbautomatischen Siebdruck über 1.000 Stück und im manuellen Siebdruck über 120 Stück.

Tabelle 5: Unterschiede Im Herstellungsverfahren auf Ausschuss

Verfahren	Abweichung im Ausgangswiderstand	Ausschuss während der Herstellung	Ausschuss durch die Einbettung
Manueller Siebdruck	23 %	15 %	10 %
Halbautomatischer Siebdruck	10 %	2 %	5 %

Neben einer geringeren Abweichung vom Ausgangswiderstand ist durch die Verwendung eines halbautomatischen Siebdruckers außerdem eine glattere, homogenere Oberfläche der Grundisolation gegeben. Die verbleibende Abweichung im Ausgangswiderstand von 10 % ist pastenspezifisch und kann durch eine andere Technologie und/oder andere Materialien weiter verbessert werden. Dickschichtwiderstände werden in der Regel niederohmiger gedruckt und durch eine Querschnittsverringerng mittels eines Lasers auf den gewünschten Ausgangswiderstand gebracht; dieser Vorgang nennt sich Trimmen. Das Verfahren zum Trimmen funktioniert im Rahmen der Dickschichttechnologie sehr gut. In Aluminium eingebettete Dickschichtwiderstände lassen sich jedoch aufgrund der Topisolation und Gussmatrix in eingebettetem Zustand nicht mehr trimmen. Auch ist zu beachten, dass der „L-Schnitt“-Vorgang des Trimmens nicht für die Herstellung eines als DMS genutzten Widerstandes geeignet ist, da der verbleibende Querschnitt nicht homogen auf eine Änderung der Dehnung reagiert.

Die Ergebnisse aus diesem Kapitel zeigen, dass die Dickschichttechnologie mit sensorischen Materialien für den DMS unterhalb des Substratschmelzpunktes gut geeignet ist, um den Bruch eines Bauteils frühzeitig zu detektieren. Die Herstellung eines reproduzierbaren Ausgangswiderstandes nach der Einbettung ist jedoch nicht ohne Weiteres zu erreichen.

Daher wird im folgenden Kapitel eine Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht vorgestellt. Der DMS wird dabei als Dünnschicht aus hochschmelzenden Materialien auf der mechanisch- und thermisch- belastbaren Dickschicht aufgebracht.

5. Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht

5.1. Temperaturstabiles Sensorelement

Die Einbettungsversuche mit Dickschichtsensoren zeigen, dass eine elektrische und mechanische Isolation der piezoresistiven Struktur zum Substrat und zur Schmelze mit Dickschichtpasten erreicht werden kann. Die Verwendung sensorischer Strukturen aus Dickschicht hat jedoch den Nachteil, dass die Sensoren ihren Ausgangswiderstand durch den Temperatureinfluss während der Einbettung verändern. Darüber hinaus zeigte sich bei den eingesetzten Materialien nach der Einbettung eine breite Streuung des K-Faktors der piezoresistiven Dickschichten, sodass eine reproduzierbare Herstellung von sensorischen Bauteilen damit nicht realisiert werden kann.

Um eine Veränderung durch thermische Einflüsse während der Einbettung zu vermeiden, ist ein hoher Schmelzpunkt der piezoresistiven Struktur erstrebenswert. Durch eine piezoresistive Struktur aus einem Material mit einem hohen Schmelzpunkt kann eine thermische Veränderung durch die gießtechnische Einbettung verringert werden. Im PVD-Verfahren können piezoresistive Metalle wie z. B. Platin oder Titan bei Temperaturen von unter 300 °C und damit unterhalb ihres Schmelzpunktes abgeschieden werden. Da das Substrat aus Aluminium ist, sollten die Prozesse unterhalb des Schmelzpunktes von ca. 550 °C für die verwendete Substratlegierung liegen.

5.2. Sensordesign

Die Grundlage dieser Sensoren stellt ein Substrat aus einer AlMg3 Aluminium-Legierung dar. Die Form der Sensoren wurde in Verbindung mit einer Kokille konzipiert, um eine Messung während der Einbettung zu ermöglichen. Die Gussform wurde in Kapitel 3.2 im Zusammenhang mit dem Kokillenguss erstmalig vorgestellt. Das Substrat ist mittig in der Kavität der Gussform platziert und ragt aus der Gussform hinaus. Über die Leiterbahn aus Silber kann der Sensor kontaktiert werden. Die Abmessungen des Sensorsubstrates betragen 120 x 12 x 2 mm, wobei die aus dem Bauteil ragende Dimension der Länge von 120 mm innerhalb der Versuchsreihe variiert. Das Sensorelement ist dabei mittig im Bauteil positioniert. Das Substrat mit Sensor sowie das Bauteil mit Anguss und die geschichteten Halbschalen sind in Abbildung 41 dargestellt. Das sensorische Bauteil hat nach dem Aluminiumguss die Abmessungen 100 x 22 x 10 mm.

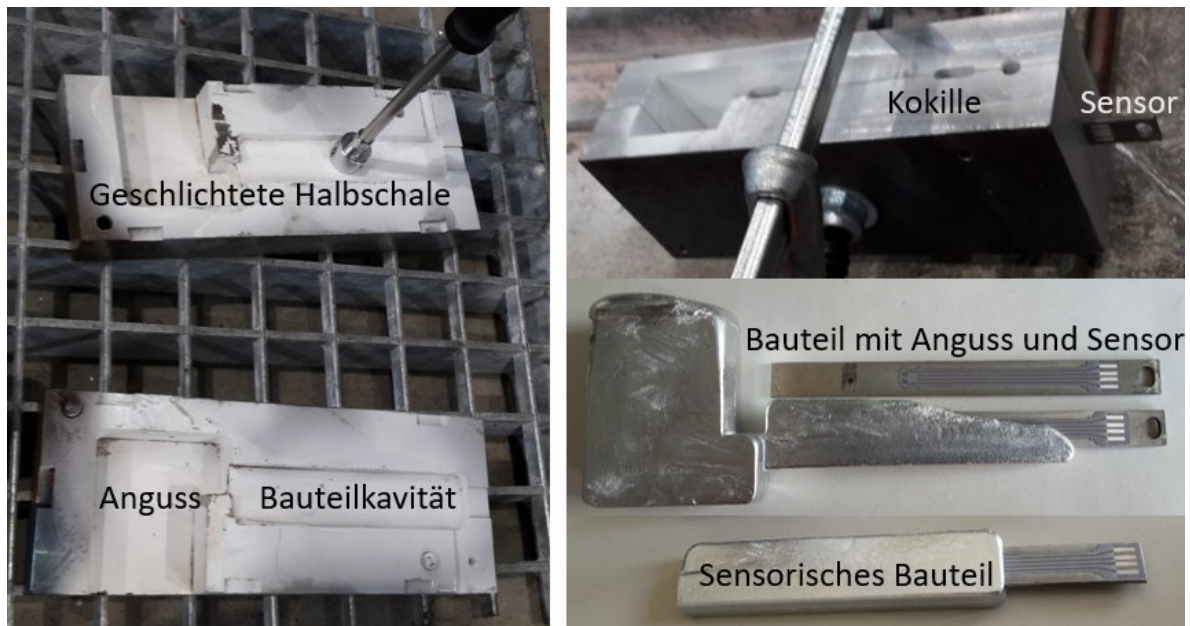


Abbildung 41: Übersicht zum Versuchsumfeld im Kokillenguss, Kokille aus geschichteten Halbschalen, der geschlossenen Kokille inklusive eingelegtem Sensor, dem Bauteil mit Anguss einer frühzeitig erstarrten Legierung; sowie einem sensorischen Bauteil.

In Abbildung 42(a) sind die Entwicklungsstufen im Siebdruck bis zur Leiterbahn dargestellt. Die piezoresistive Struktur nach dem Lift-off-Verfahren vor dem Aufbringen der Topisolation ist in Abbildung 42(b) als mikroskopische Vergrößerung dargestellt. Das Design der sensorischen Struktur ist zur Temperaturkompensation als Vollbrücke ausgeführt, der Schaltplan ist rechts in Abbildung 42(c) dargestellt. Platin wurde als piezoresistive Struktur gewählt, da Platin einen hohen Schmelzpunkt von 1768 °C aufweist, laut Literatur einen K-Faktor über 2 hat und im PVD-Verfahren bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes vom Substrat abgeschieden werden kann. Um die piezoresistive Dünnschicht aus Platin zu strukturieren, gibt es verschiedene technische Möglichkeiten vom Lift-off-Verfahren über das nasschemische Ätzen bis zur Verwendung einer Schattenmaske. Viele Verfahren sind jedoch im Reinraum auf die Verwendung von Substraten aus Silizium abgestimmt und auf Aluminium in diesem Fall nicht anwendbar. Genauer wird darauf in Kapitel 5.4 „Materialauswahl und Strukturierung des DMS“ eingegangen.

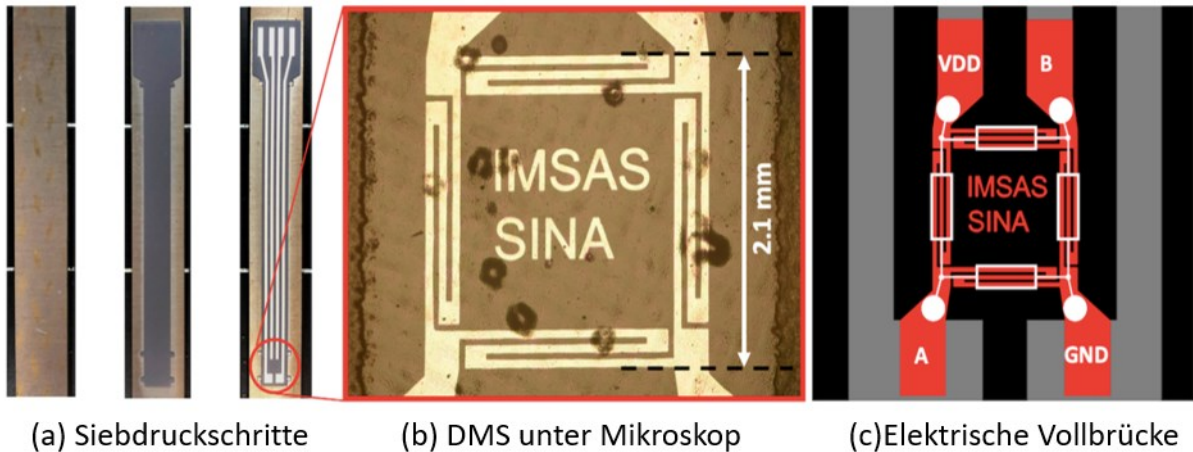


Abbildung 42: Aufbau des Sensors; (a) Schritte im Siebdruck vom Substrat über die Grundisolation bis zur Leiterbahn; (b) Mikroskopische Aufnahme des strukturierten DMS als Vollbrücke; (c) Schaltplan der Vollbrücke {Eigene Veröffentlichung [4]}

5.3. Herstellung der Sensoren

Der Prozess zur Herstellung von Sensoren in Dickschichttechnik ist in Kapitel 4 beschrieben, daher geht dieses Kapitel vorrangig auf die neuen Aspekte ein, die durch die Technologiekombination zu berücksichtigen sind. In der weiter unten dargestellten Abbildung 43 ist der Ablauf zur Herstellung eines Sensors dargestellt.

Die Schritte a bis c der Abbildung 43 entsprechen dem klassischen Dickschicht-Prozess. Auf dem Substrat werden drei Schichten Dickschichtpaste (Heraeus Celcion IP6080A) einzeln gedruckt, getrocknet und eingebrannt [55]. Anschließend wird eine Zuleitung aus Silber (Heraeus Celcion C8829D) in Dickschichttechnik aufgebracht und eingebrannt. Der Siebdruck erfolgt am manuellen Siebdrucker. Die Pasten sowie das Temperaturprofil im Sinterprozess sind nahezu unverändert zu denen aus Kapitel 4. Eine Änderung besteht hier in der Wahl der Dickschichtpaste. Der Hersteller Heraeus hat eine neue Version der Isolationspaste in Umlauf gebracht, die lt. Hersteller eine geringere Differenz im CTE zu Substraten aus Aluminium aufweist.

Schritt d bis g der Abbildung 43 behandeln das Aufbringen der Metallisierung und dessen Strukturierung auf der vorhandenen Dickschicht durch die Verwendung von Prozessen der Dünnschichttechnik. Im abschließenden Schritt wird in Dickschichttechnik die Topisolation aufgetragen, um den piezoresistiven Sensor aus Dünnschicht vor der anströmenden

Schmelze schützen zu können.

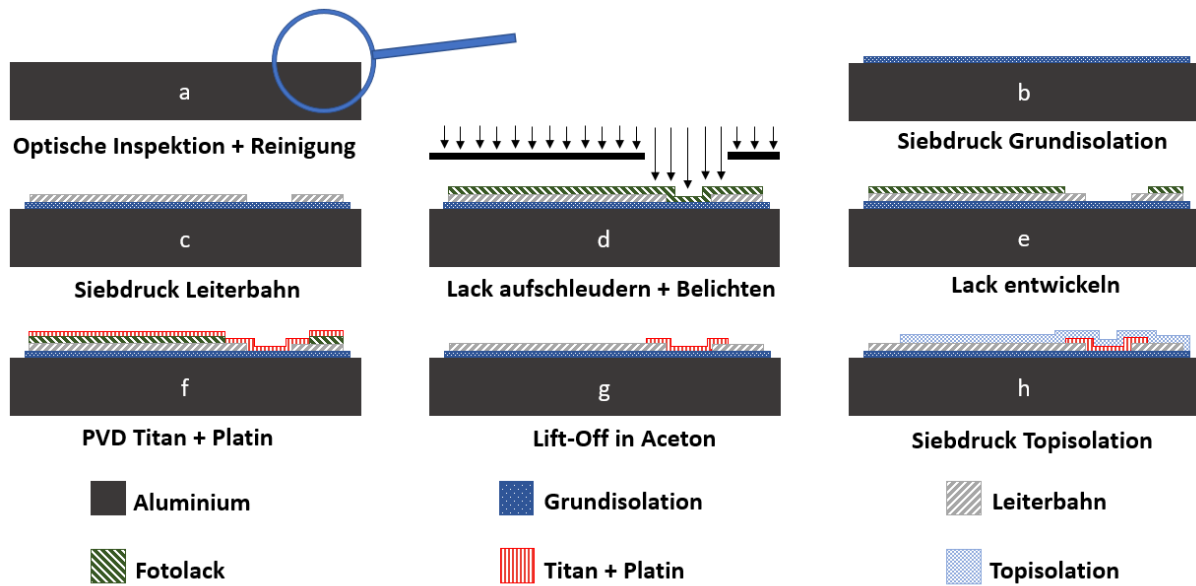


Abbildung 43: Vollständiger Ablauf der Prozessschritte zur Fertigung des Sensors {Eigene Veröffentlichung [4]}

5.4. Materialauswahl und Strukturierung des DMS

Zur Strukturierung des DMS gibt es chemische und mechanische Verfahren, abhängig von unterschiedlichen Parametern wie z. B. der verwendeten Metallisierung, dem verwendeten Substrat oder den chemischen Ätzlösungen. Nach verschiedenen Vorversuchen zur Haftung mit Gold, Kupfer, Tantal, Platin und Titan auf Substraten aus Aluminium mit aufgebrachtener Dickschicht erscheint die Kombination aus Titan als Haftschiicht und Platin als piezoresistive Struktur umsetzbar. Kupfer weist zwar eine gute Haftung auf der Dickschicht auf, oxidiert jedoch ohne weiteren Schutz und kommt daher nicht in Frage. Gold und Tantal weisen eine zu geringe Haftung auf. Bei Gold konnte in Verbindung mit einer Haftschiicht aus Titan eine gute Haftung auf der Dickschicht erzielt werden. Platin wurde auf Grund des höheren K-Faktors für den Sensor anstelle von Gold gewählt.

Da das Substrat aus Aluminium besteht, sind die meisten chemischen Verfahren zur Strukturierung einer Metallisierung aus Titan und Platin nicht anwendbar, da eine Querempfindlichkeit der Ätzlösungen zum Substrat besteht. Bei Ätzlösungen wie Königswasser äußert sich die Querempfindlichkeit darin, dass das Substrat aus Aluminium schneller chemisch durch die Ätzlösung aufgelöst wird als die zu strukturierende Platin Metallisierung. Das mäanderförmige Design der piezoresistiven Struktur schließt auch eine konstruktiv einfache Schattenmaske aus. Für die Strukturierung der Dünnschicht aus Platin wurde daher das Lift-off-Verfahren gewählt.

Für die Aufbringung von Positivlack im Lift-off-Verfahren musste der bestehende Prozess angepasst werden. Um Fotolack auf die rechteckigen Substrate aufzuschleudern, wurden für jedes Substrat zwei Aussparungen vorgesehen, eine in Form eines großen Langlochs sowie eine 1,3 mm starke Bohrung. Durch diese beiden Aussparungen kann das Substrat auf die Halte-Stifte des Belackers aufgespannt werden. Die Haltestifte sind normalerweise zur Halterung von 100 mm Wafern vorgesehen. Nach dem Aufschleudern des Fotolacks wird der Lack belichtet und entwickelt, um für das anschließende Lift-off-Verfahren nutzbar zu sein.

Durch die Verwendung eines Direktschreibers (MicroWriter ML3 Pro) in Verbindung mit Positioniermarken, die auf dem Substrat im Siebdruck der Leiterbahn berücksichtigt wurden, konnte die Belichtung des Fotolacks mit dem Direktschreiber individuell auf die Substrate ausgerichtet werden. Die belichteten Substrate werden mit einem zum Fotolack zugehörigen Entwickler für 30 Sekunden entwickelt und anschließend mit deionisiertem Wasser (Di-Wasser) gespült.

Da die Substrate im manuellen Siebdruck einzeln bedruckt wurden, ist eine inhomogenere Oberfläche als im halbautomatischen Siebdruck zu erwarten. Die Belichtung wurde aufgrund der im Vergleich zum halbautomatischen Siebdrucker raueren Oberfläche der Dickschicht durch eine Belichtungsreihe auf die Oberflächenbeschaffenheit optimiert. Durch eine angepasste Belichtung können auch Mulden im Siebdruck, die von aufgeschleudertem Lack ausgefüllt sind, vollständig erfasst und entwickelt werden. Eine angepasste Belichtung verhindert, dass die gewünschten metallischen Strukturen durch Überbelichtung größer werden. Ein Beispiel einer unvollständigen Entwicklung von Fotolack ist als mikroskopische Aufnahme in Abbildung 44 gezeigt.

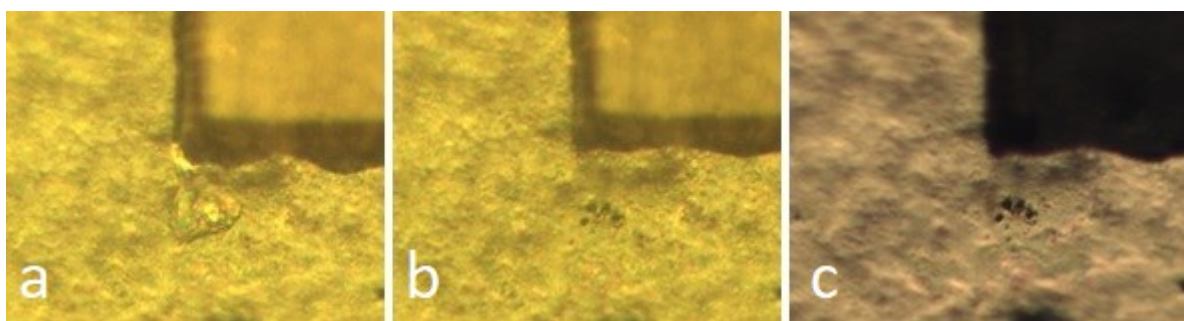


Abbildung 44: Belichtung und Entwicklung; (a) Zu geringe Belichtungsstärke führt zu verbleibendem Fotolack; (b) Angepasste Belichtungsparameter ohne Lackreste; (c) Hergestellte Metallisierung nach dem Lift-off-Verfahren

In Abbildung 44(a) ist eine zu geringe Belichtungsstärke gewählt und der Fotolack konnte nicht vollständig vor dem PVD-Verfahren entwickelt werden. In Abbildung 44(b) wurde der Prozess bei einer adjustierten und stärkeren Belichtung durchgeführt, der Fotolack kann besser entwickelt werden. In Abbildung 44(c) ist eine Aufnahme nach dem PVD- und Lift-off-Verfahren der fertigen Metallisierung auf Grundisolation dargestellt. Werden solche

Fotolackmulden nicht vor dem PVD-Verfahren vollständig entwickelt, verbleibt der Fotolack unter der Metallisierung und führt zu starken Verunreinigungen im abschließenden Sinterprozess für die Topisolation. Die Folgen sind hier abgeplatzte Topisolationen und eine verringerte Haftung der Dickschichtpaste, nebst einer verringerten Reproduzierbarkeit des Ausgangswiderstands. Ein solcher Fehler kann zum Ausfall des Sensors durch Isolationsverlust während der Einbettung in flüssigem Aluminium führen.

Das Substrat mit dem strukturierten Lack wird in einem PVD-Verfahren mit einer ca. 10 nm Haftschrift aus Titan sowie einer Metallisierung aus ca. 150 nm Platin beschichtet. Dann erfolgt die Strukturierung der Metallisierung im Lift-off-Verfahren. Dazu werden die beschichteten Substrate in einem Bad aus Aceton gespült, um den Lack zu entfernen. Nach der Reinigung des Substrates mit Reinwasser ist die piezoresistive Struktur auf dem Substrat aufgebracht. Die Kontaktierung erfolgt durch eine überlappende PVD-Metallisierung im Bereich zur Dickschicht aus Silber. In Abbildung 45 ist ein Ausschnitt aus dem überlappenden Bereich zwischen Dünnschicht aus Platin und Dickschicht-Leiterbahn aus Silber auf Grundisolation dargestellt.



Abbildung 45: Kontaktierung zwischen Dünnschicht und Dickschicht in Mikroskopie und schematisch

5.5. Topisolation

Nach der Strukturierung des DMS wird im klassischen Siebdruck eine Topisolation aufgebracht. Die verwendete Paste IP6080A, welche schon bei der Grundisolation verwendet wurde, wird manuell gedruckt. Die Sinterparameter werden dahingehend angepasst, dass das Einbrennen unter Schutzatmosphäre stattfindet. Dazu wird der Durchlaufofen mit Stickstoff bei leichtem Überdruck geflutet, um eine Oxidation der Metallisierung während des Einbrennens zu verringern. Der Ausgangswiderstand des DMS verringert sich durch den Sintervorgang um nur ca. 5 %. Die Dickschicht-Leiterbahn aus Silber weist einen absoluten Widerstand von unter 0,3 Ohm auf und der Widerstand ändert sich nicht wesentlich durch weitere Sintervorgänge. Die Widerstandsänderung rührt daher

aus der Dünnschicht oder dem Übergangswiderstand zwischen Dünnschicht-DMS und Dickschicht-Leiterbahn. Versuche mit unterschiedlich großen Flächen zur Überlappung von Dünn- und Dickschicht haben gezeigt, dass der Übergangswiderstand zwischen Dünn- und Dickschicht ebenfalls zu vernachlässigen ist. Die Änderung des Widerstandes wird daher in der Veränderung der Struktur der Dünnschicht vermutet. Einzelne Korngrenzen der PVD-Dünnschicht verbinden sich durch den Sintervorgang zu einem leitfähigeren Gefüge. Die Folge ist ein abnehmender Widerstand.

5.5.1. Fertigungsparameter im Überblick

In der folgenden Tabelle 6 werden die notwendigen Schritte zur Herstellung des Sensors aufgelistet.

Tabelle 6: Schritte zur Herstellung des Sensors

Schritt Nr.	Beschreibung	Verwendete Stoffe
1	Substrat aus Aluminium optisch prüfen, von scharfen Kanten befreien und reinigen	Substrat aus AlMg3, Schmirgelpapier mit 1000er Körnung, Druckluft, Reinwasser
2	3 x Siebdruck der Grundisolation inkl. Trocknung der Paste für 15 Min bei 150 °C und anschließendem Sintervorgang im Durchlaufofen	Heraeus IP6080A
	Einweg Siebdruckschablonen mit 120 Fäden/Inch, einer 34 µm Fadenstärke und 45 µm Öffnungen	Sieb [56]
	Siebdruck der Leiterbahn	Heraeus C8829D
	Einweg Siebdruckschablonen mit 120 Fäden/Inch, einer 34 µm Fadenstärke und 45 µm Öffnungen	
3	Reinigung der Substrate mit eingebrannter Grundisolation durch Druckluft und Reinstwasser	Reinstwasser
4	Aufschleudern des Fotolacks (1,8 µm positiv Lack)	Fotolack AZ1518 [57] Gelblicht
	Softbake-Prozess auf Hotplate bei 100 °C für 30 s	Gelblicht
5	Belichten am µ-Writer mit einer Lichtintensität von 100 mJ/cm ² und einer 5 µm Auflösung	Gelblicht
6	Entwicklung des Fotolacks mit Entwickler für 30 bis 60 s bei Raumtemperatur	Entwickler AZ726 MIF [58] Gelblicht

7	Reinigen mit Reinstwasser Quickdump-Spülung	Reinstwasser
8	Balzers Titan-Haftschrift auf Objektträger. Sputtern bei ½ Leistung (100 Watt für 72 Sekunden)	Titan 10 nm
9	Balzers Platin-Metallisierung auf Objektträger. Sputtern bei ½ Leistung (100 Watt bei 136 Sekunden)	Platin 150 nm
10	Lift-off-Verfahren mit Aceton in Petrischale 6h	Aceton
11	Reinigung des Sensors, Befreiung von Aceton sowie Wiederabscheidungen an nicht vorgesehenen Stellen mit Isopropanol und Reinstwasser	Isopropanol Reinstwasser Quickdump
12	Optische Inspektion der Metallisierung und eventuell erneut Schritt 10 + 11, bis das Lift-off-Verfahren vollständig abgeschlossen ist	
13	2 x Siebdruck der Topisolation analog zu Schritt 2 jedoch unter Stickstoff-Schutzatmosphäre	Heraeus IP6080A Stickstoff
14	Reinigung des fertigen Sensors mit Druckluft und Di-Wasser	Di-Wasser

In der Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht wurden insgesamt acht Sensoren hergestellt. Zwei der acht Sensoren sind als Vollbrücke aufgebaut, weitere sind als einfache Mäander mit verschiedenen Abmessungen ausgeführt.

5.6. Einbettung im Kokillenguss

Für die Einbettung der Sensoren wurde die im Projekt angefertigte Kokille aus Kapitel 3 verwendet. Die aus zwei Halbschalen bestehende Kokille wurde für die Einbettung mit der Schichte HeBoCoat 401E [59] vorbereitet und im Ofen auf 200 °C vortemperiert. Die verwendete Legierung für die Gießversuche ist eine AlSi10MnMg-Legierung [49] und wird im Schmelztiegel auf 720 bis 740 °C temperiert. Für die Messung der Temperatur werden Typ K Thermoelemente mit einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet.

Einige der Sensoren wurden während der gießtechnischen Einbettung ausgewertet. Um in situ Messungen vorzunehmen sind Kokille und Sensor so konstruiert, dass eine Auswertung während des Gießens erfolgen kann, ohne, dass der Gussvorgang beeinträchtigt ist. Die

Messung der ersten Sensoren, welche als Kombination aus Dick- und Dünnschicht hergestellt wurden, offenbarte, dass der Moment der Einbettung aufgrund von veränderten Isolationseigenschaften der Dickschichtpaste, nicht vollständig erfasst werden kann. In der folgenden Abbildung 46 sind Temperatur und Widerstand eines Sensors während der Einbettung dargestellt. Auf der rechten Skala ist der Widerstand in Ohm dargestellt auf der linken Skala die Temperatur in °C, welche mit einem Thermoelement auf der Höhe der Metallisierung erfasst wurde. Die Beobachtung zeigt, dass sobald Schmelze in die Kokille eingefüllt wird und den Sensor erhitzt, der messbare Widerstand des Sensors abfällt, bevor er mit abnehmender Temperatur wieder steigt und sich dann während der Abkühlung des Bauteils asymptotisch dem Ausgangswiderstand annähert.

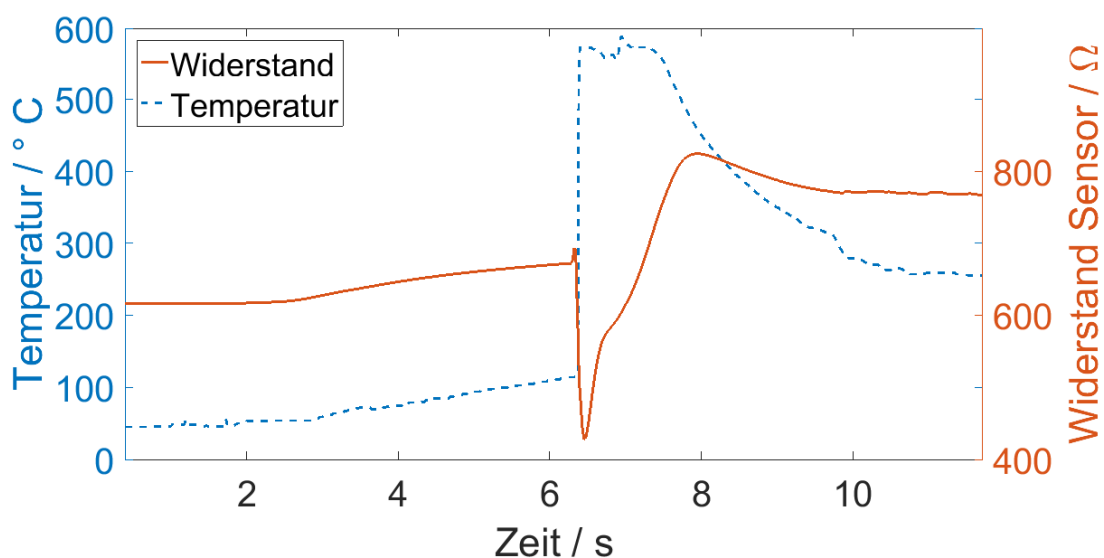


Abbildung 46: In situ Messung während der Einbettung

Der Sensor wird in der vortemperierten Kokille eingelegt und der messbare Widerstand steigt, da die Temperatur der Kokille bei ca. 200 °C liegt und der Sensor zuvor Raumtemperatur hatte. Durch die einströmende flüssige Schmelze steigt die Temperatur, während der messbare Widerstand einbricht bevor er bei sinkender Temperatur stark ansteigt. Die gemessene Temperatur erscheint mit unter 600 °C zu gering. Ein Grund dafür könnte die Kabelführung des Thermoelementes durch den Anguss der Kokille entlang der flüssigen Schmelze zu sein.

Die Vermutung, dass die Dickschichtpaste zur elektrischen Isolation bei Temperaturen oberhalb von ca. 350 °C zunehmend leitfähig wird, konnte im folgenden Versuch bestätigt werden. In einem Versuchsaufbau wurden zwei elektrisch und räumlich voneinander getrennte Flächen aus Silber auf einem mit Grundisolation beschichtetem Substrat aufgebracht. Die beiden Flächen wurden zur Widerstandsmessung kontaktiert und in einem

Muffelofen kontrolliert erhitzt. Die elektrische Isolation ist bei höheren Temperaturen nicht mehr gegeben und nähert sich mit steigender Temperatur asymptotisch der X-Achse an.

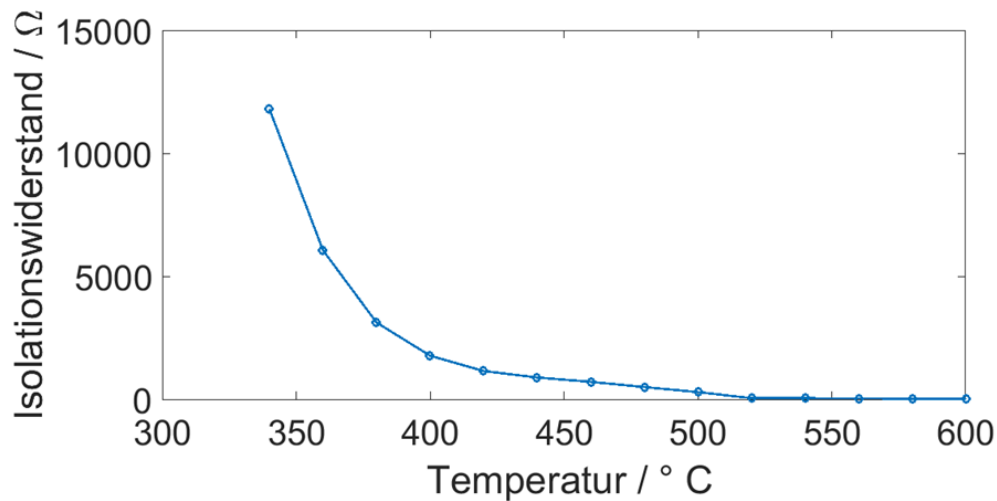


Abbildung 47: Abnehmende Isolationsfähigkeit der Dickschichtpaste bei höheren Temperaturen

Daher ist der gemessene Widerstand des einzubettenden Sensors bei Temperaturen oberhalb von ca. 350 °C zunehmend ein Effekt aus der nachlassenden elektrischen Isolation der Dickschichtpaste. Im Temperaturbereich oberhalb von 300 °C ist die Messung des elektrischen Widerstands daher von abnehmender Aussagekraft. Die Dickschichtpaste als Isolation muss für in situ Messungen durch einen anderen höherwertigen Isolator ersetzt werden. Da der Effekt jedoch reversibel ist, ist lediglich die in situ Messung gestört.

Der Widerstand des eingebetteten Sensors steigt durch die Einbettung von 613 Ohm bei 20 °C vor der Einbettung um ca. 1,9 % auf 625 Ohm nach der Einbettung.

Tabelle 7: Widerstandsänderung durch Einbettung der Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht

Sensor Art	Widerstand vor Einbettung bei 20 °C	Widerstand Nach Einbettung bei 20 °C	Änderung in %
DMS kurz	421	431	2,4 %
DMS kurz	413	419	1,5 %
DMS mittel	555	555	0 %
DMS mittel	613	625	1,9 %
DMS lang	1360	1440	5,9 %
DMS lang	1369	/	/
Vollbrücke	90,4	89	-1,5 %
Vollbrücke	89	91,2	2,5 %
Durchschnittliche Widerstandsänderung durch die Einbettung liegt bei ca. 1,8 %			

Während der Formfüllung dehnt sich das Substrat aus Aluminium schneller aus als die Stahl-Kokille. Wenn das Substrat die Längenänderung nicht frei vollziehen kann, weil sich das Substrat z. B. an der Durchführung der Kokille für die in situ Messung verkantet, baut sich die Spannung z. B. durch Verformung ab. Ein Sensor hat sich in der Kokille verkantet und ist ausgefallen.

5.7. Sensorcharakterisierung

Die Charakterisierung des Sensors erfolgt vor der Einbettung in einem Versuch als Biegebalken. Nach der Einbettung erfolgt die Charakterisierung auf der Grundlage eines 3-Punkt-Biegeversuchs, da die Einbettung im Aluminiumguss den Sensor permanent in das Bauteil integriert hat. Die thermische Charakterisierung in Bezug auf den TCR erfolgt vor- und nach der Einbettung im Klimaschrank. Für diese Versuche wurde beim Anfahren der Temperaturstufen die nach der Einbettung höhere thermische Kapazität berücksichtigt. Für die folgende Charakterisierung wurde der unterste Sensor aus Tabelle 7 genutzt.

Um den Sensor nach der Herstellung vor der Einbettung als Biegebalken zu beproben, wurde das Sensorblech in horizontaler Lage eingespannt und mit einem Stempel aus seiner Null-Lage gebracht. In Abbildung 48 ist der Biegebalken-Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Der Stempel bringt das Aluminiumsubstrat mit einer Amplitude von 1 mm um einen Mittelpunkt von -1,2 mm in Bewegung, der Sensor wird dadurch physisch gedehnt.

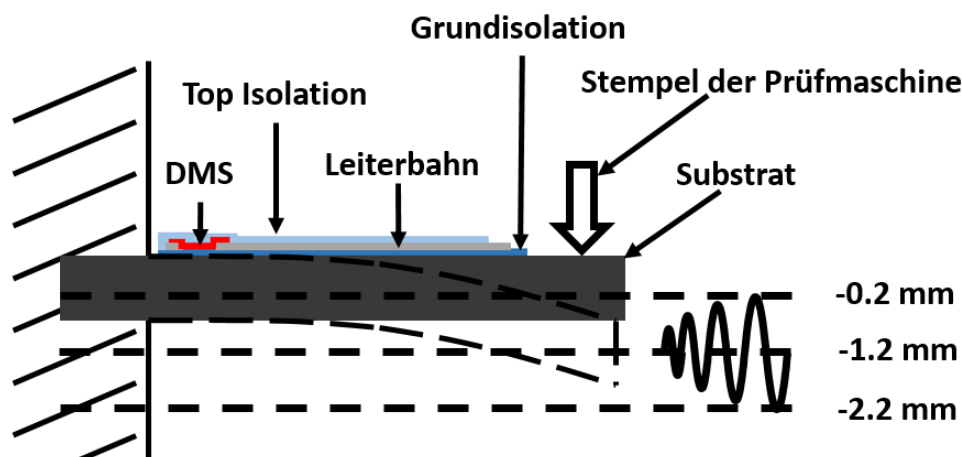


Abbildung 48: Biegebalken Versuchsaufbau vor der Einbettung, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}

Mit einer entsprechenden FE-Simulation (Finite-Elemente-Simulation), wurde über den Weg des Stempels und der daraus resultierenden Dehnung bei gemessenem Widerstand der K-Faktor ermittelt. Die Ermittlung des TCR erfolgte durch die Messung des Widerstands in 10 °C Temperaturschritten in einem Klimaschrank.

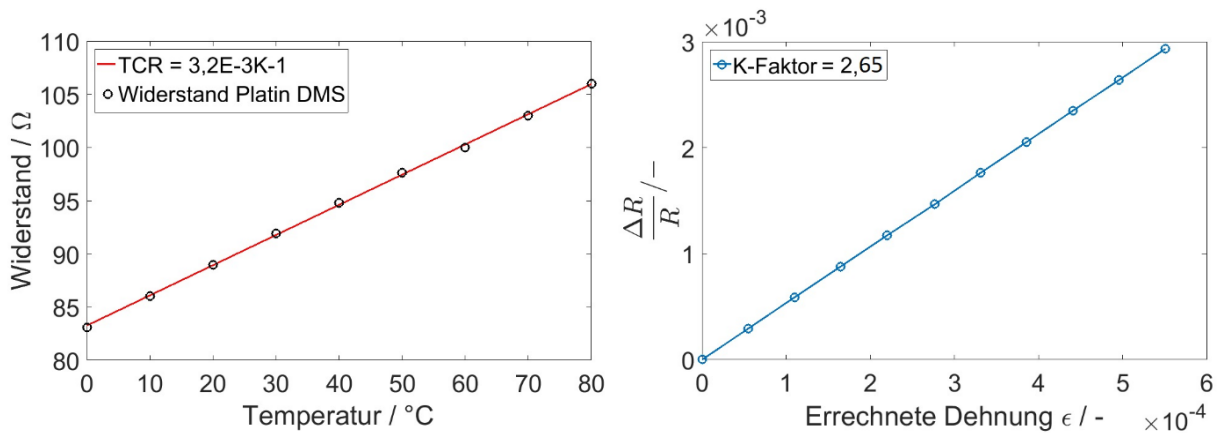


Abbildung 49: Auswertung von K-Faktor und TCR des Sensors vor der Einbettung, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}

Die Dünnschicht weist einen K-Faktor von 2,65 auf. Durch den konstruktiven Aufbau als Vollbrücke kann die Sensitivität von 2,65 auf ca. 5,3 verdoppelt werden. Der Widerstand des Sensors beträgt bei 20 °C 89 Ω, der TCR liegt bei 3,2 E-3K-1 und ist damit ca. 15% geringer als der in der Literatur angegebene Wert von 3,8E-3K-1 für Platin-Vollmaterial.

Dünnschichten weisen einen höheren Widerstand im Vergleich zu Vollmaterial auf, da eine geringere Dichte vorhanden ist. Weitere Effekte, wie die Kollision von Elektronen mit der Materialoberfläche, kommen aufgrund der vergrößerten Grenzflächen im Verhältnis zum Querschnitt deutlicher zu tragen [24]. Diese Effekte sind jedoch nicht temperaturabhängig, dadurch sinkt der TCR nachvollziehbar im Vergleich zu Platin-Vollmaterial.

5.7.1. Nach der Einbettung

Der im Aluminiumguss eingebettete Sensor wird nach der Entfernung vom Anguss im 3-Punkt-Biegeversuch sowie in der Klimakammer ausgewertet. Der 3-Punkt-Biegeversuch ist kraftgesteuert und wird als Druckschwellversuch ausgeführt. In der folgenden Abbildung 50 ist auf der linken Y-Achse die Brückenspannung des Sensors abgebildet und auf der rechten Y-Achse der Weg des Stempels. Die X-Achse bildet die Anzahl der Lastwechsel ab. Die gemessene Brückenspannung ändert sich durch den Druck des Stempels und verläuft synchron zum zurückgelegten Weg des Stempels.

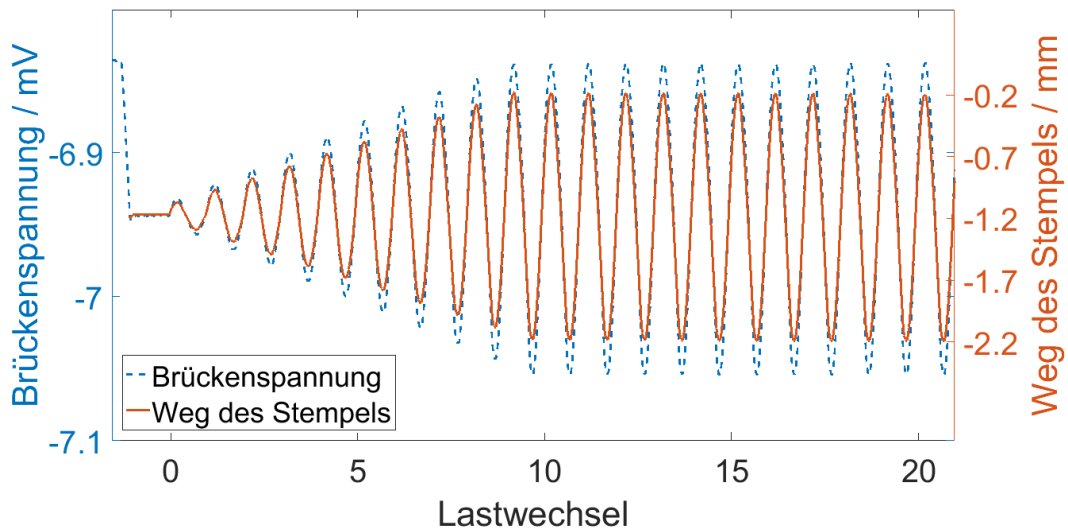


Abbildung 50: Brückenspannung und Weg des Stempels im 3-Punkt-Biegeversuch, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}

In der folgenden Abbildung 51 sind auf der X-Achse 200 Lastwechsel dargestellt, auf der rechten Y-Achse ist die Temperatur dargestellt und auf der linken Y-Achse ist wieder die Brückenspannung abgetragen. Mit dem Ziel die Dehnung im Bauteil unabhängig vom Einfluss der Temperatur zu erfassen, wurde der Sensor in diesem Versuch mit einem Luftstrom von unten erwärmt. Die Temperatur wurde auf Höhe des Sensorelementes gemessen.

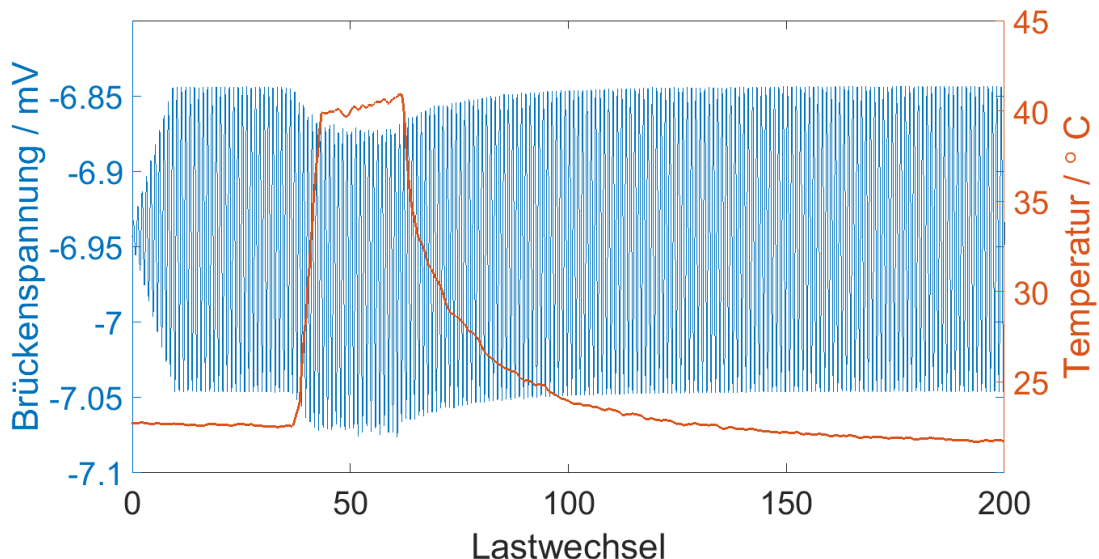


Abbildung 51: Temperaturstabilität des Brückensignals während thermischer Belastung, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}

Zu sehen sind der Temperaturverlauf sowie die gemessene Brückenspannung. Im Idealfall wäre die Brückenspannung von der Temperatur nicht beeinflusst und würde dem Verlauf des Stempels folgen. Der Einfluss der Temperatur ist jedoch sehr gering und die Dehnung im

Brückensignal überwiegt. Durch einen 25 °C Temperaturimpuls wird das Signal der Vollbrücke um ca. 5 % beeinflusst. Außerdem ist durch die ungleichmäßige Erwärmung des Bauteils mittels Luftstrom von unten eine thermische Verformung des Bauteils nicht auszuschließen. Da der DMS im Bauteil oberhalb der neutralen Faser platziert ist, kann eine thermische Stauchung des DMS nicht ausgeschlossen. Bei dieser Art des Sensoraufbaus fehlt jedoch die Information der Temperatur des Bauteils. Alternativ zur Vollbrücke besteht die Möglichkeit eines 2-Metall-Sensors zur Erfassung von Dehnung und Temperatur. Für einen Einsatz in Umgebungen mit größeren Temperaturschwankungen und zur strukturellen Überwachung von Bauteilen ist neben der Trennung von Temperatur und Dehnung auch die Erfassung der vorherrschenden Temperatur von Interesse.

5.8. Temperaturkompensation durch 2-Metall-Sensor

Um zwischen Dehnung und Temperatur zu unterscheiden, wurde ein 2-Metall-Sensor in der Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht entwickelt und hergestellt. Ein Mäander wurde aus Platin und ein weiterer wurde aus Gold hergestellt. Beide sind über eine Haftschrift aus Titan mit der Grundisolation aus Dickschicht verbunden. Durch eine unmittelbare physische Nähe auf dem Substrat erfahren die Mäander dieselbe Dehnung und Temperatur. Folglich kann durch die Ermittlung der TCR und K-Faktoren der hergestellten Mäander, sowie aus den gemessenen Widerstandswerten, die vorherrschende Temperatur und Dehnung errechnet werden (siehe Theorie Kapitel 2.3).

5.8.1. Design und Aufbau

Die Herstellung des 2-Metall Sensors erfolgt analog zur Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht der vorgestellten Vollbrücke mit den notwendigen zusätzlichen Prozessschritten für eine weitere Metallisierung. Als Substrat dient ein Wafer mit 100 mm Durchmesser und 2 mm Stärke aus einer AlMg3-Legierung. Durch den Wafer entfallen gesonderte Schritte im Lift-off-Verfahren sowie die Nutzung von Objektträgern während der PVD-Metallisierung.

Schritt 8 bis 12 aus Tabelle 6 in Kapitel 5.5.1 Fertigungsparameter werden im Anschluss an Schritt 12 für die Metallisierung aus Gold zusätzlich durchgeführt.

Voraussetzung ist eine unmittelbare physische Nähe der Mäander, sowie dieselbe Ausrichtung zur Erfassung der Dehnung. Das gewählte Design für die Sensoren beruht auf den Erkenntnissen zur Fertigung aus den vorherigen Kapiteln. Abbildung 52 zeigt links einen gesägten Wafer mit Sensoren, mittig eine Nahaufnahme der Metallisierung durch die Topisolation, sowie rechts die schematische Abbildung der Mäander aus den CAD-Daten.

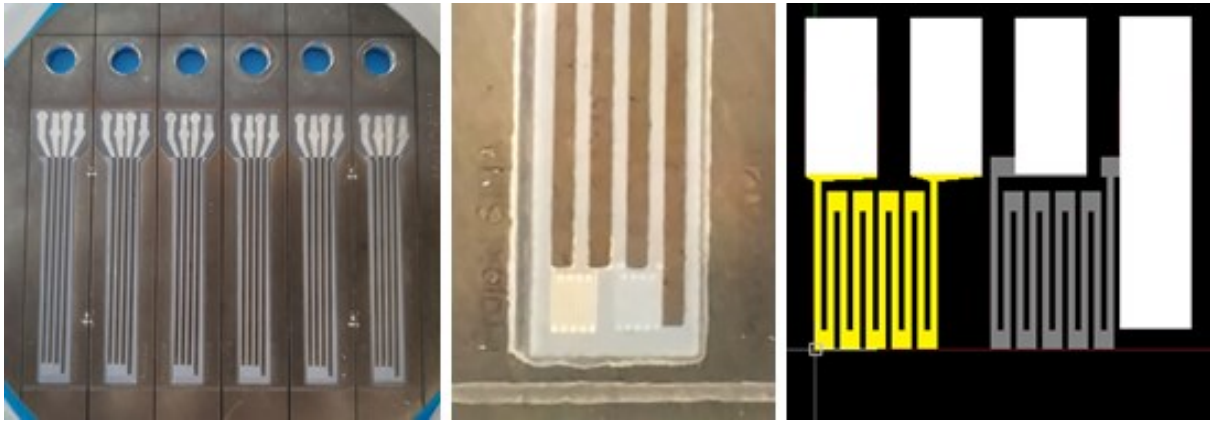


Abbildung 52: Design des 2-Metall-Sensors und die Lage der Mäander aus Gold und Platin, Strukturbreite der Leiterbahn 0,6 mm, Strukturbreite der Mäander 50 µm

Die Dimensionierung vom Substrat, sowie die Position der Mäander sind auf eine neu konzipierte Druckguss-Kokille angepasst, die in situ Messungen über die vier Kontakt-Pins während des Druckgusses ermöglichen sollen. Die Kokille wird als Formeinsatz in einer *Frech DAK 250* Druckgussmaschine verwendet. In der folgenden Abbildung ist eine Kavität der Gussform, ein eingebettetes Blech ohne Sensorik, ein Sensor sowie eine vergrößerte Abbildung der Kontaktpins inklusive Zuordnung dargestellt.

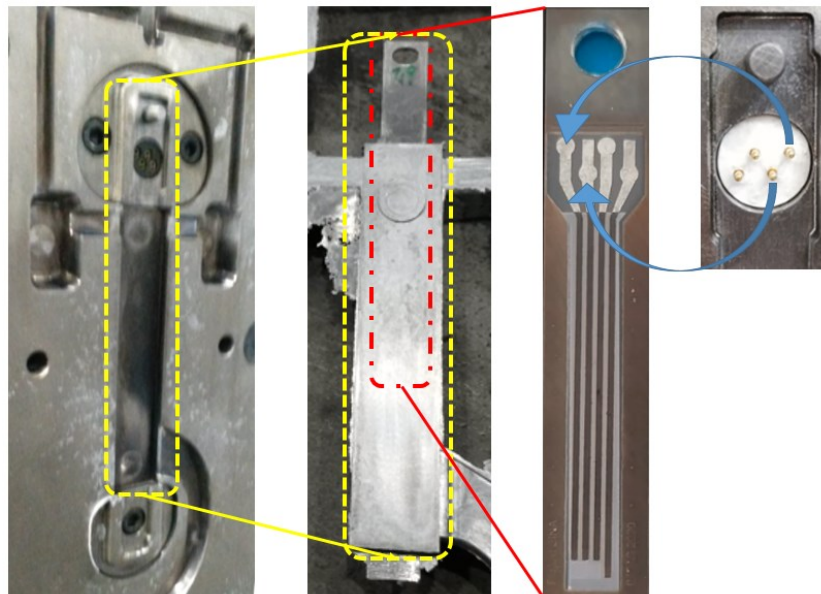


Abbildung 53: Kavität der Druckgussform zur in situ Messung mit Guss und Zuordnung des Sensors in Relation zum Werkstück, sowie zur in situ Messung. Der Werkzeugeinsatz entstand im Rahmen des Projekts SINA in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFAM

Während der Zeit dieser Arbeit konnte die Druckgussmaschine leider nicht mehr genutzt werden, da die Druckgussform noch nicht abschließend in der Druckgussmaschine zur Verfügung stand. Der Formeinsatz wurde für eine Überarbeitung erneut ausgebaut und die Druckgussmaschine für andere Versuche umgerüstet.

5.8.2. Messung Klimakammer

In einer Klimakammer wurde der TCR der beiden Mäander ermittelt, dazu wurde ein Temperaturbereich von 10 bis 50 °C durchlaufen und der Widerstand kontinuierlich gemessen. Das Ergebnis der TCR Ermittlung für beide Metallisierungen ist in der folgenden Abbildung 54 dargestellt.

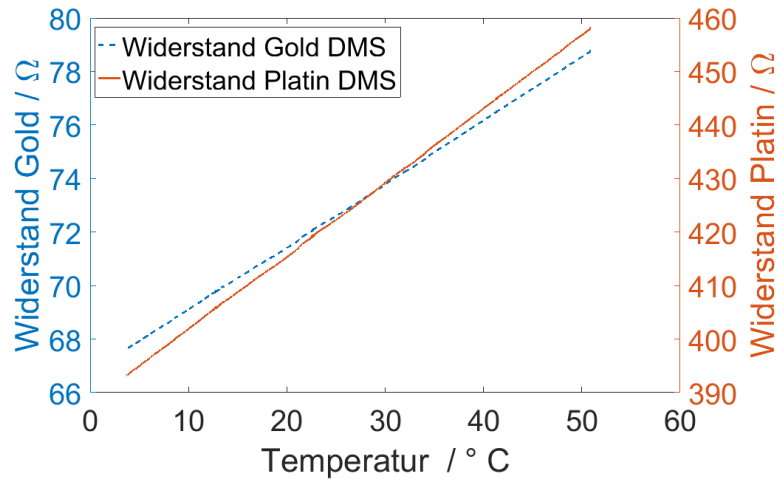


Abbildung 54: Ermittlung der TCR-Werte beider Metallisierungen im Klimakammer-Versuch

Die folgende Tabelle fasst die Messwerte für den diskutierten zusammen. Außerdem beinhaltet die Tabelle eine fiktive Nickel-Metallisierung.

Tabelle 8: Daten für die Dehnungsmessstreifen

Material für DMS	Ausgangswiderstand bei 0 °C [Ohm]	Steigung [Ohm/ °C]	TCR [E-3K-1]
Gold	66.64	0.2351	3,53
Platin	387.6	1.367	3,55
Nickel (fiktiv)	300	2.01	6,7

Um die Widerstandsänderung bedingt durch Temperatur und Dehnung eindeutiger differenzieren zu können, ist ein stark abweichender TCR hilfreich. In der folgenden Abbildung wurde die Widerstandsänderung eines fiktiven Nickel DMS im Vergleich zu den hergestellten Widerständen angegeben. Durch die größere Steigung wäre Nickel ein geeignetes Material, sofern die notwendigen Voraussetzungen für den Gesundheitsschutz während der Herstellung gewährleistet sind.

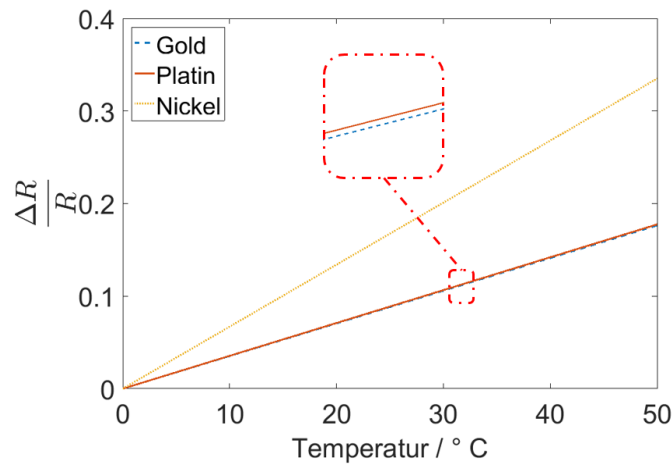


Abbildung 55: Widerstandsänderung durch Temperatur im Vergleich verschiedener Materialien

5.8.3. Erste Lastwechsel und die Ermittlung der K-Faktoren

Im Anschluss an den Versuch in der Klimakammer wird der 2-Metall-Sensor als Biegebalken in der mechanischen Prüfmaschine eingespannt und über drei Zyklen à zehn Lastwechsel inklusive Auf- und Abblenden einer Dehnung ausgesetzt; die Lastwechsel finden bei 0,1 Hertz, mit einer Amplitude von 0,3 mm statt. Aufgezeichnet werden dabei sowohl der Weg des Stempels als auch der Widerstand beider Metalle sowie die Temperatur auf dem Biegebalken in Sensornähe. In der folgenden Abbildung 56 sind die ersten Lastwechsel und absoluten Ausgangswiderstände dargestellt. Der Stempel drückt weggesteuert auf den Biegebalken und der 2-Metall-Sensor erfährt Dehnung, ähnlich des Versuchsaufbaus aus Kapitel 5.7 vor der Einbettung des Substrates mit Vollbrücke im Aluminiumguss.

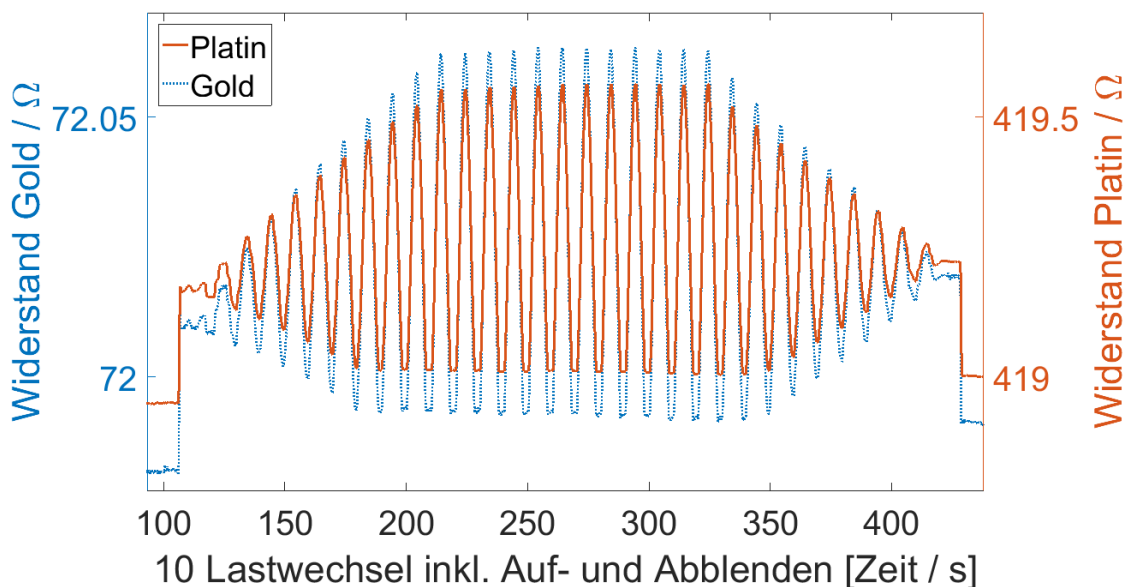


Abbildung 56: Absolute Widerstandsänderung durch Dehnung (0,1 Hz Druckschwellbelastung)

Der Widerstand des Gold-DMS erfährt durch die Dehnung eine Widerstandsänderung von ca. 71 mOhm. Der Platin-Widerstand ändert sich um ca. 555 mOhm. Die Temperatur in der

Prüfkammer ist während der ersten zehn Lastwechsel nahezu unverändert.

In Verbindung mit einer FE-Simulation des Biegebalkens zur Ermittlung der Dehnung können die K-Faktoren berechnet werden. Dazu wurde eine FE-Simulation als digitale Kopie des Versuchsaufbaus erstellt. Der Biegebalken wird durch den Stempel der Prüfmaschine 60 mm rechts der festen Einspannung bewegt. Bei 0,6 mm Auslenkung und einem DMS, welcher sich 3 mm rechts der festen Einspannung befindet, beträgt die maximale Dehnung laut FE-Simulation 0,0475 %. Die maximale Dehnung von Metallen liegt bei ca. 0,2 %. Mit ca. 1/4 der für Metalle üblichen Dehnung befindet sich der Versuch im elastischen Bereich.

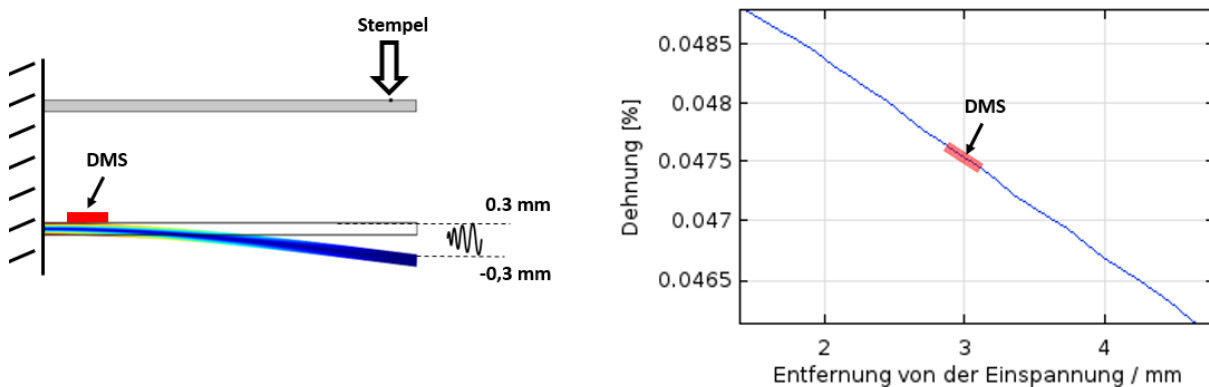


Abbildung 57: Dehnung aus der Finite-Elemente-Simulation

Die K-Faktoren werden aus den gemessenen Widerstandsänderungen beider Metalle während der Lastwechsel und der Dehnung aus der FE-Simulation berechnet.

Tabelle 9: Messwerte zur Ermittlung der K-Faktoren bei einer angenommenen Dehnung aus der FE-Simulation von 0,0475 % bei einer Amplitude von 0,3 mm

Material für DMS	Widerstandsänderung dR in Ohm	$\frac{dR}{R}$	E [%]	K-Faktor
Gold	0,0707	0,0009817	0,0475	2,07
Platin	0,5557	0,0013244	0,0475	2,79

Die FE-Simulation wurde benötigt um die K-Faktoren im Versuchsaufbau initial berechnen zu können.

5.8.4. Auswertung der Lastwechsel mit 2-Metall Sensor Modell

Mit den ermittelten TCR und K-Faktor Werten für beide Metalle kann das in Kapitel 2.3 vorgestellte Modell zur Ermittlung von Dehnung und Temperatur aus den gemessenen Widerstandswerten angewendet werden (siehe Anhang A - Programmcode).

In der folgenden Abbildung 58 wird das Modell auf die in Abbildung 56 dargestellten Werte aus den Lastwechselversuchen angewendet.

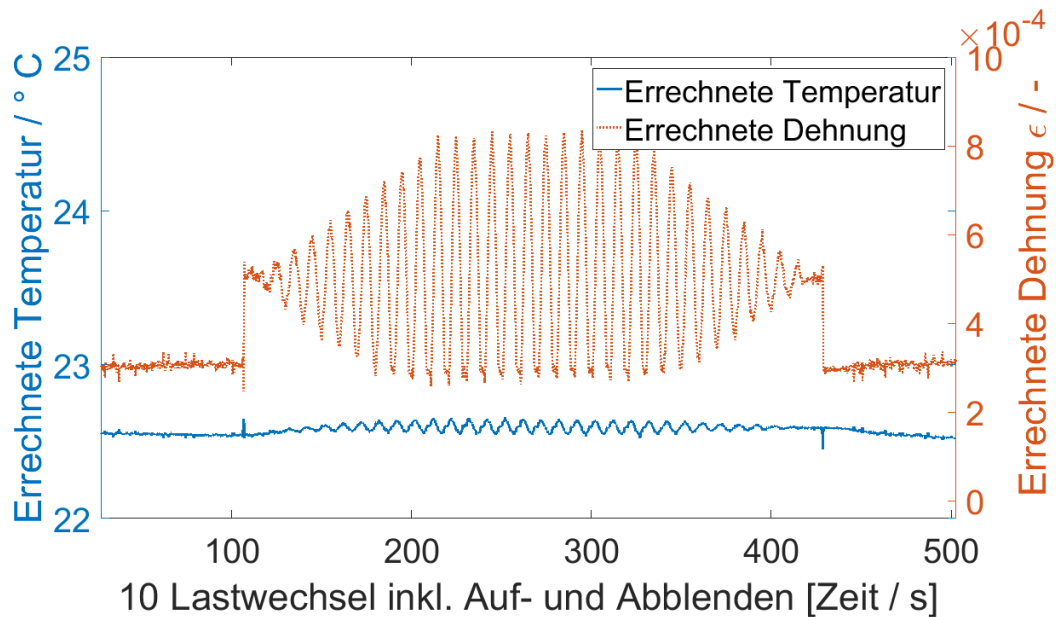


Abbildung 58: Errechnete Temperatur und Dehnung aus dem Modell

Die errechnete Temperatur ist auf der linken X-Achse abgetragen und bleibt in einer $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Bandbreite. Der Einfluss der Dehnung ist vorrangig in der errechneten Dehnung, welche auf der rechten X-Achse abgetragen ist, wiederzufinden. Grundsätzlich zeigt das Modell eine Trennung zwischen Temperatur und Dehnung, wobei im Temperatursignal die Lastwechsel erkennbar sind. Außerdem sind zu Beginn und zum Ende der Einwirkung des Stempels Spitzen auf dem Temperatursignal. Diese sind vermutlich mechanischer Natur und durch den Stempel verursacht. Unterhalb ist die aus dem Modell errechnete Dehnung, sowie der gemessene Weg des Stempels abgebildet.

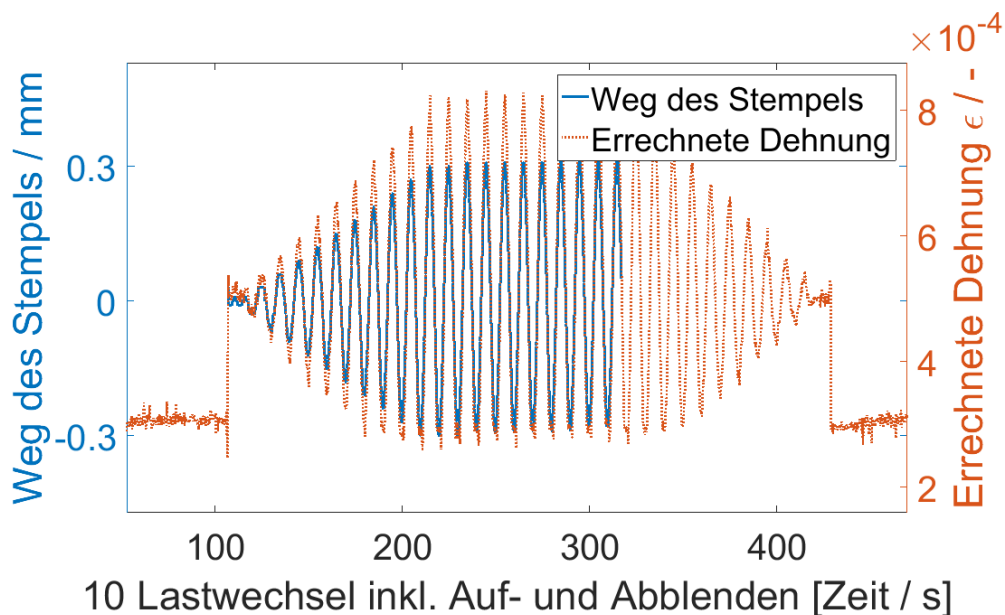


Abbildung 59: Gemessener Weg des Stempels im Vergleich zur errechneten Dehnung; der Weg des Stempels wurde zur besseren Darstellung invertiert. Die Amplitude im Schwingversuch beträgt $0,3\text{ mm}$, respektive $0,6\text{ mm}$ von Spitze zu Tal

Die im Lastwechsel-Versuch aus dem Modell errechnete Dehnung liegt mit 0,0552 % ca. 16 % über der aus der FE-Simulation erwarteten Dehnung. Außerdem liegt ein Versatz der errechneten Dehnung zum Zustand des nicht belasteten Biegebalkens von 0,03 % vor. Mögliche Gründe für die Differenz könnten die auf dem Biegebalken angebrachten und nicht vollständig abgestützten Kabel für die Messung von Temperatur und Widerstand sein. Die Gewichtskraft der Kabel könnte eine Dehnung im Biegebalken verursachen.

5.8.5. Lastwechsel-Versuche unter dem Einfluss von Temperatur

Die aus dem Modell errechnete Temperatur im Vergleich zur gemessenen Temperatur während der ersten zehn Lastwechsel ist in Abbildung 60 dargestellt. Die beiden Pfeile weisen auf den Beginn und das Ende der Beeinflussung durch den Stempel der Prüfmaschine hin.

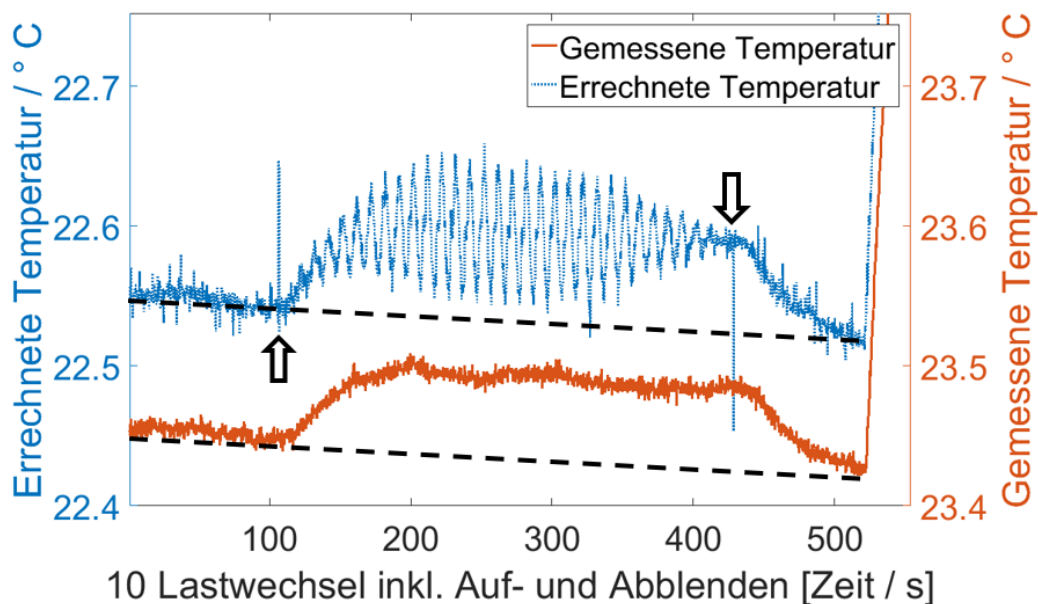


Abbildung 60: Vergleich der errechneten Temperatur mit der gemessenen Temperatur in Sensornähe auf dem Biegebalken

Auffällig ist hier - neben dem um 1 °C absolut abweichenden Temperaturwert zwischen dem Modell und der Messung - die erhöhte Temperatur während der Lastwechsel. Während der ca. zehnmütigen Darstellung fällt die Temperatur im Raum um ca. 0,03 °C. Die beiden mit einem Pfeil in der Abbildung markierten Spitzen in der errechneten Temperatur erfassen den Moment, in dem der Stempel den Biegebalken vor dem Aufblenden berührt bzw. ihn anschließend wieder verlässt. Ein möglicher Grund für die Spitzen während der schnellen Änderung der Dehnung durch den Stempel kann in kurzzeitig abweichenden Dehnungszuständen durch einen Versatz in der Parallelität zwischen Stempel und Biegebalkenoberfläche liegen. Der Biegebalken würde dann zusätzlich zur Dehnung eine

Verdrehung erfahren, die die beiden nebeneinander, aber nicht ineinander liegenden Mäander unterschiedlich erfassen.

Die erhöhte Temperatur tritt mit leichter Verzögerung zu den Lastwechseln auf und kann auch auf dem Temperatursensor in Mäandernähe aufgezeichnet werden. Eine Minute nach dem Ende der Einwirkung durch den Stempel sinken die errechnete und gemessene Temperatur wieder und gleichen sich der allgemein fallenden Raumtemperatur an. Ein möglicher Grund für die erhöhte Temperatur kann eine durch mechanische Arbeit im Material verursachte Temperatursteigerung sein.

Anschließend an die zehn Lastwechsel bei annähernd konstanter Temperatur erfolgen zwei weitere Lastwechselzyklen à zehn Lastwechsel während einer steigenden Temperatur, sowie während der Abkühlphase im Anschluss an die Temperatureinwirkung. Die Temperatureinwirkung wird durch eine 60 Watt Glühbirne unterhalb des Biegebalkens verursacht.

Die Abbildung 61 zeigt die absoluten Ausgangswiderstände bei drei Lastwechselzyklen inkl. Auf- und Abblenden unter dem Einfluss schwankender Temperatur.

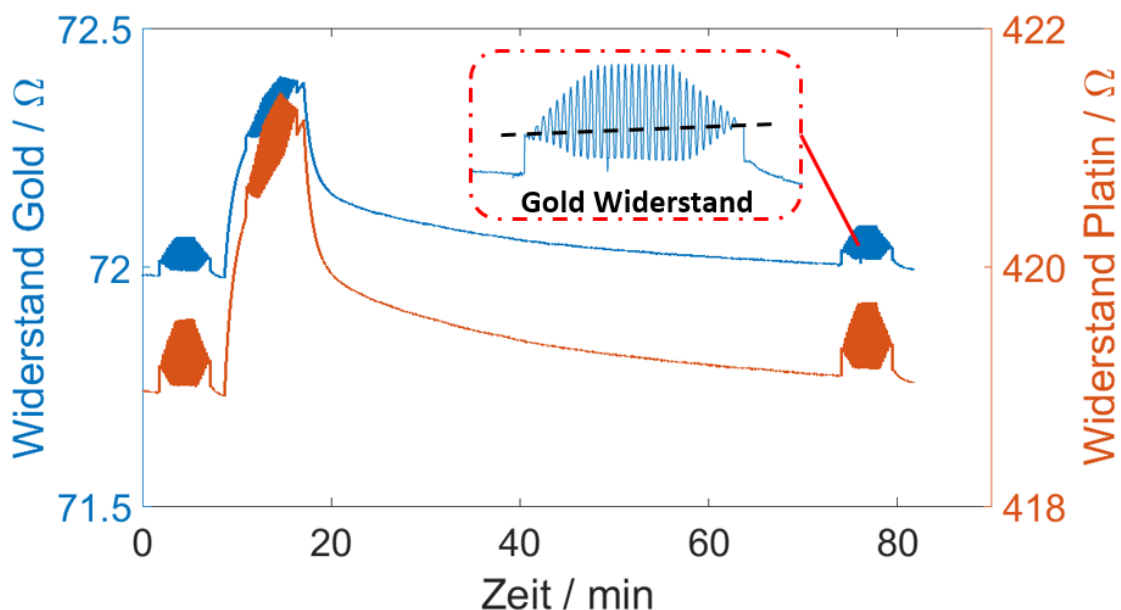


Abbildung 61: Gesamter Versuchsablauf

Zu erkennen ist die Temperatur als dominierender Einflussfaktor auf den Widerstand. Mit einer Glühbirne wird die Temperatur am Sensor um ca. 2 °C erhöht. Der vergrößerte Ausschnitt des Gold-Widerstands, zeigt exemplarisch dargestellt, das Verhalten eines steigenden Widerstands in Verzögerung zu den Lastwechseln; insgesamt kühlt der Sensor ab, wird jedoch durch mechanische Arbeit während der zehn Lastwechsel erwärmt.

Außerdem ist eine Datenanomalie in Form eines geringeren Widerstandswerts während des letzten Lastwechsel-Prüfzyklus aufgezeichnet worden. In der folgenden Abbildung sind die

errechnete Temperatur sowie die oberhalb des Biegebalkens auf dem Substrat gemessene Temperatur dargestellt. Die gemessene Temperatur wird durch ein Thermoelement erfasst.

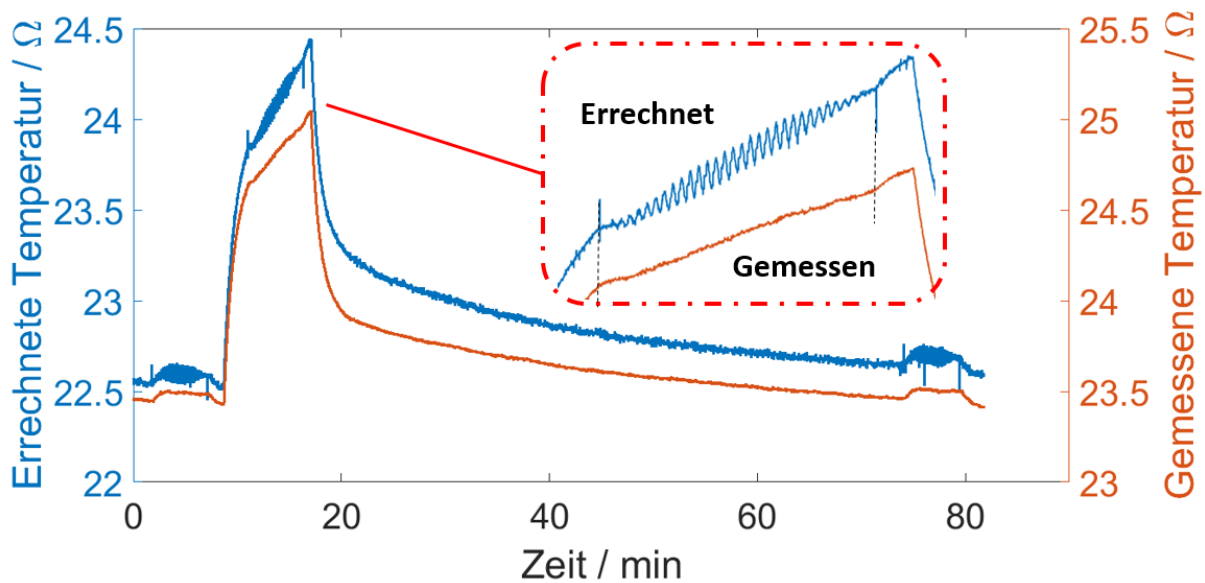


Abbildung 62: Errechnete und gemessene Temperatur für alle Prüfzyklen

Sowohl die gemessene als auch die errechnete Temperatur steigen durch den Einfluss der eingeschalteten Glühbirne unterhalb des Biegebalkens. Die errechnete Temperatur aus den Sensordaten steigt dabei absolut um $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ während die gemessene Temperatur um $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ steigt.

Der Stempel der Prüfmaschine besteht aus massivem Werkzeugstahl und hat die Temperatursteigerung durch die Glühbirne aufgrund einer höheren thermischen Kapazität noch nicht erfahren. Dadurch könnte die Wärme aus dem schon erwärmten Biegebalken durch Konduktion in den Stempel fließen. Sobald der kühlere Stempel den Biegebalken wieder verlässt, steigt die Temperatur mit einer größeren Steigung an, bis die Lampe ausgeschaltet wird. In der Abbildung 62 wurde der Zeitraum, in dem der Stempel den Biegebalken berührt, durch gestrichelte Linien im vergrößerten Ausschnitt kenntlich gemacht.

Es folgt die Betrachtung der errechneten Dehnung, welche in Abbildung 63 zusammen mit der gemessenen Temperatur dargestellt ist. Der Bereich der starken Temperaturänderung um den zweiten Prüfzyklus ist vergrößert abgebildet.

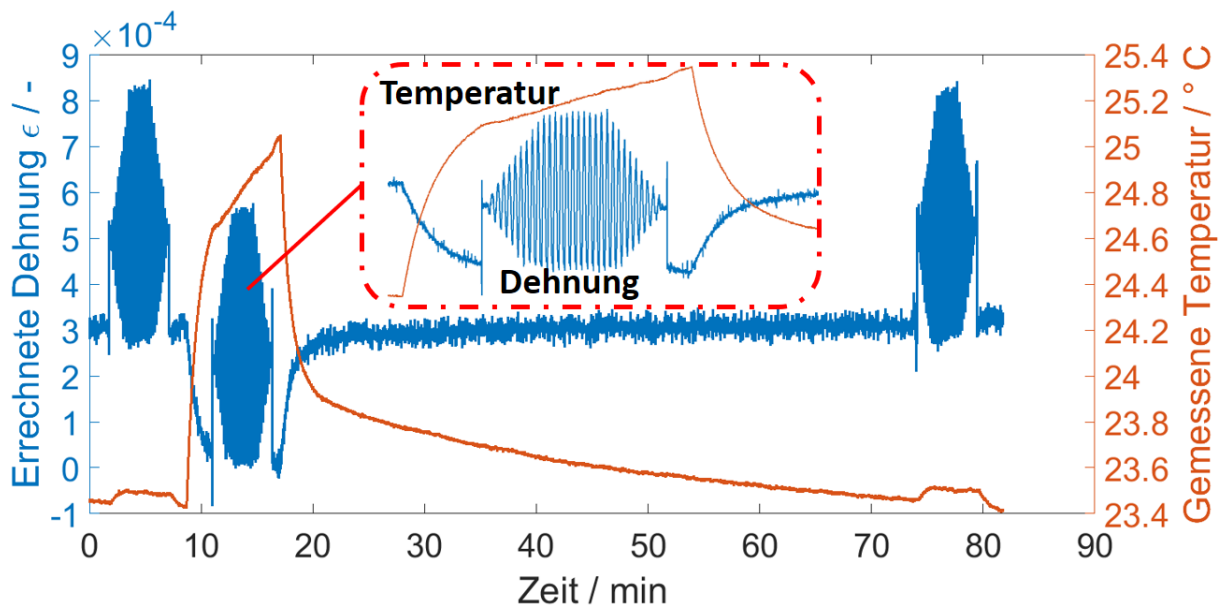


Abbildung 63: Errechnete Dehnung gegen gemessene Temperatur für die gesamten drei Prüfzyklen

Die errechnete sich verringemde Dehnung wird hier als Stauchung des Sensors ausgelegt. Die Stauchung in steigender Temperatur als überlagernder Faktor vor der Erfassung der Dehnung durch den einwirkenden Stempel ist auffällig. Die durch den Stempel bewirkte Dehnung äußert sich zwar absolut in einer tieferen errechneten Dehnung. Aber eine relative Abweichung zwischen den beiden Prüfzyklen vor und während des Temperaturanstiegs ist nicht festzustellen. Die errechnete Dehnung bleibt bei 0,052 %.

Der Versuchsaufbau zur Temperatursteigerung erfolgt durch eine Glühbirne unterhalb des Biegebalkens. Die Unterseite des Biegebalkens wird daher zuerst von der Wärmestrahlung beeinflusst. Der Biegebalken wird sich vermutlich wie in der folgenden Abbildung aus einer entsprechenden FE-Simulation mit unterschiedlichen Oberflächentemperaturen durch die stärkere thermische Ausdehnung der Unterseite des Biegebalkens krümmen.



Abbildung 64: Stauchung des DMS durch eine simulierte statische Temperaturdifferenz von 2 °C zwischen der Ober- und Unterseite des Biegebalkens

Der Biegebalken wurde außerdem ohne Anregung durch den Stempel nur durch die Glühbirne erwärmt, die errechnete Temperatur steigt dabei von 22 auf 23,6 °C und die errechnete Dehnung zeigt dabei wieder die zu erwartende Stauchung.

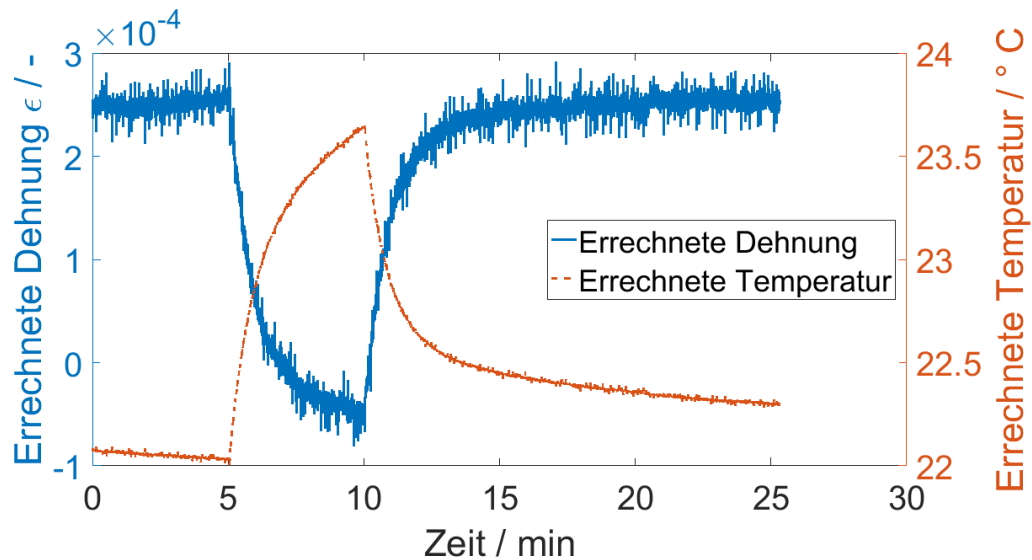


Abbildung 65: Stauchung des Biegebalkens durch Temperatur ohne Einwirkung des Stempels

Die Stauchung von absolut 0,03 % entspricht in etwa der Stauchung, welche auch als Überlagerung in den vorher gezeigten Versuchen mit zusätzlicher Dehnung durch den Stempel auftritt.

Mit dem 2-Metall-Sensor werden sowohl die Temperatur als auch die Dehnung erfasst. Die Messdaten inklusive Modell zeigen daher den Zustand des Biegebalkens an. Die Dehnung, die der Sensor im Versuch erfährt, besteht aus zwei Komponenten. Eine Streckung durch den Einfluss des Stempels sowie eine Stauchung durch thermisch induzierte Verformung des Substrats.

6. Sensoren auf Substraten aus Stahl

6.1. Pulverauftragsschweißen

Die gießtechnische Einbettung von Sensoren in Bauteilen aus Stahl ist bisher aufgrund der hohen Temperaturen von über 900 °C beim Stahlguss nicht möglich. Entweder werden die DMS auf der Oberfläche montiert oder in einem kleinen Bohrloch im Bauteil verklebt. Ein neues Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Stahl ist das Pulverauftragsschweißen. Stahlpulver wird hier mit einem Schutzgas in einen fokussierten Laser geblasen, ein Teil der Energie des Lasers wird vom Pulver absorbiert, wodurch das Pulver stark erhitzt wird. Ein weiterer Teil der Energie des Laserstrahls trifft auf das Substrat und schmilzt dieses lokal auf. Das Pulver verschmilzt an der aufgeschmolzenen Oberfläche mit dem Werkstück und bildet eine neue Materialschicht. Wenn zukünftig Bauteile aus Stahl generativ im Verfahren des Pulverauftragsschweißen gefertigt werden, kann auch hier eine Integration von Dehnungsmessstreifen in das Bauteil von Vorteil sein. Der Vorteil der Sensorintegration liegt zum Beispiel darin, direkt an spezifischen Stellen im Bauteil messen zu können oder wenn das Bauteil einer rauen Umgebungsbedingung ausgesetzt ist bzw. eine äußere Anbringung nicht gewünscht oder machbar ist.

Im Verfahren des Pulverauftragsschweißens kann durch die Ringspaltdüse richtungsunabhängig neues Material aufgetragen werden. Das feine Pulver sorgt für einen nahezu porenfreien Materialauftrag, als Korrosionsschutz kommen unter anderem Nickel- und Chrom-Nickel-Stahlpulver zum Einsatz. Für Hochtemperaturanwendungen wird Pulver mit Kobalt Anteilen wie Stellite verwendet. Für Anwendungen im Verschleißschutz können auch karbidhaltige Werkstoffe wie NiBSI oder WSC verwendet werden. Generell können viele Werkstoffe zur generativen Fertigung im Verfahren des Pulverauftragsschweißens verarbeitet werden. Darunter fallen auch Stahllegierungen mit Aluminium-, Kupfer- und Titananteilen. Es können jedoch auch Silber oder Kupfer Bauteile aus Vollmaterial im Pulverauftragsschweißen generativ gefertigt werden.

In der Abbildung 66 sind der fokussierte Laserstrahl und die Pulverzuführung aus einer Ringspaltdüse in der oberen Hälfte zu sehen. Die untere Bildhälfte stellt das Substrat sowie Wärmeeinflusszone im Pulverauftragsschweißen dar. Durch das fokussierte Aufschmelzen ist die Durchmischung gering und der Wärmeeintrag für das umliegende Werkstück wird minimiert. Die Temperatur kann bereits kurz nach dem Schweißen im Bereich des neu generierten Materials wesentlich geringer sein als bei vergleichbaren Werkstücken aus dem Kokillenguss. Der Wärmeeintrag in das Werkstück variiert in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit, Geometrie und Wärmekapazität des Werkstücks. Die Temperaturverteilung sowie die maximale Temperatur sind dabei unter anderem abhängig

von der aktiven Zeit des Lasers, sowie der örtlichen Nähe zweier neu generierter Volumina auf dem Substrat.

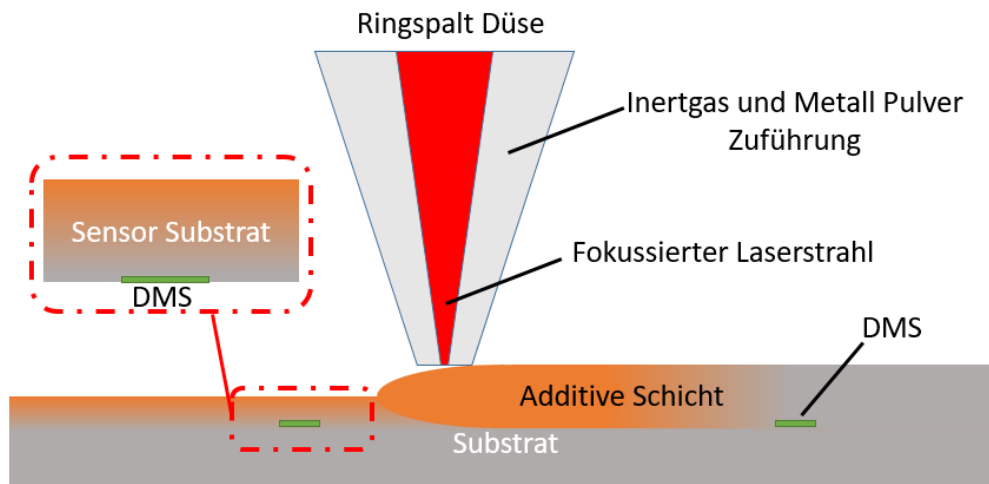


Abbildung 66: Schematische Darstellung vom Verfahren des Pulverauftragsschweißens inkl. Eingebetteter Sensorik

6.2. Konzept zur Einbettung in Stahl

In Zusammenarbeit mit der Forschergruppe um Eric McDonald und Michael Juhasz aus den USA wurden piezoresistive Dickschichtsensoren im Verfahren des Laserauftragsschweißens in Stahl eingebettet. An der Youngstown State University steht dafür ein umgerüstetes 5-Achs-Bearbeitungszentrum zur Verfügung, welches Bauteile aus 1.4534 (X3CrNiMoAl13-8-2) Stahl im Pulverauftragsschweißen generativ herstellen kann. Die hergestellten sensorischen Bauteile bestehen aus drei Teilen. Einem zweiteiligen Grundkörper in Form einer Zugprobe sowie einem Substrat für den Dickschichtsensor. Das Substrat sowie die untere Hälfte der Zugprobe werden einzeln generativ hergestellt, dann wird der Prozess für die Applikation des Sensors auf dem Substrat unterbrochen. Sobald der Sensor auf dem Substrat appliziert ist und in die untere Hälfte der generierten Zugprobe eingelegt wurde, wird der Prozess fortgesetzt.

Die Explosionszeichnung der Zugprobe ist in Abbildung 67 zu sehen. Die Zugprobe mit Ausnahme der sensorischen Schicht auf dem Substrat wurde aus demselben Material von der gleichen Maschine gefertigt. Dadurch minimiert sich der Fremdkörper-Anteil in der Zugprobe auf ein Minimum. Das Design der Zugprobe wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 6892-1 / ASTM E8 Norm gewählt. Das Substrat mit der piezoresistiven Struktur wird mittig in der Zugprobe über zwei Pins zentriert. Die sensorische Schicht wird nach unten zeigend in die Mulde der Grundplatte eingelegt.

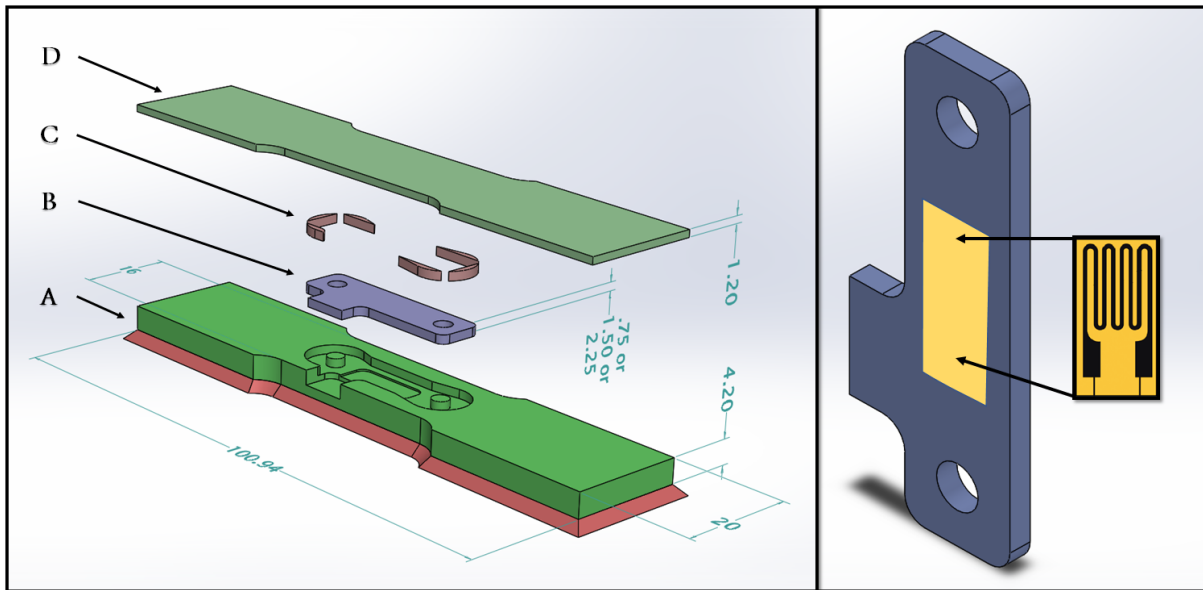


Abbildung 67: Explosionszeichnung der bemaßten Zugprobe in mm; inklusive der schematischen Darstellung des Sensors {Eigene Veröffentlichungen [3]}

Da die Temperatur im Pulverauftragsschweißen über dem Schmelzpunkt des zu verarbeitenden Stahls liegt und durch den fokussierten Laser starken Schwankungen unterliegen kann, wurden verschiedene Substratstärken gewählt. Aufgrund der inhomogenen Temperaturverteilung während des Pulverauftragsschweißens und dem möglichen Schmelzen zu dünner Substrate wurden für die ersten Prototypen drei Substratstärken zu 0,75 mm, 1,5 mm und 2,25 mm gewählt. Aufgrund der Variation der Substratstärke und dem damit einhergehenden variierenden Abstand zum Lichtkegel des fokussierten Lasers wurden die sensorischen Schichten thermisch unterschiedlich stark belastet. Die 2,25 mm dicken Substrate weisen außerdem eine höhere thermische Kapazität auf und verringern die lokalen Temperaturunterschiede im Vergleich zu den 0,75 mm dicken Substraten.

6.3. Verwendete Dickschichtpasten

Für die Herstellung der Dickschichtsensoren wurde ein Pasten-System der Firma Heraeus gewählt, welches auf chromhaltigem Stahl haftet und bei Temperaturen von über 800 °C eingebrannt wird. Insgesamt werden drei verschiedene Pasten verwendet. Eine dielektrische Paste mit der Bezeichnung SD1010A [60] zum Substrat sowie als oberste Schicht zum Schutz der Leiterbahn und des Sensors. Neben der dielektrischen Paste wurde eine Paste aus Silberpartikeln mit der Bezeichnung C8829D [52] als elektrische Zuleitung zum Sensorelement verwendet. Anschließend wurde die piezoresistive Struktur auf die Substrate gedruckt. Die piezoresistive Paste mit der Bezeichnung SR-21 350-100 besteht aus Platin-Partikeln.

6.4. Sensordesign und Herstellung

Der Schichtaufbau des Dickschichtensors wird in Abbildung 68 im Querschnitt sowie der Draufsicht in mehreren Schritten dargestellt. In Schritt 1 werden die hergestellten Substrate für den Siebdruck durch reinigen und polieren vorbereitet, da eine zu raue Oberfläche im Laserauftragsschweißen erreicht wurde. Das auf eine Rauheit von unter 15 µm polierte Substrat wird in Schritt 2 mit drei Schichten Grundisolation versehen. In Schritt 3 wird eine Leiterbahn aufgedruckt. Das piezoresistive Element wird in Schritt 4 platziert. Abschließend werden drei Schichten obere Isolation aufgebracht, um die elektrische Isolation innerhalb des Stahlbauteils gewährleisten zu können.

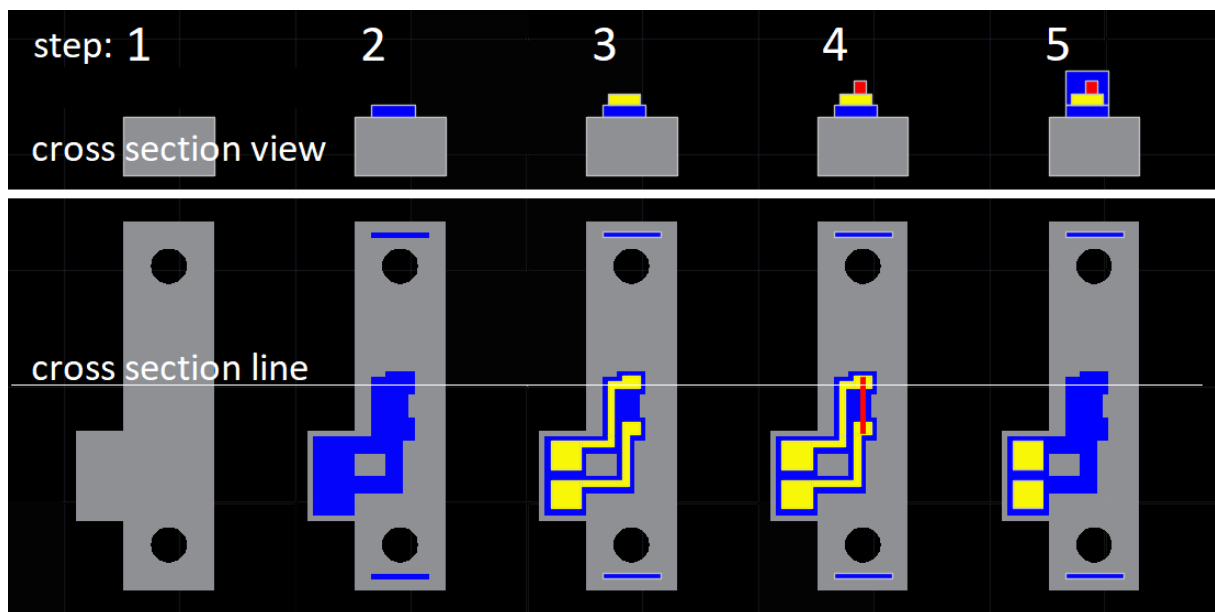


Abbildung 68: Darstellung des Schichtaufbaus der Dickschichtsensoren auf dem Substrat aus Stahl {Eigene Veröffentlichung [3]}

Die eingebrannte Schichtdicke jeder einzelnen Schicht beträgt ca. 18 µm. Die Schichtdicke des Sensors setzt sich aus den einzelnen Lagen zu insgesamt 144 µm zusammen. Das piezoresistive Element hat die Abmessung 0,5 x 5 mm und steht auf einer Länge von 1 mm zwischen den Leiterbahnen frei. Jede Schicht wird einzeln im Siebdruck aufgebracht, bei 150 °C für zehn Minuten getrocknet und bei einer Spitzentemperatur von ca. 850 °C gesintert. Das Sinterprofil ist in der folgenden Abbildung 69 dargestellt.

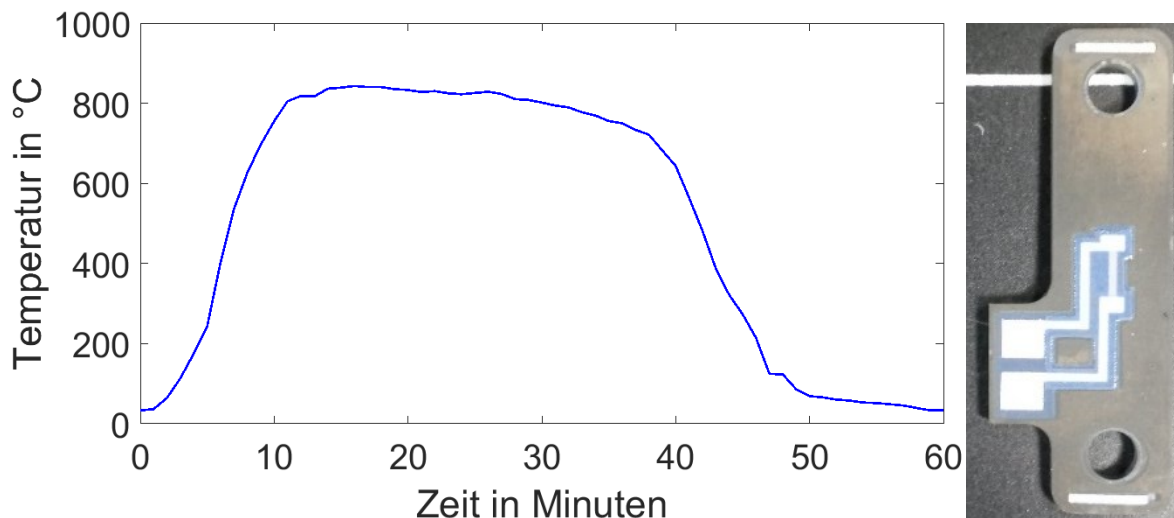


Abbildung 69: Sinterprofil der Dickschichtpasten auf Stahl; Stahlsubstrat mit appliziertem Sensor

6.5. Einbettung im Pulverauftragsschweißen

Die Einbettung erfolgt in mehreren Schritten; zuerst wird das Substrat in die Mulde des unteren Teils der Zugprobe eingelegt. Dann wird das Substrat durch Punktschweißen fixiert. Anschließend wird die Kontur des Substrates im Laserauftragsschweißen abgefahren und die verbleibenden Hohlräume werden gefüllt. Um für die abschließende Einbettung eine ebene Fläche zu haben, wird das Bauteil mit einem Fräser bearbeitet. Durch den Fräsvorgang während der Einbettung zu Abbildung 70(D) wurden ca. 0,25 mm von der Rückseite der Substrate entfernt. Wenn im Folgenden daher z. B. die Substratstärke 2,25 mm genannt wird, bleibt die Verringerung der Substratstärke durch den Fräsvorgang unberücksichtigt. Nach dem Fräsen wird das Bauteil fertig generiert; dies geschieht wie in Abbildung 70(E) gut zu sehen in horizontalen Bahnen, die der Laser während des Pulverauftragsschweißens abfährt. Abschließend wird die Oberfläche mit einem Fräser bearbeitet und die Zugprobe mit integriertem Sensor ist fertiggestellt.

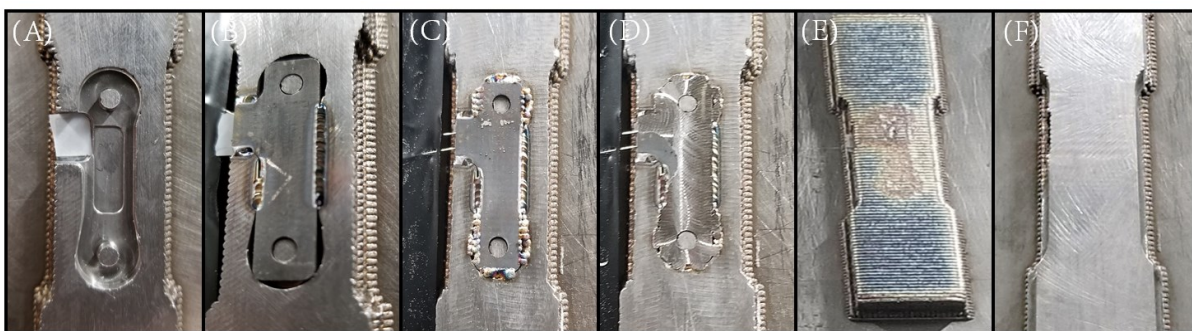


Abbildung 70: Entwicklungsstufen während der Einbettung im Pulverauftragsschweißen {Eigene Veröffentlichungen [3]}

Während der Einbettung wurde der Widerstand der Sensoren gemessen. Die einzelnen Prozessschritte der Einbettung sind in der gemessenen Widerstandsänderung zu erkennen. Da der Sensor keine Temperaturkompensation beinhaltet, ist der TCR im Signal dominierend gegenüber der Widerstandsänderung durch Dehnung. Ein Fräsvorgang auf der Rückseite des Substrates ist in Teilabschnitt C ebenfalls zu sehen.

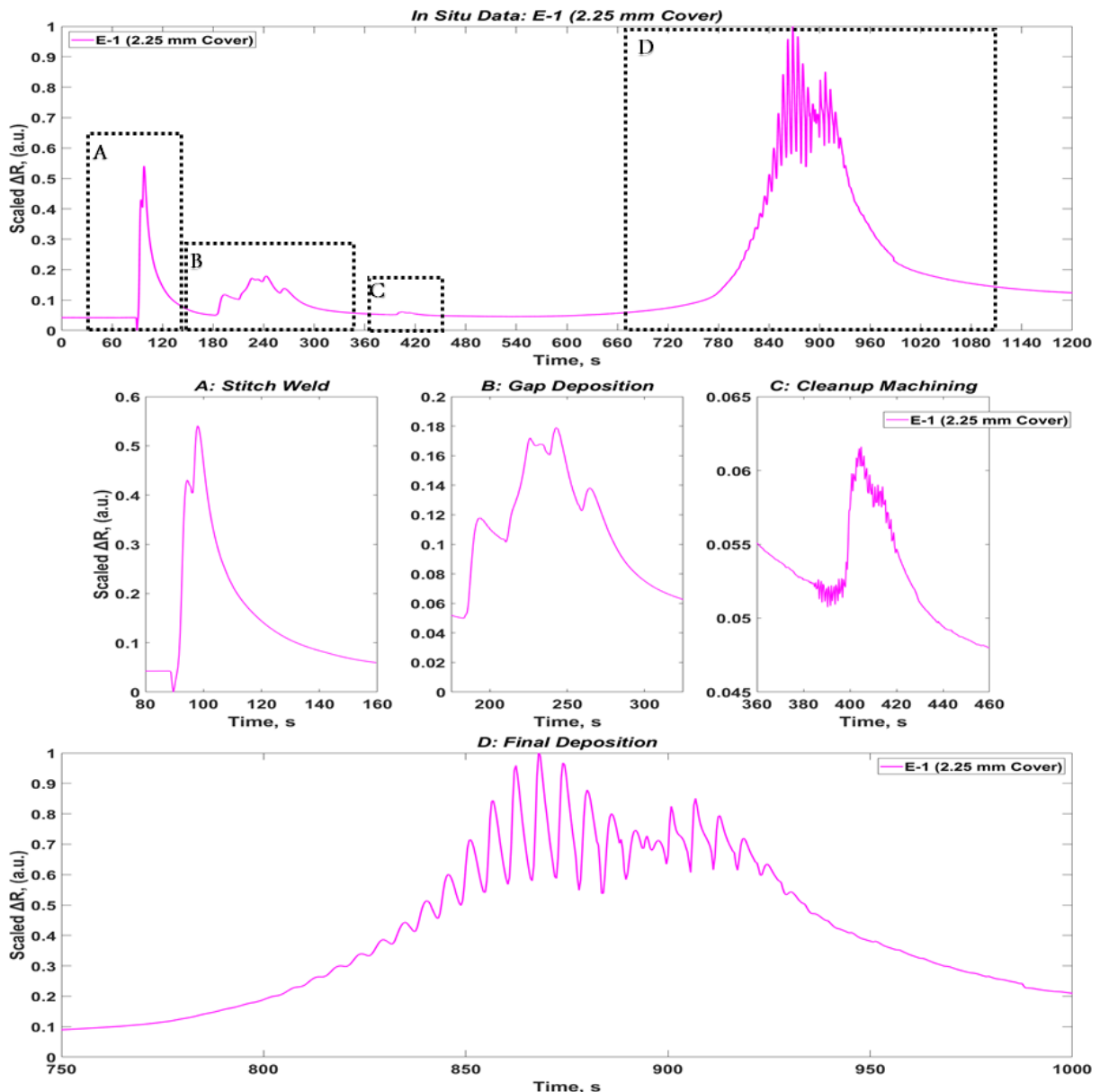


Abbildung 71: Widerstandsänderung des Sensorelements während der Einbettung als Gesamtübersicht sowie abschnittsweise vergrößert dargestellt. A(Punktschweißen); B(Muldenfüllung); C(Fräsvorgang); D(Pulverauftragschweißen); Die Skalierung der Y-Achse zeigt eine prozentuale Widerstandsänderung der Sensoren, der Wert zeigt die maximal aufgezeichnete Widerstandsänderung an und keine absoluten Werte.
 {Eigene Veröffentlichungen [3]}

In Abschnitt A wird der Sensor an das untere Teil der Zugprobe fixiert. Abschnitt B zeigt das Ausfüllen der verbleibenden Mulde zwischen Grundkörper und Substrat. In Abschnitt C ist zu sehen, wie der Widerstand sich während der Zerspannung vom Fräskopf verhält. Hier ist auf

dem Temperatursignal auch die mechanische Dehnung zu sehen. In Abschnitt D ist die eigentliche Einbettung durch Pulverauftragsschweißen zu sehen. Hier fährt der fokussierte Laser während des Pulverauftragsschweißens periodisch über das Substrat.

6.6. Sensorcharakterisierung

Die Sensoren haben nach dem Einbrennen der Topisolation einen Widerstand von unter 6 Ohm. Die Substrate mit einer Materialstärke von 0,75 mm sind nicht geeignet, da die Substrate sich beim Einbrennen der Pasten schon leicht wölben und in der späteren Einbettung von der Energie des Lasers aufgeschmolzen werden. Die 1,5 mm Substrate können die eingebrachte Energie des Lasers abführen, es kommt jedoch zu partiellen Haftungsproblemen zwischen Sensor und Substrat in Form von Abplatzungen. Ein möglicher Grund für die Haftungsprobleme ist ein unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen Substrat und Siebdruckpaste. Dies deckt sich auch mit der zuvor beschriebenen Verformung der 0,75 mm starken Substrate während des Einbrennvorgangs.

Sowohl die 0,75 mm als auch die 1,5 mm dicken Substrate schützen den Sensor nicht ausreichend vor dem Prozess des Pulverauftragsschweißens. Die thermische Belastung im Abschnitt D während der Einbettung führt zu einem Signalverlust der Sensoren. Die 2,25 mm Substrate ließen sich sowohl während des Einbrennens als auch in der Einbettung gut handhaben.

In der folgenden Abbildung ist der Unterschied zwischen einem 0,75 mm sowie einem 2,25 mm Substrat nach der Einbettung zu sehen. Auf der rechten Seite ist außerdem zu sehen, dass das Silber der Leiterbahn vollständig in das verwendete Lot/Lötzinn diffundiert ist. Die Sensoren konnten durch das Auftragen von Silberleitpaste im Anschluss wieder kontaktiert werden.

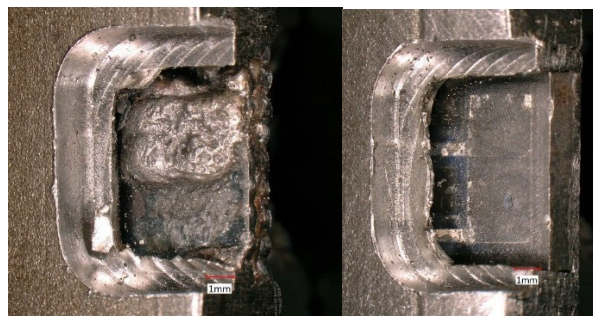


Abbildung 72: Aufgeschmolzenes 0,75 mm dickes Substrat im Vergleich zu einem 2,25 mm starken Substrat, in Anlehnung an Eigene Veröffentlichungen [3]

Die Sensoren der 2,25 mm Substrate sind nach der Einbettung noch kontaktierbar. Die dünneren Substrate sind entweder vollständig aufgeschmolzen oder die Siebdruckpaste hat

sich teilweise vom Substrat gelöst. In der folgenden Abbildung 73 ist ein mechanischer Test einer der 2,25 mm starken Substrate abgebildet. In diesem Versuch wird die Zugprobe in eine mechanische Testmaschine eingespannt und mit einer Kraft von 25 bis 125 MPa zyklisch belastet. Zu sehen ist eine Widerstandsänderung aufgrund der Dehnungsänderung.

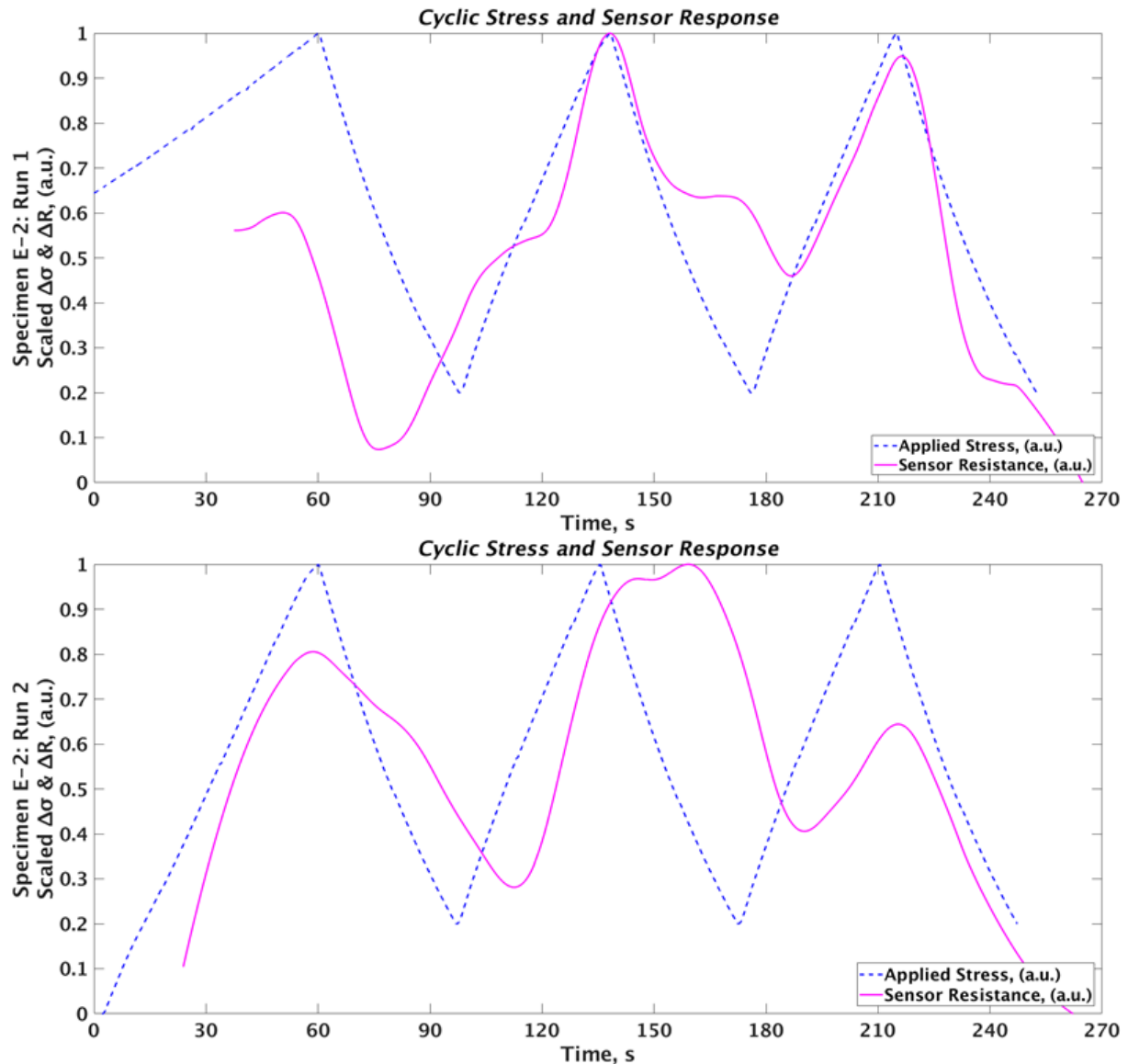


Abbildung 73: Sensorsignal im Zugversuch. Skalierung der Y-Achse zur Darstellung der relativen Widerstandsänderung zur jeweilig maximalen Widerstandsänderung während der Dehnung. {Eigene Veröffentlichung [3]}

Abschließend konnte mit den Sensoren gezeigt werden, dass eine Einbettung von piezoresistiven Sensoren im Pulverauftragschweißen möglich ist. Der Widerstand der Sensoren verändert sich durch Temperatur und Dehnung. Mit einem Sensordesign, welches eine Temperaturkompensation ermöglicht, kann die Dehnung von der Temperatur getrennt werden. Außerdem kann eine Anpassung des Schweißprozesses die thermische Belastung und die inhomogene Temperaturverteilung auf dem Substrat senken. Mit einem angepassten

Schweißprozess kann die benötigte Substratstärke weiter reduziert werden, sodass auch geringere Substratstärken ohne aufschmelzen verwendet werden können.

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung von piezoresistiven DMS zur gießtechnischen Integration im Aluminiumguss. Die Sensoren sollten auf Substraten aus Aluminium aufgebaut werden. Um den Prozess der Einbettung zu überstehen, sollten die Sensoren eine ausreichende thermische und mechanische Stabilität aufweisen. Nach der Einbettung sollten die Sensoren die mechanische Dehnung in Form von Zug- und Druckbelastung im Aluminium erfassen können.

Mit der ersten Generation von Sensoren aus Dickschichttechnik auf Substraten aus Aluminium konnte gezeigt werden, dass eine Integration im Aluminiumguss reproduzierbar gelingt. Der Ausschuss konnte durch den Einsatz einer halbautomatischen Siebdruckmaschine und Verbesserungen im Herstellungsprozess von 50 % mit den ersten Prototypen auf 5 % gesenkt werden. Mit den Sensoren gelingt es die Dehnung im Bauteil zu erfassen und den Bruch der Gussmatrix festzustellen. In Dauerschwingversuchen mit konstanter Druckschwellkraft konnte gezeigt werden, dass ein vorzeitiges Strukturversagen und damit eine Brucherkenkung messtechnisch erfasst werden kann. Ein reproduzierbarer Ausgangswiderstand nach der Einbettung konnte mit den getesteten Dickschichtpasten nicht erzielt werden.

Durch den Schritt der Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht konnten die Vorteile der thermomechanisch robusten Dickschicht mit den Vorteilen reproduzierbarer Dünnschichten verbunden werden. Durch eine PVD-Metallisierung aus Platin mit einem Schmelzpunkt über 1700 °C und einer fotolithografischen Strukturierung im Lift-off-Verfahren konnte ein reproduzierbarer Ausgangswiderstand im eingebetteten Zustand hergestellt werden. Der Lift-off-Prozess musste für die Nutzung auf Dickschichtpasten mit rechteckigen Substraten modifiziert werden. Die Änderung des Ausgangswiderstands nach der Einbettung liegt dabei unter 2 %. Erste in situ Messungen mit einer eigens dafür angefertigten Schwerkraftkokille zeigen, dass die Dickschicht bei erhöhten Temperaturen die Eigenschaft der elektrischen Isolation temporär verliert. Im Kokillenguss eingebettete Sensoren in der Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht können die Dehnung der Gussmatrix durch den Stempel im Messsignal abbilden. Eine Temperaturkompensation ist mit den Sensoren, welche als physikalische Vollbrücke aufgebaut sind, ist weitestgehend möglich; eine Erfassung der Temperatur jedoch nicht.

Aufbauend auf der entwickelten Technologiekombination aus Dünn- und Dickschichttechnik wurden 2-Metall-Sensoren hergestellt, um neben der Dehnung auch die Temperatur aus den gemessenen Widerständen des Sensors ermitteln zu können. Dazu wurde ein Modell

verwendet, um die Dehnung und Temperatur aus zwei thermisch und mechanisch charakterisierten DMS zu ermitteln. Neben der bereits erfolgreich eingebetteten Metallisierung aus Platin konnten erste Prototypen mit einer weiteren Metallisierung aus Gold hergestellt werden. Im Biegebalkenversuch erfassen die Sensoren vor der Einbettung sowohl die Dehnung als auch die Temperatur. Eine absolute Abweichung der errechneten Dehnung aus Versuchen von 16 % gegenüber einer FE-Simulation bleibt bei diesen Prototypen ungeklärt. Der Weg des Stempels wird in Form von Dehnung durch das Modell sehr gut abgebildet und liefert ein konstant reproduzierbares Ergebnis.

Außerdem wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFAM im Rahmen dieser Arbeit Wöhlerversuche durchgeführt um den Effekt des Fremdkörpers zu untersuchen. Bauteile mit eingebettetem Sensor weisen gegenüber Proben aus Vollmaterial eine geringere Lastspielzahl auf. Der Effekt des Fremdkörpers kann durch verschiedene Maßnahmen weiter gesenkt werden, ist jedoch bei der Konstruktion sensorischer Bauteile zu berücksichtigen.

In einer Kooperation mit der Forschergruppe um Eric McDonald und Michael J. Juhasz wurden piezoresistive Dickschichtsensoren im Verfahren des Laserauftragsschweißens eingebettet. Die Substrate aus Stahl wurden dazu an der Youngstown State University im Laserauftragsschweißen generativ gefertigt. In Bremen wurde die Oberfläche der Substrate durch Läppen und Polieren für den Siebdruck vorbehandelt. Piezoresistive Dickschichtsensoren wurden mittels Siebdruck schichtweise auf den Substraten aufgebracht, getrocknet und eingebrannt. Die sensorischen Substrate wurden anschließend zurück an die Youngstown State University gesendet und auf derselben Maschine im Laserauftragsschweißen tiefer in eine Zugprobe des gleichen Materials integriert. Eine in situ Messung während der Einbettung konnte die verschiedenen Bearbeitungsschritte wie das Punktschweißen, Fräsen und die Einbettung selbst aus der Zugprobe heraus erfassen. Die Temperaturen während der Einbettung ließen teilweise das Substrat aus Stahl schmelzen. Mit den Sensoren, die die Einbettung intakt überstanden haben, kann Dehnung gemessen werden.

7.2. Ausblick

Mit 2-Metall-Sensoren aus hochschmelzenden piezoresistiven Materialien wie Platin, Nickel oder eventuell Polysilizium mit unterschiedlichen K-Faktoren und TCR-Werten können voraussichtlich hervorragende Ergebnisse erzielt werden. Um die Reproduzierbarkeit und Qualität der Sensoren weiter zu erhöhen, sollten verschiedene weitere Punkte beachtet werden: durch die Verwendung eines Siebdruckers kann die Isolation aus Dickschicht homogener und in konstanterer Schichtstärke gedruckt werden. Das Substrat aus Aluminium

sollte, insbesondere bei der Nutzung der Fotolithografie, als Rundscheibe in Form eines Wafers verwendet werden. Abhängig vom Gussvolumen, der maximalen Temperatur und der Art der Einbettung können verschiedene Methoden zur Verbesserung von Form- und Stoffschluss angewendet werden.

Im Kokillenguss kann es dazu kommen, dass die Substrate den Schmelzpunkt erreichen. Die Gussform und der Sensor müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass die Schmelze den Sensor nicht wegspült. Um die sensorische Struktur zu erhalten, müssen eventuell Materialien mit höherem Schmelzpunkt zur Verbesserung der strukturellen Integrität eingesetzt werden. Schichten aus galvanischem Nickel in geringer Stärke könnten hier eventuell in Frage kommen, auch Silber bietet bei 700 °C noch ein gewisses E-Modul und kann eine eutektische Verbindung mit Aluminium eingehen.

Wenn das Substrat nicht schmilzt, sollten Maßnahmen zu Form- und Stoffschluss umgesetzt werden, damit der Sensor besser mit der Gussmatrix vereint wird. Dazu eignen sich z. B. Muster in der Dickschicht zur Verklammerung mit der Gussmatrix. Wafer können an entsprechenden Stellen Mulden aufweisen oder mit Durchgangsbohrungen perforiert werden.

Im Druckguss könnten über den Formschluss hinaus, zusätzlich niederschmelzende Materialien wie Zink verwendet werden. Ein mit Zink beschichtetes Substrat kann durch den geringeren Schmelzpunkt schon bei 420 °C eine stoffschlüssige Verbindung zur Gussmatrix eingehen.

Die Isolation aus Dickschicht kann eventuell durch geeignete Dünnschicht ersetzt werden. Die bisherigen Versuche, eine thermomechanisch stabile Dünnschicht auf Substraten aus Aluminium zu entwickeln, sind jedoch nicht zufriedenstellend. In einem speziellen PVD-Verfahren, dem Hochimpuls-Magnetronspütern (engl. „High Power Pulsed Magnetron Sputtering“ - HiPIMS) könnten reaktiv abgeschiedene Aluminiumoxid Schichten erzeugt werden. Diese Schichten sollten durch die Verwendung einer Substrateheizung mit entsprechender Druckvorspannung so eingestellt werden, dass die maximale Zugspannung bei höheren Temperaturen nicht überschritten wird.

Zirkoniumdioxid ist thermoschockbeständig und in der Lage die thermische Ausdehnung von Aluminium unbeschadet zu überstehen, verliert jedoch die elektrische Isolation dauerhaft nach höheren Temperaturen [29, 61]. Eventuell ist ein Schichtpaket mit einer Kombination aus unterschiedlichen Dünnschichten, Diffusionsbarrieren und thermoschockbeständigen Materialien notwendig, um die gewünschten Eigenschaften zu realisieren.

Im Stahl-3D-Druck können Schritte zur Verbesserung des Sensors angewendet werden. Stahl-Wafer können generativ im Laserauftragsschweißen hergestellt werden und im Anschluss an eine Bearbeitung der Oberfläche mit einer CNC-Fräse durch Läpp- und

Polierprozesse für die Dünnschichttechnik vorbereitet werden. Der geringere Ausdehnungskoeffizient von Stahl bietet elektrisch isolierenden Dünnschichten ein breiteres Anwendungsspektrum, da thermische Zugspannungsrisse seltener auftreten. Auch hier kann ein 2-Metall-Sensor zum Einsatz kommen. Während der Einbettung kann die maximale Temperatur in Substratnähe weiter gesenkt werden in dem die Bahnführung des fokussierten Laserstrahls angepasst wird. In der generativen Fertigung könnten zur Temperaturkompensation zusätzlich unbelastete DMS im Stahl neben den stoffschlüssig angebundenen DMS eingedruckt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] X. Li, EMBEDDED SENSORS IN LAYERED MANUFACTURING, STANFORD UNIVERSITY, 2001.
- [2] C. E. Lee, W. N. Gilber, R. A. Atkins, J. J. Alcoz und H. F. Taylor, „Metal-embedded fiber-optic Fabry-Perot sensors,“ *OPTICS LETTERS*, Vol. 16, No. 24, pp. 1990-1992, 1991.
- [3] J. Kobiliska et al., „Rapid fabrication of smart tooling with embedded sensors by casting in molds made by three dimensional printing,“ *Proc. SFF Symp*, pp. 468-475, 2005.
- [4] H. Choi, A. Datta, X. Cheng und X. Li, „Microfabrication and Characterization of Metal-Embedded Thin-Film Thermomechanical Microsensors for Applications in Hostile Manufacturing Environments,“ *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, VOL. 15, NO. 2, pp. 322-329, © 2006 IEEE, 2006.
- [5] X. Li, W. Tang und A. Golnas, „Embedding and characterization of fiber-optic and thin-film sensors in metallic structures,“ *Sensor Review*, Vol. 24 Iss: 4, pp. 370-377, 2004.
- [6] R. Carlsson et. al, „Sensors integrated inside metal castings verified to respond to force,“ *IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*, 2019.
- [7] R. Carlsson, L. Elmquist und C. Johansson, „Cast metal with intelligence – from passive to intelligent cast components,“ *VIII ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*, 2017.
- [8] L. Elmquist, R. Carlsson und C. Johansson, „Cast Iron Components with Intelligence,“ *Materials Science Forum*, Vol. 925, pp. 512-519, 2018.
- [9] R. Carlsson, L. Elmquist, A. Thore, F. Ahrentrop, C. Johansson und B. Israelsson, „Connecting sensors inside smart castings,“ *7th International Symposium on Aircraft Materials (ACMA2018)*, 2018.
- [10] A. Ibragimov und W. Lang, „Micromachined Thermogenerator for High-Temperature Applications,“ *Powermems, Seoul, Korea*, 2011.
- [11] A. Ibragimov, H. Pleteit, C. Pille und W. Lang, „A Thermoelectric Energy Harvester Directly Embedded Into Casted Aluminum,“ *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 33, NO. 2, pp. 233-235, © 2012 IEEE, 2012.
- [12] Rübner, „Integration of Piezoceramic Modules into Die Castings – Procedure and Functionalities,“ *Advances in Science and Technology*, Vol. 56, pp. 170-175, 2008.
- [13] A. Klassen et. al, „Integration of piezoceramic sensors and actuators into structural components via high pressure die casting,“ *Proceedings of the CRC/TR39 3rd Scientific Symposium "Integration of Active Functions into Structural Elements"*, pp. 45-50, 2011.

- [14] V. Bräutigam, M. Rübner, C. Körner und R. Singer, „Druckgießtechnische Integration von piezokeramischen Modulen in Aluminiumbauteile,“ *1. Wissenschaftliches Symposium des SFB/Transregio 39*, pp. 51-56, 2007.
- [15] V. Bräutigam, „Gießtechnische Integration piezokeramischer Module in Aluminiumdruckgussbauteile,“ *Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg*, 2008.
- [16] Pille, „In-Process Embedding of Piezo Sensors and RFID Transponders into Cast Parts for Autonomous Manufacturing Logistics,“ *Smart System Integration, Como, Italy*, 2010.
- [17] C. Pille, W. Franz-Josef und R. Thomas, „Gusskörper, Verfahren zu seiner Herstellung sowie Giesswerkzeug zur Herstellung des Gusskörpers“. Patent EP3064293A1, 03 03 2016.
- [18] Pille, „Encapsulating Piezoresistive Thin Film Sensors Based on Amorphous Diamond-Like Carbon in Aluminium Castings,“ *1st Joint International Symposium on System-Integrated Intelligence*, pp. 192-194, 2012.
- [19] Tseng, „Acoustic Power Transfer and Communication With a Wireless Sensor Embedded Within Metal,“ *IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 18, NO. 13*, pp. 5550-5558, 2018.
- [20] A. Bödecker, C. Habben, A. Sackmann, K. Burdorf, E. Giese und W. Lang, „Manufacturing of a wear detecting sensor made of 17-4PH steel using standard wafer processing technology,“ *Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 171*, pp. 34-37, 2011.
- [21] M. Sarma, F. Borchers, G. Dumstorff, C. Heinzl und W. Lang, „Measuring strain during a cylindrical grinding process using embedded sensors in a workpiece,“ *Journal of Sensors and Sensor Systems Vol. 6*, p. 331–340, 2017.
- [22] G. Dumstorff, M. Sarma, M. Reimers, B. Kolkwitz, E. Brinksmeier, C. Heinzl und W. Lang, „Steel integrated thin film sensors for characterizing grinding processes,“ *Sensors and Actuators A: Physical Vol. 242*, pp. 203-209, 2016.
- [23] J.-F. Lei und H. A. Will, „Thin-film thermocouples and strain-gauge technologies for engine applications,“ *Sensors and Actuators A, Vol. 65*, pp. 187-193, 1998.
- [24] W. Lang, *Sensors and Measurement Systems*, ISBN: 9788770220286: River Publishers, 2019.
- [25] M. J. Druyveseyn, „THE VARIATION OF THE RESISTIVITY OF SOME METALS WITH ELASTIC DEFORMATION,“ *Physica XVII, No. 8*, 1951.
- [26] D. Zymelka, T. Yamashita, S. Takamatsu, T. Itoh und T. Kobayashi, „Printed strain sensor with temperature compensation and its evaluation with an example of applications in structural health monitoring,“ *Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56*, pp. 1-5, 2017.
- [27] D. Zymelka, K. T. Togashi und T. Kobayashi, „Concentric Array of Printed Strain Sensors for Structural Health Monitoring,“ *Sensors Vol. 20(7) © 2020 of the Creative Commons Attribution (CC BY) license*, pp. 1-16, 2020.

- [28] J. K. Sell, H. Enser, M. Schatzl-Linder, B. Strauß, B. Jakoby und W. Hilber, „Nested, Meander Shaped Strain Gauges for Temperature Compensated Strain Measurement,“ *IEEE Sensors*, pp. 1-3, 2017.
- [29] G. Dumstorff, „Modellierung und experimentelle Untersuchungen von materialintegrierten Sensoren,“ *Dissertation der Universität Bremen*, p. 90, 2015.
- [30] D. Gräbner, G. Dumstorff und W. Lang, „Simultaneous Measurement of Strain and Temperature with two Resistive Strain Gauges made from Different Materials,“ *Procedia Manufacturing Vol. 24*, pp. 258-263, 2018.
- [31] R. L. Hannah und S. E. Reed, *Strain Gage User's Handbook*, London: Chapman & Hall, 1992.
- [32] S. Keil, *Dehnungsmessstreifen*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, pp. 15, Reproduced with permission from Springer Nature.
- [33] M. Maiwald, C. Werner, V. Zoellmer und M. Busse, „INKtelligent printed strain gauges,“ *Sensors and Actuators A 162*, pp. 198-201, Copyright (2010), with permission from Elsevier, 2010.
- [34] Sensor-Technik Wiedmann GmbH, „Messtechnik und Sensorik,“ 2010. [Online]. Available: <http://donar.messe.de/exhibitor/interschutz/2015/G259325/UEbersicht-messtechnik-sensorik-ger-125649.pdf>. [Zugriff am 20 07 2020].
- [35] J. Joo, „Low-temperature polysilicon deposition by ionized magnetron sputtering,“ *Journal of Vacuum Science & Technology A 18*, pp. 2006-2011, 2000.
- [36] M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films*, New York: Academic Press, 1991.
- [37] G. Mearini und R. Hoffman, „Tensile Properties of Aluminum/Alumina Multi-Layered Thin Films,“ *Journal of Electronic Materials, Vol. 22, No. 6*, pp. 623-629, 1993.
- [38] J. Stucki, G. Pattison und Q. Hamill, „DIE CAST ALUMINUM ALLOYS FOR STRUCTURAL COMPONENTS“. Patent WO/2021/150604, 21 01 2021.
- [39] G. Dumstorff und W. Lang, „Investigations on the Impact of Material-Integrated Sensors with the Help of FEM-Based Modeling,“ *Sensors, Vol. 15*, pp. 2336-2353, 2015.
- [40] K. Papis, B. Hallsedt, J. Löffler und P. Uggowitzner, „Interface formation in aluminium–aluminium compound casting,“ *Acta Materialia, Vol. 56, Iss. 13*, pp. 3036-3043, with permission from Elsevier, 2008.
- [41] M. Rübner, M. Günzl, C. Körner und R. Singer, „Aluminium–aluminium compound fabrication by high pressure die casting,“ *Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, Iss. 22-23*, pp. 7024-7029, 08 2011.
- [42] M. Schwankl, R. Kellner, R. Singer und C. Körner, „The influence of sandblasting on the morphology of electroless deposited zinclayers on aluminum sheets,“ *Applied Surface Science*, pp. 202-208, 10 2013.

- [43] C. Körner, M. Schwankl und D. Himmler, „Aluminum–aluminum compound castings by electroless deposited zinc layers,“ *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 214, Iss 5, pp. 1094-1101, 5 2014.
- [44] Y. Kuromitsu et al., „Direct bonded aluminum on aluminum nitride substrates via a transient liquid phase and its application,“ *CIPS*, p. Paper 11.1, 2010.
- [45] F. Shao-Wei und Chin C. Lee, „Direct bonding silver to aluminum using eutectic reaction in air,“ *IEEE: Electronic Components and Technology Conference*, 68th, pp. 545-550, 2018.
- [46] Y. Wu und C. Lee, „Bonding Silicon Chips to Aluminum Substrates Using Ag–In System Without Flux,“ *IEEE: TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, Vol. 3, No. 5, pp. 711-715, 2013.
- [47] G. Dumstorff, C. Pille, R. Tiedemann, M. Busse und W. Lang, „Smart aluminum components: Printed sensors for integration into aluminum during high-pressure casting,“ *Journal of Manufacturing Processes* 26, pp. 166-172, 2017.
- [48] M. Prudenziati, *HANDBOOK OF SENSORS AND ACTUATORS 1 Thick Film Sensors*, Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [49] RHEINFELDEN ALLOYS GmbH & Co.KG, „Silafont-36,“ [Online]. Available: <https://rheinelden-alloys.eu/wp-content/uploads/2016/01/05-Sf-36-286-Merkmale-RHEINFELDEN-ALLOYS-2016.pdf>. [Zugriff am 09 01 2022].
- [50] Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, „Heraeus Celcion - Materials System for LED Circuits,“ [Online]. Available: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/Brochure_Heraeus_Celcion_-_Materials_System_for_LED_Circuits.pdf. [Zugriff am 17 12 2022].
- [51] Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, „Dielectrics for Aluminum Substrates IP6075,“ [Online]. Available: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/thick_film_data_sheets/hybrid_electronics/alternative_substrates/Dielectrics_IP6075.pdf. [Zugriff am 12 11 2020].
- [52] Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, „Low Temperature Silver Conductor C8829D,“ [Online]. Available: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/thick_film_data_sheets/hybrid_electronics/alternative_substrates/Conductors_C8829D.pdf. [Zugriff am 12 11 2020].
- [53] Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, „Resistor System HTR12000AR,“ [Online]. Available: https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/thick_film_data_sheets/hybrid_electronics/alternative_substrates/Resistors_HTR12000AR_Series.pdf. [Zugriff am 12 11 2020].
- [54] Tanaka Kikinzoku International, *Datenblatt RR-41 Serie*, Japan, 2016.
- [55] Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, „Dielectrics for Aluminum Substrates IP6080A,“ [Online]. Available:

https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/thick_film_data_sheets/hybrid_electronics/alternative_substrates/Dielctrics_IP6080A.pdf. [Zugriff am 07 01 2023].

- [56] Pröll Services GmbH, „Einweg-Siebdruckschablonen,“ [Online]. Available: <https://cdn.proell-inks.com/c/1/c/f/c1cff35bf5a57a7a8e8a33e5b92c0440aa8b9a17/Proell-Services-Einweg-Siebdruckschablonen-5-2021.pdf>. [Zugriff am 2023 02 05].
- [57] Merck KGaA, „AZ® 1500 Series,“ [Online]. Available: https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_1500_series.pdf. [Zugriff am 09 07 2022].
- [58] Merck KGaA, „AZ® Organic Developers,“ [Online]. Available: https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_mif_developer.pdf. [Zugriff am 11 07 2022].
- [59] Henze Boron Nitride Products AG, „HeBoCoat® Bornitrid-Beschichtungen,“ [Online]. Available: https://www.hswalsh.com/sites/default/files/related_files/TC0966.pdf. [Zugriff am 15 08 2022].
- [60] Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, „SD 1010A Dielectric Paste for Cromium Steel,“ 2021.
- [61] S. Ikeda, O. Sakurai und K. Uematsu, „Electrical conductivity of yttria-stabilized zirconia single crystals,“ *Journal of materials science* 20, Nr. 12, pp. 4593-4600, 1985.

Anhang A – Programmcode zum Modell

Mit den verwendeten Werten für den 2-Metall Sensor aus den 4-Leiter Messungen

```
1 - Rau=66.64;
2 - Rpt=387.6;
3 - aaу=3.5279*10^(-3);
4 - apt=3.55005*10^(-3);
5 - kfau=2.0667;
6 - kfpt=2.7882;
7 - To=0;
8
9 - syms R1 a1 T0 k1 R2 a2 k2 eps T
10 - M1=[R1*(1+a1*(T-T0)+k1*eps)
11 -      R2*(1+a2*(T-T0)+k2*eps)];
12
13 - M2=jacobian(M1, [T,eps]);
14 - Vlinv=M2^(-1);
15
16 - for i=1:1:20000
17 -     zwau=au(i);
18 -     zwpt=pt(i);
19 -     V2neu=[zwau+R1*a1*To-R1
20 -            zwpt+R2*a2*To-R2];
21 -     Ergebnis=eval(subs(Vlinv*V2neu, [R1,R2,a1,a2,k1,k2,T0], [Rau,Rpt,aaу,apt,kfau,kfpt,To]));
22 -     деhnung=Ergebnis(2);
23 -     temperatur=Ergebnis(1);
24 -     Ed(i)=деhnung;
25 -     Et(i)=temperatur;
26
27 - end
28 |
```

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schaltbilder der Brückenschaltungen als Übersicht.....	14
Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Gussverfahren zur Einschätzung der Belastung des Sensors	30
Tabelle 3: Funktion der Legierungsbestandteile in Gusslegierungen	31
Tabelle 4: Zusammensetzung der verwendeten Dickschichtpasten aus EDX-Analyse	46
Tabelle 5: Unterschiede Im Herstellungsverfahren auf Ausschuss	55
Tabelle 6: Schritte zur Herstellung des Sensors	62
Tabelle 7: Widerstandsänderung durch Einbettung der Technologiekombination aus Dünn- und Dickschicht	65
Tabelle 8: Daten für die Dehnungsmessstreifen	71
Tabelle 9: Messwerte zur Ermittlung der K-Faktoren bei einer angenommenen Dehnung aus der FE-Simulation von 0,0475 % bei einer Amplitude von 0,3 mm	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Explosionszeichnung der Einbettung einer Glasfaser in Stahl, in Anlehnung an [1]	3
Abbildung 2: Explosionszeichnung des eingebetteten Thermoelements, in Anlehnung an [4] © 2006 IEEE	5
Abbildung 3: Thermogenerator auf einem Substrat aus Borosilikatglas [11] © 2012 IEEE	6
Abbildung 4: Stand der Technik zur Sensorintegration (oben) mit Konzept für zukünftige sensorische Bauteile mit eingebettetem Sensor (unten)	9
Abbildung 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Aluminiumlegierung	10
Abbildung 6: Formänderung durch Zugspannung	11
Abbildung 7: Symmetrische Vollbrücke zur Temperaturkompensation; a) Darstellung der Brückenschaltung, b) Aufbau des Sensors. Die Pfeile deuten auf die Achse der höchsten Sensitivität [27] © 2020 CC BY 4.0	15
Abbildung 8: Schematische Darstellung eines 2-Metall-Sensors	15
Abbildung 9: Aufbau eines DMS, links als Draufsicht, rechts als Querschnitt [32].....	17
Abbildung 10: Aerosoljetdruck Dickschicht DMS auf einem Substrat aus Aluminium mit einer Isolationsschicht aus Polymer [33]	18
Abbildung 11: Dünnschicht-DMS als Druckmesszelle für Hydraulik auf einem Substrat aus Stahl	19
Abbildung 12: Aufbau einer PVD-Sputter Anlage mit Großaufnahme eines Aluminiumoxid-Targets im ein- und ausgebauten Zustand. Das Target ist unterhalb vom Substrat positioniert.	21
Abbildung 13: Schematische Darstellung des PVD-Verfahrens DC-Sputtern	22
Abbildung 14: Thermische Zug- und Druckspannungen durch verschiedene Abscheidetemperaturen.....	24
Abbildung 15: Übersicht verschiedener Verfahren zur Strukturierung von Dünnschichten.....	25
Abbildung 16: Kokille mit Sensoraufnahme; a) Halbschale in Draufsicht, b) Vollständige Kokille, c) Gussobjekt inklusive eingebettetem Sensorelement	27
Abbildung 17: Temperaturverlauf im inneren einer Schwerkraft-Kokille	28
Abbildung 18: Darstellung des Aluminiumdruckgusses in drei Phasen, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [5]}	29
Abbildung 19: Benetzungsverhalten von Aluminium auf Aluminium, links keine Benetzung aufgrund der nativen Aluminiumoxidschicht, rechts ein gutes Benetzungsverhalten durch eine dünne Schicht aus Zink [40].	33
Abbildung 20: Formschlussversuche auf Blech mit abnehmendem Bohrungsdurchmesser auf bis zu 300 µm.....	34
Abbildung 21: Schliffbild eines innerhalb der Arbeit eingebetteten Sensors mit Dickschicht; angedeutet sind druckbare Muster zur Erzeugung einer formschlüssigen Verbindung.....	35

Abbildung 22: Genereller Aufbau der Siebdruckschichten auf dem Substrat, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [5]}.....	37
Abbildung 23: Siebdruckprozess in der Übersicht.....	38
Abbildung 24: Aufbau Siebdruckprozess	39
Abbildung 25: Temperaturprofil der Trocknung.....	40
Abbildung 26: Temperaturprofil des Sinterprozesses	41
Abbildung 27: Schichtaufbau der Dickschichtsensoren im Detail.....	42
Abbildung 28: Effektiver Schichtwiderstand R in Abhängigkeit der Länge vom Widerstand; R ist normalisiert auf den Schichtwiderstand R0 bei 10 mm Länge, in Anlehnung an [48].....	43
Abbildung 29: Schichtaufbau des Dickschichtensors; (a) Gereinigtes Substrat, (b) Substrat mit drei Schichten Grundisolation, (c) Substrat mit Grundisolation und Leiterbahn aus Silber, (c) Substrat mit Grundisolation, Leiterbahn und Widerstandselement ohne Topisolation	44
Abbildung 30: Vom Sensor zum sensorischen Bauteil: für die Einbettung wurde eine „Bühler SC N/66“ Kaltkammer Druckgussmaschine verwendet.....	45
Abbildung 31: Widerstandsänderung durch die Einbettung der Sensoren im Druckguss in der Darstellung als Boxplot; die rote Linie stellt den Median dar, der Kasten begrenzt nach unten das erste und nach oben das dritte Quartil der Messwerte (Sensoren ab einem Widerstand über 3500 Ohm gelten als defekt).....	47
Abbildung 32: Veränderung eines TCR durch die Einbettung	48
Abbildung 33: Verwendete Schaltung für den Versuch, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [5]}.....	48
Abbildung 34: Eingebetteter Sensor auf dem Prüfstand im 3-Punkt-Biegeversuch	49
Abbildung 35: Gesamter Verlauf von über 710.000 Lastwechseln im 3-Punkt-Biegeversuch.....	50
Abbildung 36: Darstellung der letzten 30.000 Lastwechsel vor dem Versagen des Bauteils.....	50
Abbildung 37: Versagen der Gussmatrix am sensorischen Bauteil im 3-Punkt-Biegeversuch.....	51
Abbildung 38: Aufbau Dauerschwingversuch mit Probengeometrie.....	52
Abbildung 39: CAD-Modell mit Nahaufnahme einer vorbereiteten Probe.....	53
Abbildung 40: Dauerschwingversuche von Proben aus Vollmaterial im Vergleich zu Proben mit Sensoreinleger aus Aluminium und Stahl. Die Versuche wurden zusammen mit Martin Fischer von Fraunhofer IFAM durchgeführt	54
Abbildung 41: Übersicht zum Versuchsumfeld im Kokillenguss, Kokille aus geschichteten Halbschalen, der geschlossenen Kokille inklusive eingelegtem Sensor, dem Bauteil mit Anguss einer frühzeitig erstarrten Legierung; sowie einem sensorischen Bauteil.	57
Abbildung 42: Aufbau des Sensors; (a) Schritte im Siebdruck vom Substrat über die Grundisolation bis zur Leiterbahn; (b) Mikroskopische Aufnahme des	

strukturierten DMS als Vollbrücke; (c) Schaltplan der Vollbrücke {Eigene Veröffentlichung [4]}	58
Abbildung 43: Vollständiger Ablauf der Prozessschritte zur Fertigung des Sensors {Eigene Veröffentlichung [4]}	59
Abbildung 44: Belichtung und Entwicklung; (a) Zu geringe Belichtung führt zu verbleibendem Fotolack; (b) Angepasste Belichtungsparameter ohne Lackreste; (c) Hergestellte Metallisierung nach dem Lift-off-Verfahren	60
Abbildung 45: Kontaktierung zwischen Dünn- und Dickschicht in Mikroskopie und schematisch.....	61
Abbildung 46: In situ Messung während der Einbettung	64
Abbildung 47: Abnehmende Isolationsfähigkeit der Dickschichtpaste bei höheren Temperaturen	65
Abbildung 48: Biegebalken Versuchsaufbau vor der Einbettung, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}	66
Abbildung 49: Auswertung von K-Faktor und TCR des Sensors vor der Einbettung, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}	67
Abbildung 50: Brückenspannung und Weg des Stempels im 3-Punkt-Biegeversuch, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}	68
Abbildung 51: Temperaturstabilität des Brückensignals während thermischer Belastung, in Anlehnung an {Eigene Veröffentlichung [4]}	68
Abbildung 52: Design des 2-Metall-Sensors und die Lage der Mäander aus Gold und Platin, Strukturbreite der Leiterbahn 0,6 mm, Strukturbreite der Mäander 50 μm	70
Abbildung 53: Kavität der Druckgussform zur in situ Messung mit Guss und Zuordnung des Sensors in Relation zum Werkstück, sowie zur in situ Messung. Der Werkzeugeinsatz entstand im Rahmen des Projekts SINA in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFAM.....	70
Abbildung 54: Ermittlung der TCR-Werte beider Metallisierungen im Klimakammer- Versuch	71
Abbildung 55: Widerstandsänderung durch Temperatur im Vergleich verschiedener Materialien	72
Abbildung 56: Absolute Widerstandsänderung durch Dehnung (0,1 Hz Druckschwellbelastung).....	72
Abbildung 57: Dehnung aus der Finite-Elemente-Simulation	73
Abbildung 58: Errechnete Temperatur und Dehnung aus dem Modell.....	74
Abbildung 59: Gemessener Weg des Stempels im Vergleich zur errechneten Dehnung; der Weg des Stempels wurde zur besseren Darstellung invertiert. Die Amplitude im Schwingversuch beträgt 0,3 mm, respektive 0,6 mm von Spitze zu Tal	74
Abbildung 60: Vergleich der errechneten Temperatur mit der gemessenen Temperatur in Sensornähe auf dem Biegebalken	75
Abbildung 61: Gesamter Versuchsablauf.....	76
Abbildung 62: Errechnete und gemessene Temperatur für alle Prüfzyklen.....	77

Abbildung 63: Errechnete Dehnung gegen gemessene Temperatur für die gesamten drei Prüfzyklen.....	78
Abbildung 64: Stauchung des DMS durch eine simulierte statische Temperaturdifferenz von 2 °C zwischen der Ober- und Unterseite des Biegebalkens.....	78
Abbildung 65: Stauchung des Biegebalkens durch Temperatur ohne Einwirkung des Stempels	79
Abbildung 66: Schematische Darstellung vom Verfahren des Pulverauftragsschweißens ink. Eingebetteter Sensorik.....	81
Abbildung 67: Explosionszeichnung der bemaßten Zugprobe in mm; inklusive der schematischen Darstellung des Sensors {Eigene Veröffentlichungen [3]}.....	82
Abbildung 68: Darstellung des Schichtaufbau der Dickschichtsensoren auf dem Substrat aus Stahl {Eigene Veröffentlichung [3]}.....	83
Abbildung 69: Sinterprofil der Dickschichtpasten auf Stahl; Stahlsubstrat mit appliziertem Sensor	84
Abbildung 70: Entwicklungsstufen während der Einbettung im Pulverauftragsschweißen {Eigene Veröffentlichungen [3]}.....	84
Abbildung 71: Widerstandsänderung des Sensorelements während der Einbettung als Gesamtübersicht sowie abschnittsweise vergrößert dargestellt. A(Punktschweißen); B(Muldenfüllung); C(Fräsvorgang); D(Pulverauftragsschweißen); Die Skalierung der Y-Achse zeigt eine prozentuale Widerstandsänderung der Sensoren, der Wert zeigt die maximal aufgezeichnete Widerstandsänderung an und keine absoluten Werte. {Eigene Veröffentlichungen [3]}	85
Abbildung 72: Aufgeschmolzenes 0,75 mm dickes Substrat im Vergleich zu einem 2,25 mm starken Substrat, in Anlehnung an Eigene Veröffentlichungen [3]	86
Abbildung 73: Sensorsignal im Zugversuch. Skalierung der Y-Achse zur Darstellung der relativen Widerstandsänderung zur jeweilig maximalen Widerstandsänderung während der Dehnung. {Eigene Veröffentlichung [3]}	87

Eigene Veröffentlichungen

Journalbeiträge

[1] G. Dumstorff, C. Pille, R. Tiedemann, M. Busse, W. Lang, „Smart aluminum components: Printed sensors for integration into aluminum during high-pressure casting,“ *Journal of Manufacturing Processes*, No. 26, pp. 166-172, 2017.

[2] R. Tiedemann, M. Fischer, M. Busse, W. Lang, “Integrating sensors in castings made of aluminum – new approaches for direct sensor integration in gravity die casting,“ *Procedia Manufacturing*, No. 24, pp. 179-184, 2018.

[3] M. Juhasz, R. Tiedemann, G. Dumstorff, J. Walker, A. Du Plessis, B. Conner, W. Lang, E. MacDonald, “Hybrid Directed Energy Deposition for Fabricating Metal Structures with Embedded Sensors,“ *Additive Manufacturing*, No. 35, 2020.

[4] R. Tiedemann, D. Lepke, M. Fischer, C. Pille, M. Busse, W. Lang, “A Combined Thin Film/Thick Film Approach to Realize an Aluminum-Based Strain Gauge Sensor for Integration in Aluminum Castings,“ *Sensors* 20, No.12: 3579, 2020.

Konferenzbeiträge

[5] R. Tiedemann, C. Pille, G. Dumstorff, W. Lang, “Sensor Integration in Castings Made of Aluminum - New Approaches for Direct Sensor Integration in Aluminum High Pressure Die Casting,“ *Key Engineering Materials* No. 742, pp. 786-792, 2017.

[6] R. Tiedemann, D. Lepke, W. Lang, „Combination of thin-film strain gauge and thick-film insulation: A technology approach to fabricate an aluminum-based short term high temperature resistant strain gauge,“ 30th Micromechanics and Microsystems Europe workshop, Oxford, 2019.

[7] M. Juhasz, R. Tiedemann, G. Dumstorff, J. Walker, A. Du Plessis, B. Conner, W. Lang, E. MacDonald, “Hybrid Directed Energy Deposition for Fabricating Metal Structures with Embedded Sensors for the Oil and Gas Industry,“ *Offshore Technology Conference*, 4-7 May, Houston, Texas, 2020.

Studentische Arbeiten im Rahmen der Dissertation

[A1] S. Röper, „Herstellung und Charakterisierung von piezoresistiven Sensoren,“ Bachelorprojekt 2019.

[A2] S. Röper, „Kombination von Dünn- und Dickschichttechnik zur Entwicklung piezoresistiver Sensoren,“ Bachelorarbeit 2019.

[A3] S. H. Chowdhury, “Implementation of thin films on New sputter equipment – comparison with results from previous equipment and use of new technology methods,“ Masterthesis 2019.

Danksagung

„Danke zu sagen ist mehr als Höflichkeit, es ist eine Anerkennung der Güte und Großzügigkeit, die einem entgegengebracht wurde.“

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Walter Lang, bedanken. Dank ihm hatte ich die großartige Möglichkeit, am IMSAS über das spannende Themengebiet der Sensorintegration zu promovieren. Ich bin ihm außerdem für seine Betreuung, zahlreichen Anregungen und Fragestellungen während der vergangenen Jahre sehr dankbar.

Ein herzlicher Dank geht auch an Herrn Prof. Ludger Kempen für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für seine Anmerkungen zur Arbeit. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Steffen Paul und Herrn Prof. Michael J. Vellekoop herzlich dafür danken, dass sie die Prüfertätigkeit während des Kolloquiums übernommen haben.

Ich möchte mich bei allen aktuellen und ehemaligen Kollegen des IMSAS für die großartige Zusammenarbeit und Unterstützung herzlich bedanken. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht erfolgreich gewesen. Insbesondere möchte ich Frank Berkemeyer, Andreas Schander, Daniel Gräbner und Gerrit Dumstorff für ihre Diskussionen und hilfreichen Anmerkungen zu meiner Arbeit danken.

Mein Dank gilt auch Melanie Kirsch, Christian Habben, André Bödecker, Eva-Maria Meyer sowie dem Team der microfab Service GmbH für ihre Unterstützung in Bezug auf Technologie und Chemie. Ebenfalls möchte ich Ibrahim Ersöz und Ingrid Michels für ihre Einführung in die Aufbau- und Verbindungstechnik danken. Ein herzliches Dankeschön geht an Lisa Reichel und Meike Mehrtens für ihre wertvolle Hilfestellung und Organisation.

Ein besonderer Dank geht an alle Studenten, die im Rahmen einer Abschlussarbeit oder als Hilfskraft einen Beitrag zu dieser Dissertation geleistet haben.

Ich möchte mich auch bei meinen Projektpartnern Christoph Pille und Martin Fischer vom IFAM für die konstruktive Zusammenarbeit und die gemeinsamen Bemühungen im Bereich der Gießereitechnik und die Durchführung der Gussversuche bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei Elke Sorgenicht bedanken, die mir bei zahlreichen Fragestellungen zur Metallverarbeitung und zur Konzipierung der Kokille hilfreich zur Seite stand.

Ein Dank geht auch an Prof. Eric MacDonald und Dr. Michael Juhasz von der Youngstown State University für die spannenden Versuche und Diskussionen im Bereich des Pulverauftragsschweißens.

Rebekka Mutschler gebührt mein Dank für das Korrekturlesen in Bezug auf die Rechtschreibung.

Abschließend möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für ihre vielseitige Unterstützung während der Promotion danken.