

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19905N

## Thema

Skalierbarer low-cost Drucksensor mit galvanisch hergestellter Sensormembran und hoch druckfester Füge­technik (SkalaD)

## Berichtszeitraum

01.01.2018 - 31.12.2020

## Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

- Forschungsstelle 1: Hahn-Schickard, Stuttgart (HS-S)  
Allmandring 9 b, 70569 Stuttgart
- Forschungsstelle 2: Hahn-Schickard, Villingen-Schwenningen (HS-VS)  
Wilhelm-Schickard-Str. 10, 78052 Villingen-Schwenningen
- Forschungsstelle 3: Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie (fem)  
Katharinenstraße 17; 73525 Schwäbisch Gmünd

Gefördert durch:

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>2</b>
1.1	Motivation für kapazitive, leiterplattenbasierte Sensoren .....	2
1.2	Sensorkonzept .....	2
<b>2</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse mit Gegenüberstellung der Ziele .....</b>	<b>5</b>
2.1	AP1: Festlegung der Anforderungen .....	5
2.2	AP2: Folienherstellung .....	5
2.3	AP3: Materialkundliche Charakterisierung.....	12
2.4	AP4: Voruntersuchungen zum Fügen der galvanisch hergestellten Folien auf Leiterplatte 33	
2.5	AP5: Simulation.....	37
2.6	AP6: Untersuchungen zur Substratherstellung für die Galvanik und galvanische Abscheidung von Sensormembranen auf den Substraten.....	47
2.7	AP7: Erarbeitung von AVT-Verfahren für das spannungsarme und kriechfeste Fügen von Drucksensormembranen.....	62
2.8	AP8: Aufbau von Drucksensoren mit tiefgezogener Sensormembran .....	68
2.9	AP9: Charakterisierung der Drucksensoren .....	72
2.10	AP10: Auslegungsmodell Drucksensorfamilie .....	82
2.11	AP11: Aufbau + Charakterisierung der optimierten Drucksensoren.....	90
2.12	AP12: Dokumentation und Verbreitung der Ergebnisse.....	100
<b>3</b>	<b>Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben für Personenmonate des wissenschaftlich-technischen Personals, für Geräte und Leistungen Dritter .....</b>	<b>101</b>
<b>4</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....</b>	<b>103</b>
<b>5</b>	<b>Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse .....</b>	<b>104</b>
<b>6</b>	<b>Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft der schon durchgeführten sowie nach Projektende durchzuführenden Transfermaßnahmen.....</b>	<b>106</b>
6.1	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts.....	107
6.2	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen.....	108
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>109</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation für kapazitive, leiterplattenbasierte Sensoren

Anwendungsfelder für die Druckmesstechnik sind allgegenwärtig und durch eine sehr große Bandbreite an Anforderungen gekennzeichnet, sowohl was die zu messenden Drücke und Medien, als auch die Umgebungsbedingungen der Messung betrifft. Von Anwendungen im Bereich der erneuerbaren Energien über Human-Machine-Interfaces (HMI) bis zur Bio- und Lebensmitteltechnologie. Dabei gehören Drucksensoren nach den RF-Anwendungen zu den umsatzstärksten mikrosystemtechnischen Bauelementen und Sensoren und ein jährliches Umsatzwachstum von 7,4% wird erwartet. Die wichtigsten Sensortechnologien sind Metall-Dünnschicht-Technik, Keramik-Dickschicht-Technik sowie Silizium-Bulk- und Oberflächen-Mikromechanik (MEMS). Nachteilig bei all diesen Sensorprinzipien sind die hohen Investitionskosten und die hohen Kosten zur Anpassung der Sensoren an kundenspezifische Anforderungen. Um für KMUs den Einstieg in die Drucksensorfertigung zu ermöglichen, sind andere Sensorprinzipien notwendig.

Im Vorgängerprojekt Medienbeständiger Low-Cost Drucksensor auf gedruckten Leiterplatten (MECOD, IGF 18321 N) konnte das Potential der kapazitiven, leiterplattenbasierten Druckmesstechnik zur Messung von Drücken und Füllständen gezeigt werden. Im Vergleich mit MEMS-Drucksensoren kann die Aufbautechnologie massiv vereinfacht werden, da der Sensor durch das Fügen einer Membran auf eine Leiterplatte im gleichen Prozessablauf wie die übrige Systemelektronik entsteht (Standard SMD-Prozesse). Ein weiterer Vorteil gegenüber MEMS Sensoren ergibt sich beim Einsatz einer medienbeständigen Wandlermembran z.B. aus Edelstahl. So kann der Sensor auch in korrosiven Medien eingesetzt werden, MEMS benötigen dafür aufwändige und somit teure Lösungen im Packaging.

Die kapazitive Messtechnik zeichnet sich aus durch hohe erreichbare Auflösungen und Genauigkeiten und durch eine sehr große Flexibilität in der Gestaltung der Sensorelemente bei gleichzeitiger Verwendbarkeit kostengünstiger standardisierter Auswerteelektroniken. Häufig kann dazu auch ein im Sensorsystem bereits vorhandener Mikrocontroller verwendet werden, wenn dieser eine integrierte Möglichkeit zur Kapazitätsmessung besitzt. Ebenfalls mit extrem geringen Investitionskosten sind Leiterplatten als Massenware problemlos verfügbar. Dies ermöglicht es insbesondere KMUs, die über keine eigene kostspielige MEMS-Fertigung verfügen, einen wichtigen Teil der Wertschöpfung bei der Produktion von Drucksensoren mit vorhandenen Inhouse-Technologien zu erreichen.

## 1.2 Sensorkonzept

Das untersuchte Konzept des kapazitiven Drucksensors ist die fluidseitig druckbelastete Struktur ähnlich zu den bekannten resistiven Sensoren mit Metall-Druckwandler-Membran. Allerdings dient die Wandler-Membran hier direkt als Gegenelektrode einer kapazitiven Abtastvorrichtung, wobei die Membran auf festem Potenzial (z.B. Erdpotential) liegt.

Die kapazitive Abtastvorrichtung besteht im einfachsten Fall aus einer Leiterplatte mit einer Elektrode oder Elektrodenanordnung, wobei Gegenelektrode (Membran) und Elektroden einen variablen, druckabhängigen Abstand aufweisen, wodurch eine druckabhängige Kapazitätsänderung gemessen wird. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 1 gezeigt.

Auf der Leiterplatte befindet sich unterhalb der Drucksensormembran eine erste Elektrode. Die aufgelötete Membran selbst bildet die zweite Elektrode eines druckabhängigen Kondensators. Bei Druckbeaufschlagung wird die Membran parallel zur Leiterplattenoberfläche ausgelenkt und somit der Abstand beider Elektroden zueinander minimiert. Damit steigt die Kapazität des Kondensators, was mittels einer Auswerteelektronik gemessen werden kann. Dies ist im einfachsten Fall ein Capacitance-to-Digital-Converter (CDC), oder ein geeigneter Mikrokontroller

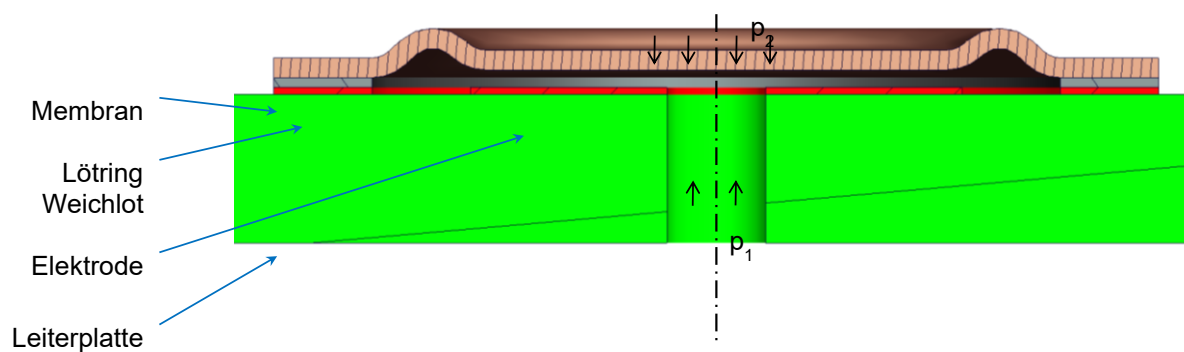


Abbildung 1: Funktionsprinzip Drucksensor

Im ersten Prozessschritt wird auf dem PCB das Lot mittels Dispensen aufgebracht. Danach werden die Membran, die Elektronik sowie alle passiven Komponenten auf der Leiterplatte platziert und das Lot wird durch Reflow-Löten umgeschmolzen. Die Membran kann dabei aus unterschiedlichen Materialien hergestellt und somit auf das jeweilige Medium, mit welchem die Membran in Berührung kommt, abgestimmt werden. Ein fertig prozessierter Sensor ist in Abbildung 2 gezeigt.

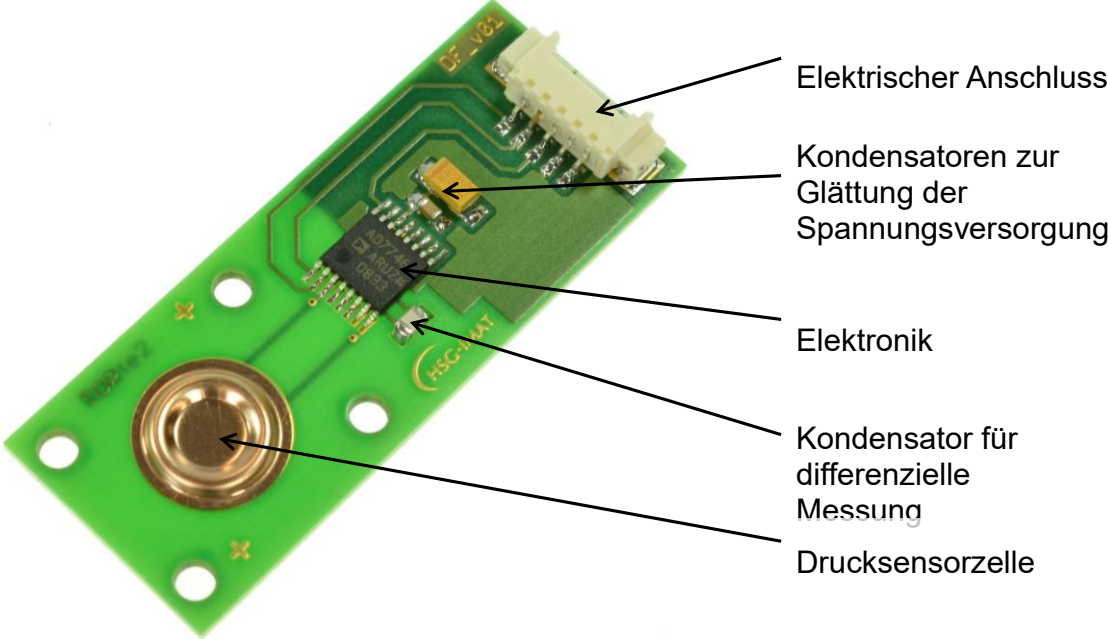


Abbildung 2: Fertig prozessierter Drucksensor

## 2 Darstellung der Ergebnisse mit Gegenüberstellung der Ziele

### 2.1 AP1: Festlegung der Anforderungen

**Einzelergebnis:** Anforderungsliste

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte fem, HS-VS, HS-S in Abstimmung mit dem PA:**

Sensor	Niederdruck	Hochdruck
Druckbereich	1 Bar	10 Bar
Genauigkeit im Temperaturbereich	±2,5% FSO	±2,5% FSO
Genauigkeit bei RT	1,0% FSO	1,0% FSO
Temperaturbereich	-20 .. 85°C	-20 .. 85°C
Gehäuse	Relativdruck	Relativdruck
Membranmaterial	1.4435 (CuBe2)	1.4435 / CuSn8
Anwendungen	Füllstand von Fluiden in Behältern	Pneumatik

**Abbildung 3: Anforderungsliste**

Die Charakterisierung erfolgt angelehnt an DIN EN 61298-2. Die Datenrate der Drucksensoren kann an die jeweilige Anwendung angepasst werden. Im Projekt wurde die Charakterisierungen einheitlich mit 12Hz durchgeführt, anderenfalls ist dies vermerkt.

**Mögliche Umwelttests:**

- Test A: Langzeitstabilität: 100% Druck (FS) für 24 Stunden bei 80°C
- Test B: Temperaturgang: -40°C .. 85°C
- Test C: Lebensdauer: Temperaturschock, -40°C ..85°C, 1000 Zyklen, Haltezeit 10 Min.

### 2.2 AP2: Folienherstellung

**Einzelergebnis:** Prozessdokumentation für untersuchte Abscheideparameter, Bewertungsmatrix

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte fem:**

Die galvanisch abgeschiedenen Bronzelegierungen wurden im Rahmen des Projektes sowohl mechanisch charakterisiert als auch chemisch analysiert (s. AP3). Es wurden freistehende Folien hergestellt, da diese direkt in den Zugversuchen verwendet werden können. Die freistehenden Folien sollten folgende Charakteristika aufweisen:

- Blasenfreiheit, gewährleistet durch ausreichende Haftung zwischen Schicht und Substrat während der Abscheidung
- gute Trennbarkeit vom Substrat nach der Abscheidung
- geeignete Geometrien für die mechanischen Untersuchungen
- gleichmäßige Schichtdickenverteilung über den zu prüfenden Bereich
- keine durchgängigen Poren in der Schicht

Es wurden verschiedene Kombinationen von Substratmaterial und Zwischenschichten getestet. Die Trennbarkeit der Folien vom Substrat sowie der optische Eindruck der Folie wurden anschließend bewertet (s. Tabelle 1). Folien ohne Blasen, Poren oder Oberflächenfehlstellen wurden in der optischen Bewertung mit „gut“ bewertet. Folien, die sich ohne größere mechanische Belastung im intakten Zustand vom Substrat trennen ließen, wurden als „trennbar“ charakterisiert.

Die folgenden Elektrolyte, Trennschichten und Vorbehandlungen wurden für die Versuche verwendet [1]–[4]:

- Miralloy 3849® der Firma Umicore Galvanotechnik GmbH (Miralloy)
- NiMac Clarion II der Firma MacDermid GmbH (Ni-Startschicht)
- NIPHOS® 968 der Firma Umicore Galvanotechnik GmbH (NiPHOS)
- Al Bond III der Firma IPT International Plating Technologies GmbH (Al Bond)
- Kupfer 830® der Firma Umicore Galvanotechnik GmbH (cyanidisch Cu)
- Glanzkupfer TB 10 der Firma Dr.-Ing. Max Schlötter GmbH & Co. KG (sauer Cu)
- Passivierungsmethoden (Heißes Wasser, anodische Entfettung, 1%ige Kaliumdichromat-Lösung)
- Karbonleitlack (Spray)
- Kupferleitlack (Spray)
- Kationisches Polymer: Benzotriazole-5-Carboxylic Acid (CTBA Trennschicht)
- Hühnereiweiß-Lösung

Tabelle 1: Bewertungsmatrix Substrate und Schichtsysteme

Substrat	Schichtsystem	Optisch	Trennbar
<b>Messing</b>	Miralloy	Gut	Nein
	Miralloy sauer Cu	Gut	Nein
	Miralloy cyanidisch Cu	Gut	Nein
	Miralloy Eiweiß-Trennschicht sauer Cu	Gut	Nein
	Miralloy sauer Cu Eiweiß-Trennschicht sauer Cu	Gut	Nein
	Miralloy Eiweiß-Trennschicht Nickel-Startschicht	Gut	Nein
<b>Vernickeltes Messing</b>	Miralloy	Gut	Nein
	Miralloy Trennschichten (Eiweiß / CBTA)	Gut	Nein
<b>Nickel</b>	Miralloy	Gut	Nein
<b>Titan</b>	Miralloy	Viele Blasen	Nein
	Miralloy NiPHOS-Startschicht	Viele Blasen	Ja
<b>Edelstahl</b>	Miralloy	Keine Beschichtung	-
	Miralloy sauer Cu/ cyanidisch Cu	Gut	zwischen Cu und Edelstahl
	Miralloy Tauchaktivierung: HCl + CuCl <sub>2</sub>	Gut	Trennbar
<b>Eisen</b>	Miralloy	Gut	Nein



Substrat	Schichtsystem	Optisch	Trennbar
<b>Magnesium</b>	Miralloy	Viele Blasen	Nein
<b>Glaskohlenstoff</b>	Miralloy	Raue Oberfläche	Ja
<b>Glas mit Carbon-Leitlack</b>	Miralloy	Keine Beschichtung	-
<b>Aluminium</b>	Miralloy cyanidisch Cu Al Bond	Gut	Trennbar durch Auflösen von Al
<b>Nickelfreier Edelstahl</b>	Miralloy	Blasen/ Schleifdefekte	Ja

Abbildung 4 zeigt Beispiele von Substrat-Schichtsystem-Kombinationen mit mangelhaftem optischem Erscheinungsbild oder schlechter Trennbarkeit. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, zeigte sich die Kombination von Aluminium als Substrat und cyanidisch Kupfer + Miralloy als Schichtsystem aufgrund der guten Trennbarkeit und der guten optischen Bewertung am geeignetsten.

Es wurden Aluminiumsubstrate verwendet, bei welchen die Ränder und die Rückseite mit SLOWWAX (Dr.-Ing. Max Schlötter GmbH & Co. KG) abgedeckt wurden. Zur Aktivierung der Aluminiumoberfläche wurden die Substrate zunächst entfettet und danach gebeizt. Anschließend wurde auf die Bleche mit einem cyanidischen Kupfer-Elektrolyten (Kupfer 830®, Firma Umicore [2]) direkt eine 4 µm dicke Kupfer-Startschicht aufgebracht ( $T = 58^{\circ}\text{C}$ ,  $i = 2 \text{ A/dm}^2$ , Abscheidengeschwindigkeit:  $\sim 0,8 \text{ µm/min}$ ). Die mit der Kupfer-Startschicht beschichteten Substrate wurden unter Strom in den Miralloy 3849®-Elektrolyten eingetaucht. Die Abscheidung erfolgte bei  $55^{\circ}\text{C}$  und einer Stromdichte von  $3 \text{ A/dm}^2$  unter Verwendung von unlöslichen Mischmetalloxid-Anoden (MMO). Die Abscheidengeschwindigkeit betrug hierbei  $0,6 \text{ µm/min}$  [1]. Anschließend wurden die beschichteten Aluminiumbleche gespült und zur chemischen Entfernung des Aluminiumsubstrats in Natronlauge (50 g/l) gegeben. Abbildung 5 zeigt Proben, die nach diesem galvanischen Herstellungsprozess gefertigt wurden, vor und nach dem Laserschneiden für die Zugversuche.

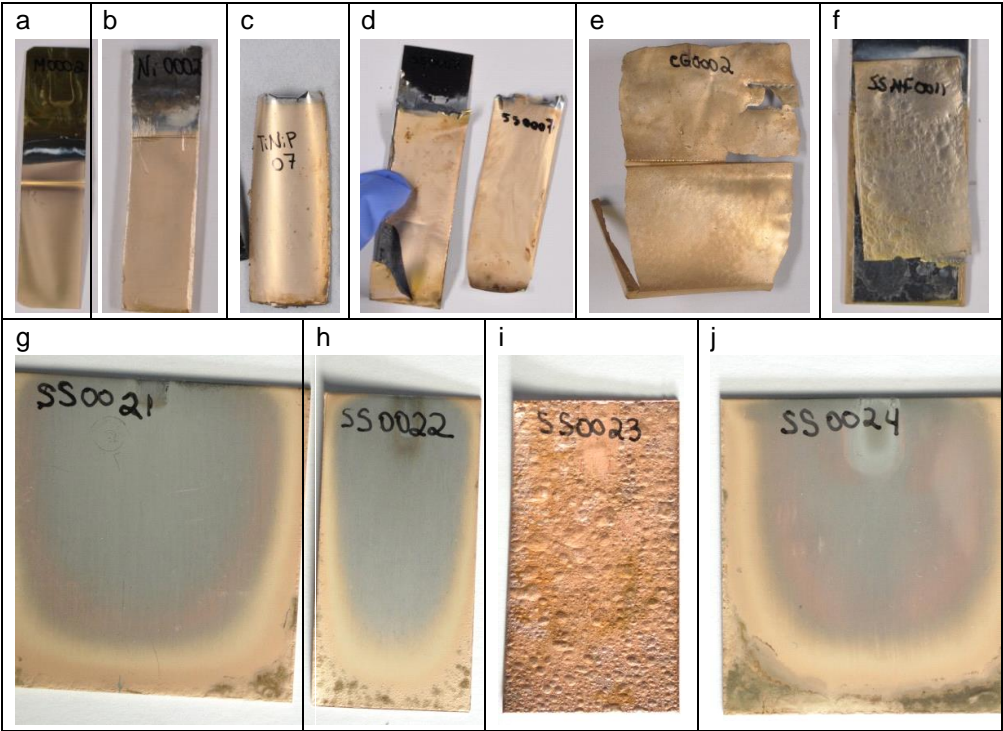


Abbildung 4: Substrate a) Messingblech mit Eiweiß-Trennschicht, b) Nickelblech nach Passivierung, c) Titanblech mit NiPHOS-Trennschicht, d) Edelstahlblech mit sauer Cu Trenn-/Startschicht, e) Miralloy-Folie auf Glaskohlenstoff-Träger, f) Miralloy-Folie auf nickelfreiem Edelstahl, g) V2A-Edelstahlblech mit cyan. Cu-Startschicht, h) V4A-Edelstahlblech mit cyan. Cu-Startschicht, i) V4A-Edelstahlblech mit dicker Cu-Startschicht, j) V2A-Edelstahlblech mit dicker Cu-Startschicht



Abbildung 5: auf Al-Blech galvanisch abgeschiedene Bronzefolien (oben mit Al-Substrat, Mitte: nach Al-Entfernung, unten: nach Laserzuschnitt für Zugversuche)

Durch optimierte Vorbehandlung konnten auch auf Edelstahl-Trägerblechen vom Substrat trennbare Folien abgeschieden werden. Diese Vorbehandlung bestand aus einer zweiminütigen anodischen Entfettung, stromlosem Eintauchen in einer Aktivierungslösung (HCl 1:1 +  $\text{CuCl}_2$  2 g/l) für 15 Sekunden und anschließender galvanischer Kupfer-Abscheidung aus dieser Lösung für 15 Sekunden ( $T = \text{RT}$ ,  $i = 1,25 \text{ A/dm}^2$ ). Die Abscheidung der Kupfer-Zinn-Legierung erfolgte bei gleichen Bedingungen wie auf den Aluminium-Substraten.



Abbildung 6: Auf vorbehandeltem Edelstahl galvanisch hergestellte, trennbare CuSn-Folie

### **Elektrolyt und Abscheidebedingungen**

Zur Untersuchung des Einflusses der Stromdichte auf die Legierungszusammensetzung wurden Abscheidungen in der Hull-Zelle ( $0\text{-}5 \text{ A/dm}^2$ ) durchgeführt. Zusätzlich wurden mit definierten Stromdichten ( $1\text{-}5 \text{ A/dm}^2$ ) einzelne Probestreifen beschichtet und die Legierungszusammensetzung gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Bei Erhöhung der Stromdichte von  $1 \text{ A/dm}^2$  auf  $5 \text{ A/dm}^2$  nahm der Zinn-Gehalt von 11 Gew.-% auf 6 Gew.-% ab. Mit einer Stromdichte von  $3 \text{ A/dm}^2$  (wie in der Arbeitsanweisung des Elektrolytherstellers empfohlen) konnte eine Legierungszusammensetzung von etwa 10 Gew.-% Sn erzielt werden und wurde daher für die weiteren Versuche während des Projektes angewandt. Versuche zur Anwendung von Pulsstrom wurden nicht durchgeführt, da durch die hohe Pulsstromdichte eine Änderung der Legierungszusammensetzung (zu geringer Zinngehalt) zu erwarten war. Als Elektrolyttemperatur wurden die in der Arbeitsanweisung empfohlenen  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  übernommen.

Tabelle 2: Legierungszusammensetzung in Abhängigkeit der Stromdichte

Substrat	Höhere Stromdichte	Niedrigere Stromdichte	Resultat
Titan	Zu wenig Sn	Zu viel Sn	Zu viele Blasen
Eisen	Zu wenig Sn	Zu viel Sn	Nicht trennbar
Aluminium	Zu wenig Sn	Zu viel Sn	Gut bei 3 A/dm <sup>2</sup>

Die inneren Spannungen der abgeschiedene Bronze-Legierungsschichten wurden mit dem am fem entwickelten in-situ-Messsystem für Makrospannungen MSM200 bestimmt. Innere Spannungen in einer abgeschiedenen Schicht können dazu führen, dass die Haftung zwischen Substrat und Schicht nicht ausreicht, um Blasenbildung, Defekte und Risse zu verhindern [5], [6]. Bei der Abscheidung von Schichten aus dem Miralloy-Elektrolyten konnten geringe innere Druckspannungen aufgezeichnet werden (s. Abbildung 7).

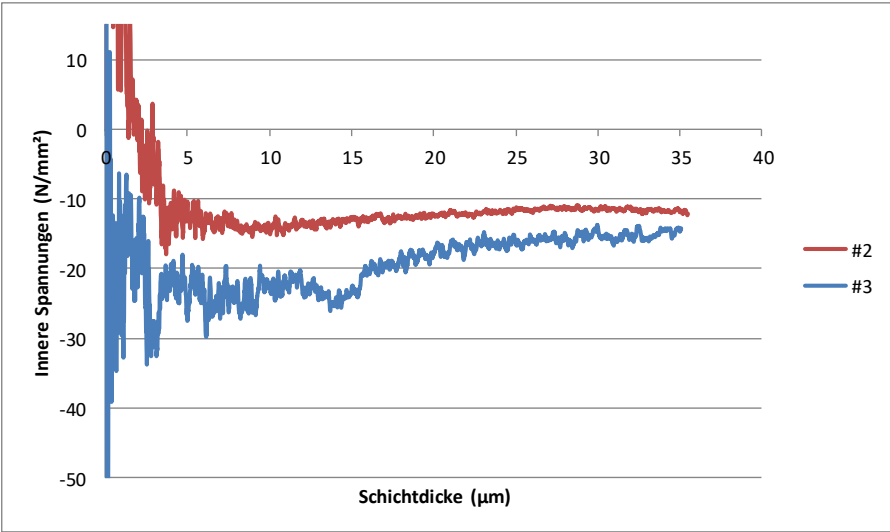


Abbildung 7: Innere Spannungen (N/mm²) der Bronzeschicht, Versuche 2 und 3

## 2.3 AP3: Materialkundliche Charakterisierung

**Einzelergebnis:** Materialdaten galvanisch abgeschiedener Folien für die Simulation, Prozessdokumentation für untersuchte Charakterisierungsmethoden

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte fem:**

Die Legierungszusammensetzung der galvanisch hergestellten Bronze wurde im Zuge des Projektes untersucht. Es wurden materialkundliche Untersuchungen, wie Härtemessungen, Zugversuche und Relaxationsversuche sowie Röntgenfeinstrukturuntersuchungen durchgeführt sowie die Korrosionsbeständigkeit bestimmt und mit den Ergebnissen von gewalzter Bronze und Edelstahl verglichen.

Tabelle 3: Prozessdokumentation für die untersuchten Charakterisierungsmethoden

Untersuchungsmethode	Parameter	Ergebnis Miralloy
<b>RFA</b> <i>(Röntgenfluoreszenzanalyse)</i>	Legierungs-Zusammensetzung (schnell und Zerstörungsfrei)	Kontrolle der mittleren Zusammensetzung der Folien
<b>ICP-OES</b> <i>(optische Emissions-spektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma)</i>	Zusammensetzung	Zusammensetzung der abgeschiedenen Folien im Zielbereich
<b>GDOES</b> <i>(Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy)</i>	Zusammensetzung vs. Schichtdicke	minimale Schwankungen in der Zusammensetzung der Folien entlang des Tiefenprofils
<b>EDX linescan</b> <i>(energiedispersive Röntgenmikroanalyse)</i>	Zusammensetzung vs. Schichtdicke	Zusammensetzung der abgeschiedenen Folien im Zielbereich
<b>Zugversuche</b>	E-Modul, Zugfestigkeit...	Miralloy zeigt erwartete mechanische Eigenschaften, vergleichbar mit CuSn10 Blechproben
<b>Härtemessungen</b>	Härte, Elastischer Eindringmodul	Hohe Härte
<b>Relaxationsversuche</b>	Niedertemperatur-Kriechen	Einsatzgrenze bestimmt, Versuche bei HS-S
<b>XRD</b> <i>(Röntgendiffraktometrie)</i>	Phasenbestand (vor und nach in-situ- und Langzeit-Wärmebehandlung im Vakuumofen)	Kupfer-Mischkristall mit vergrößerten Gitterparametern, keine intermetallische Phasenbildung bei 320°C nach 9 Tagen
<b>Korrosionstests</b>	Beständigkeit gegen anwendungsrelevante Flüssigkeiten	in SBF: deutlicher Korrosionsangriff
		in Waschlauge: geringerer Korrosionsangriff
		in Getriebeöl: beständig

**Legierungszusammensetzung**

Die Bestimmung der Legierungszusammensetzung erfolgte im Rahmen des Projektes durch vier verschiedene Methoden: Röntgenfluoreszenzanalyse RFA, nasschemische Analyse mittels ICP-

OES, optische Glimmentladungsspektroskopie GDOES und de energiedispersiver Röntgenmikroanalyse EDX im Rasterelektronenmikroskop. Mit Hilfe der RFA-Analyse lassen sich Schichtdicken und Legierungszusammensetzungen zerstörungsfrei bestimmen. Jedoch müssen als Referenz Kalibrierproben bekannter Zusammensetzung vermessen werden. Diese Kalibrierstandards wurden im Rahmen des Projektes hergestellt und deren Zusammensetzung mittels ICP-OES bestimmt [7]. In Tabelle 4 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Ergebnisse von Vergleichsmessungen anhand einer Folie mit der geforderten Legierungszusammensetzung von 9-11 Gew.-% Sn aufgeführt.

Tabelle 4: Bestimmung des Metallgehalts mit ICP-OES und RFA

Metallgehalt ICP		Metallgehalt RFA	
Element	Gew.-%	Element	Gew.-%
Cu	90,6	Cu	89,8
Sn	9,4	Sn	10,2
Al	0,004	-	-

Die Spuren an Aluminium bei der ICP-Messung sind hierbei auf Reste des verwendeten Aluminiumsubstrats zurückzuführen. Es erfolgte kein Aluminiumeinbau in die Schicht. Mittels ICP-OES oder RFA können jedoch nur integrale Informationen über die Legierungszusammensetzung erhalten werden, Elementverläufe innerhalb der Schichten (Tiefenprofil) können nicht dargestellt werden. Für eine umfangreichere Materialcharakterisierung mussten weitere Analyseverfahren angewandt werden. Um Aussagen über die Gleichmäßigkeit der Legierungszusammensetzung entlang des Schichtverlaufs treffen zu können, wurden Tiefenprofile mittels EDX und GDOES erstellt [8], [9]. Das GDOES-Tiefenprofil auf Abbildung 8 zeigt eine nur minimale Schwankung in der Zusammensetzung der Bronzeschicht.

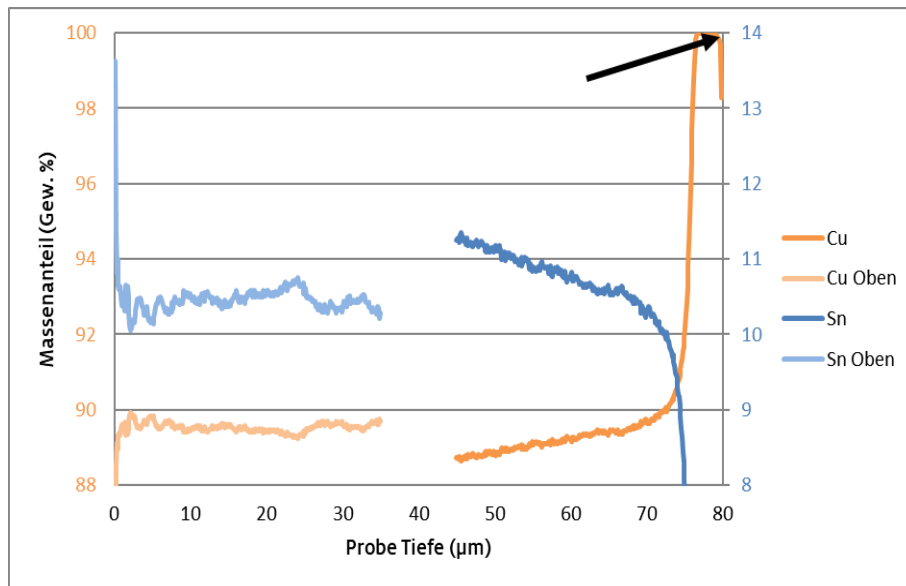


Abbildung 8: GDOES-Tiefenprofil einer Bronzefolie, gemessen von der Oberfläche (linke Seite) bzw. von der Substratseite (rechte Seite) Pfeil: Cu-Startschicht

Diese geringen Schwankungen lassen sich durch Elektrolytverarmung während der Abscheidung erklären. Aus diesem Grund erfolgte während längerer Abscheidezeiten eine Zugabe von Metallionen und Zusätzen, was in einer Änderung der Legierungszusammensetzung ab dem Zeitpunkt der Zugabe resultiert. Zu sehen ist dieser Unterschied auch im Materialkontrast des REM-Bildes auf Abbildung 9 bzw. im Line-Scan-Verlauf (Abbildung 10). Die Unterschiede in der Legierungszusammensetzung während einer Miralloy-Abscheidung bewegen sich im Bereich von 1 Gew.-%, was insgesamt für einen stabilen Prozess spricht.

Bei Verwendung dieses Elektrolyten im industriellen Maßstab können diese Schwankungen durch die Anlagentechnik besser kontrolliert und ausgeglichen werden, womit ein konstanterer Verlauf der Legierungszusammensetzung innerhalb eines Bauteils zu erwarten ist.

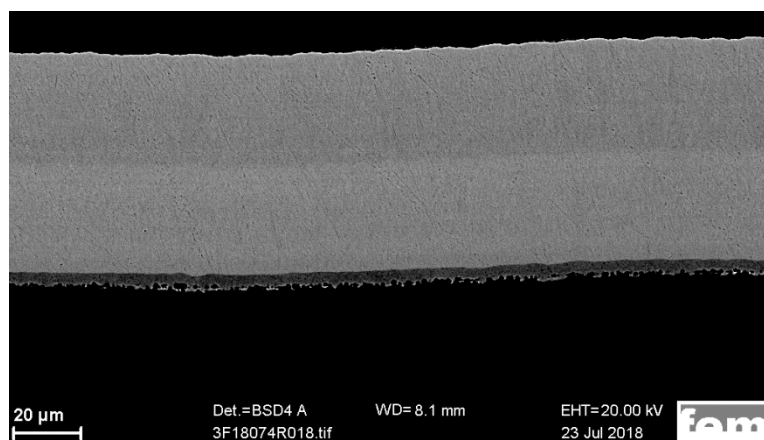


Abbildung 9: REM-Aufnahme während einer EDX Line-Scan Messung



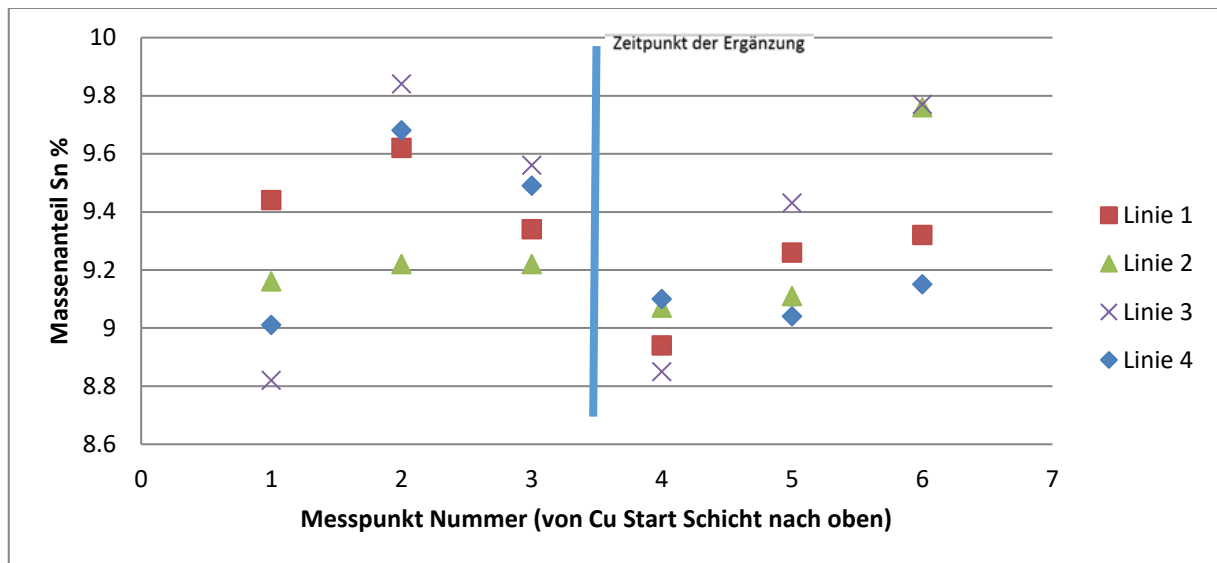


Abbildung 10: REM/EDX Line-Scan, Verlauf der Legierungszusammensetzung von 4 Messungen

### Materialkundliche Charakterisierungen

Neben der Legierungszusammensetzung sind die mechanischen Eigenschaften der galvanisch hergestellten Bronzelegierungen wichtige Parameter. Sie geben die Grenzen für die zukünftige Anwendung als Drucksensoren oder in anderen Einsatzgebieten vor. Für die Zug- und Relaxationsversuche wurden galvanisch abgeschiedene CuSn-Folien mittels Laser zugeschnitten (s. Abbildung 5).

Folien mit Legierungszusammensetzungen von 9,2 bis 14,9 Gew.-% Sn wurden in Zugversuchen (Prüfgerät Z100, Firma Zwick/Roell) dehnungsgeregelt bei 0,1 %Lo/s untersucht. Aus der graphischen Auftragung der Standardkraft (MPa) über der Dehnung (%Lo) wurden das E-Modul (mE) [GPa], die Dehngrenzen (Rp 0.2) [MPa], die Zugfestigkeit (Rm) [MPa], die Gleichmaßdehnung (Ag) [%], die Bruchfestigkeit (RB) [MPa] und die Bruchdehnung (A) [%] bestimmt. Im Anschluss an die Zugversuche wurden die Proben unter dem Lichtmikroskop und teilweise auch im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Damit konnte die Bruchcharakteristik genauer beurteilt werden. Sowohl die Aufnahmen am REM als auch der Verlauf der Kurven der Zugversuche lassen eine duktile Bruchcharakteristik erkennen (s. Abbildung 11 und Abbildung 12).

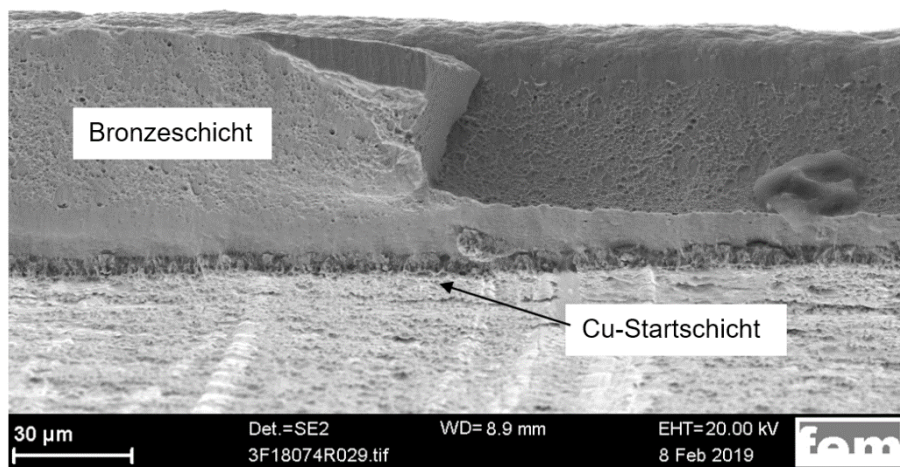


Abbildung 11: REM-Aufnahme einer Zugversuchsprobe; die Bruchstelle zeigt eine duktile Bruchcharakteristik mit Waben

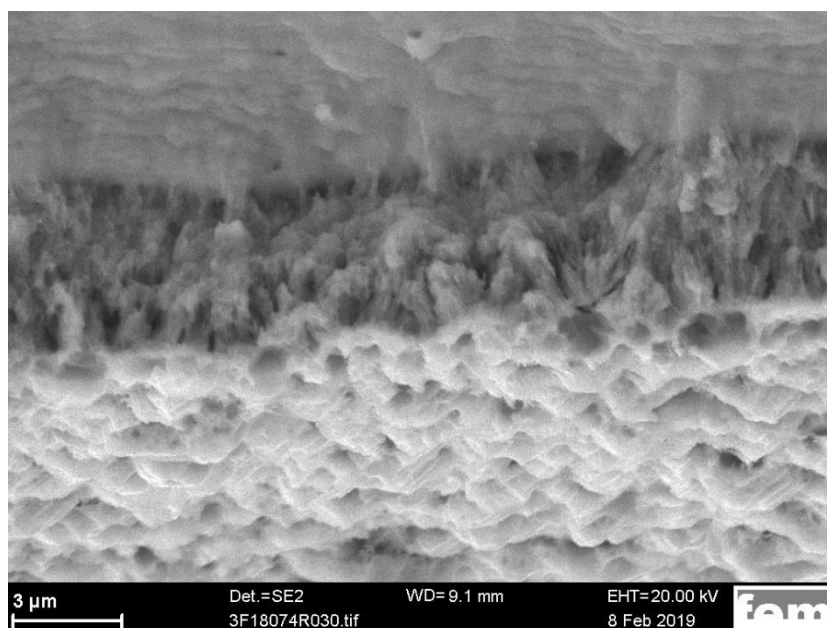


Abbildung 12: REM-Aufnahme des Übergangsbereichs Cu-Startschicht/ Bronzeschicht einer Zugversuchsprobe; die Bruchstelle zeigt auch hier duktile Bruchcharakteristik mit Waben

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Härtemessungen und Zugversuche an den galvanisch hergestellten CuSn-Folien zusammengefasst. Zum Vergleich wurden Werte aus einer Materialdatenbank (für Guss- und Knetlegierungen) mit aufgeführt. Besonders interessant ist hierbei der Vergleich der galvanisch abgeschiedenen Probe mit der Zielzusammensetzung von 10 Gew.-% Sn im Vergleich zur Gussprobe mit dem gleichen Zinnanteil (grüne und blaue Zeilen). Die galvanisch hergestellte Legierung besitzt hierbei das niedrigere E-Modul. Die Dehngrenzen

und Zugfestigkeitswerte liegen im Bereich des Mittelwerts des gewalzten Knetlegierungsmaterials. Bei der Bruchdehnung liegt die galvanisch hergestellte Folie am unteren Wert des Bruchdehnungsbereichs der wärmebehandelten gewalzten Folien. Die Härte der Miralloy-Folie liegt hingegen über der der CuSn-Gussproben.

**Tabelle 5: Ergebnisse der Zugversuche und Härtemessungen an galvanisch abgeschiedenen Bronzeschichten im Vergleich zu Proben aus Guss- und Knetlegierungen [10]–[13].**

	Sn-	E-	Dehn-	Zugfestigkeit	Gleichmaß-	Bruch-	Bruch-	Härte
	Gehalt	Modul	grenze		dehnung	festigkeit	dehnung	
	wt %	mE GPa	R <sub>p0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>g</sub> %	RB MPa	A %	HV
Mittelwerte der Zugversuche und Härtemessungen	9,2	93	590	749	3	718	4,7	240
	10,0	89	574	731	3,2	688	5,8	254
	11,6	85	576	741	3,7	735	5,3	
	12,2	86	595	768	3,2	757	5,1	
	13,3	84	619	797	1,5	791	1,5	
	14,9	84	686	842	1,3	841	1,3	
Instrumentierte Eindringprüfung	9,1	90.4	-	-	-	-	-	235
	9,6	82.3	-	-	-	-	-	245
	10,0	79	-	-	-	-	-	231
CuSn8 (Knetlegierung gewalzt) [10]	8	109	360-710	370-750	-	-	3-20	90-240
CuSn10 (Guss) [13]	10	110	200-780	400-830	-	-	2-55	70-85 (70-80 Brinell)
CuBe2 [14]	2% Be	125	510-1400	410-1500	-	-	2-35	210-450

Die Härte der Miralloy-Bronzeschichten wurde mit zwei verschiedenen Verfahren bestimmt: zum einen durch Härtemessungen im metallografischen Querschliff sowie mittels instrumentierter Eindringprüfung (DIN EN ISO 14577). Der Messaufbau für die instrumentierte Eindringprüfung

wurde mit einem neuen Messadapter für Folien (s. Abbildung 13) ausgestattet. Damit können Messungen direkt an der Probenoberfläche durchgeführt werden. Die Härte wird bei diesem Verfahren nicht durch Ausmessen der Härteeindrücke bestimmt, sondern durch kontinuierliche Aufzeichnung von Kraft und Eindringtiefe während der Messung. Aus diesen Daten kann zusätzlich der elastische Eindringmodul der Folien ermittelt werden [15]. Die Härtewerte der Messungen im Querschliff und der instrumentierten Eindringprüfung zeigen gute Übereinstimmungen, ebenso die Werte für den E-Modul aus den Zugversuchen und der instrumentierten Eindringprüfung. Die Härtewerte der galvanisch abgeschiedenen Bronzeschichten mit ca. 10 Gew.-% Sn liegen im Mittel bei etwa 245 HV und sind somit höher als die Werte der Guss- oder Knetlegierungen. Die Ursache liegt in der häufig durchgeführten Wärmebehandlung der entsprechenden Guss- sowie Knetlegierungen. Dieser Nachbearbeitungsschritt hat sowohl Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Probe als auch auf die Härtewerte.

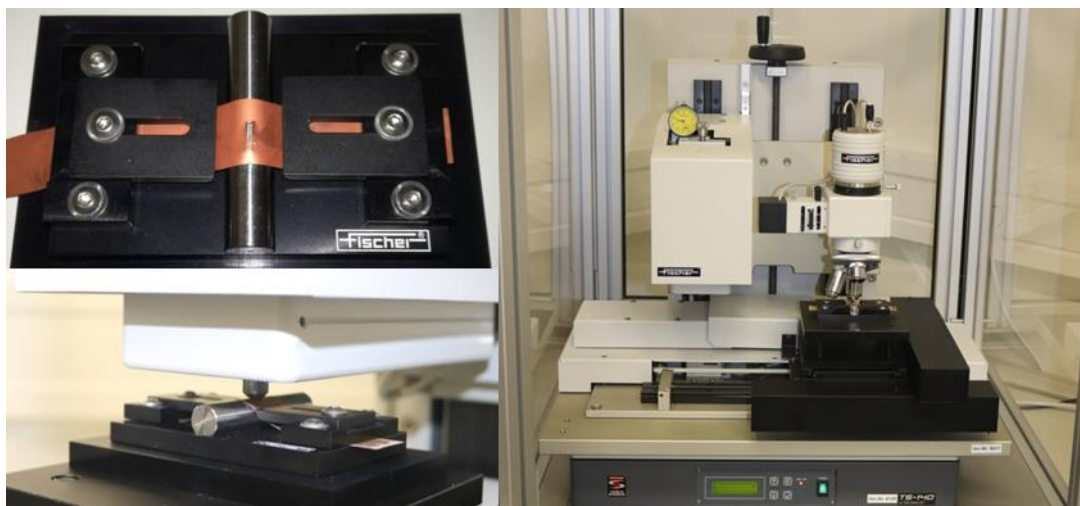


Abbildung 13: Messaufbau der instrumentierten Eindringprüfung mit dem Messadapter für Folien

### **Strukturelle Analyse**

Mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) lassen sich metallische Phasen mit kristallinen oder geordneten Strukturen bestimmen. Die Phasendiagramme auf Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen bei verschiedenen Temperaturen / Legierungszusammensetzungen, wo Phasenänderungen / Phasenanteiländerungen in CuSn-Legierungen mit einem Gewichtsanteil von 10 Gew.-% Sn möglich sind. Das Gleichgewichtsphasendiagramm in Abbildung 14 des CuSn-Systems zeigt im Bereich von Legierungen mit einem Sn-Gehalt von 10 Gew.-% die möglichen Phasen Cu(Sn), Cu(Sn) +  $\epsilon$  und Cu(Sn) +  $\delta$ . Abbildung 15 zeigt die möglichen Phasen elektrochemisch hergestellter CuSn-Legierungsfilme. Hier ist bei einem Sn-Gehalt von 10 Gew.-% in der Legierung die Bildung folgender Phasen möglich: Cu(Sn), Cu(Sn) + T(I), Cu(Sn) +  $\beta'$  und Cu(Sn) + Or. Drucksensoren werden oft in Bereichen mit leicht erhöhter Temperatur

eingesetzt. Hierdurch wäre es möglich, dass auch im normalen Anwendungsbetrieb Phasenänderungen auftreten, was zu einer Änderung der mechanischen Eigenschaften und somit des Druckmesssignals führen kann.

Nicht wärmebehandelte elektrochemisch hergestellte CuSn-10 Legierungen bilden eine Kupfer(Zinn)-Mischkristallphase. Zur Beurteilung möglicher Phasenübergänge wurden die Diffraktogramme galvanisch hergestellter CuSn-Folien vor und nach einer Wärmebehandlung untersucht.

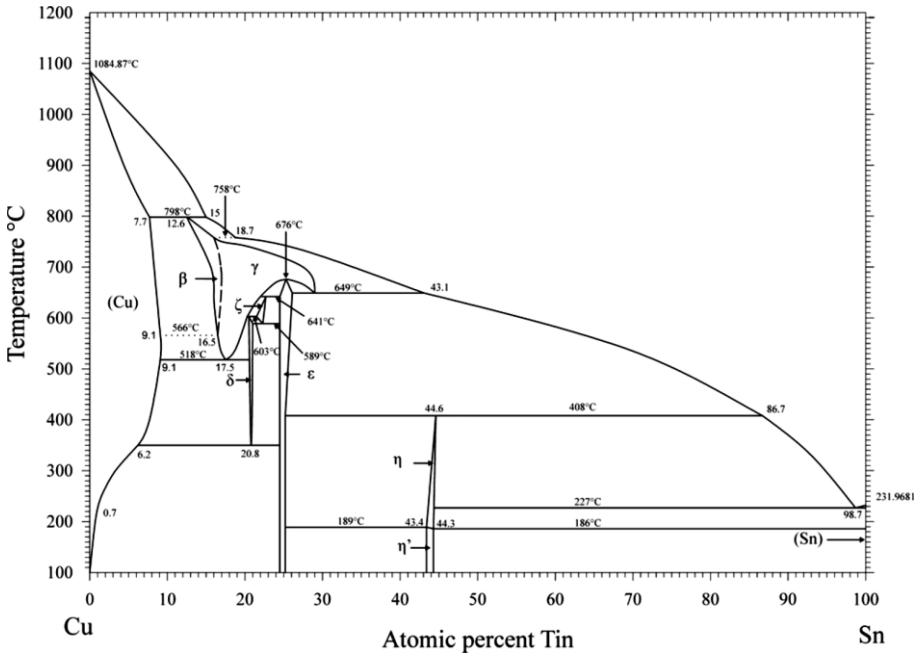


Abbildung 14: Gleichgewichtsphasendiagramm des CuSn-Systems [17]

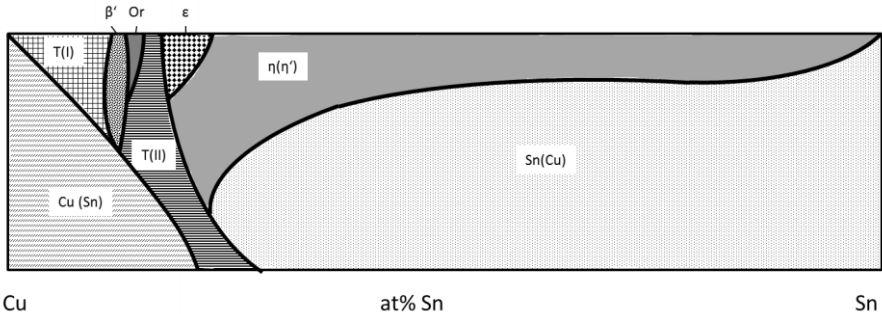


Abbildung 15: Phasendiagramm elektrochemisch hergestellter CuSn-Legierungen [18]

Zur Beurteilung möglicher Phasenumwandlungen wurden an galvanisch hergestellten CuSn-Legierungsfolien mit ca. 10 Gew.-% Sn Temperversuche durchgeführt. Untersucht wurde hierbei, ob und wann sich die intermetallischen Phasen (IMP) ε, δ oder die laut [18] bei galvanisch

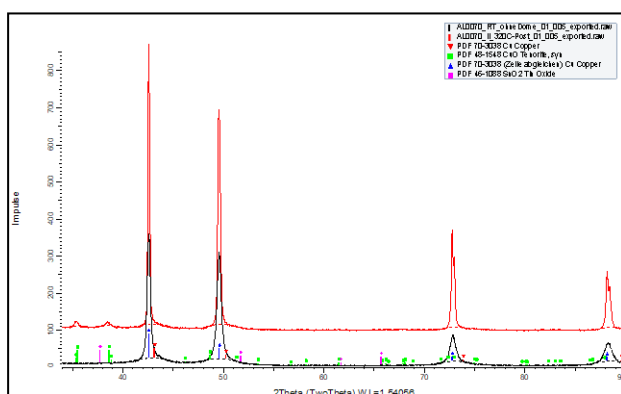
hergestellten Proben auftretenden IMP T(I),  $\beta'$  oder Or (für Ordnungsphase) bilden. Für den Temperprozess wurde die Temperatur während der Messung mit einer in-situ-Zelle schrittweise bis auf 320 °C erhöht. Das Temperaturprofil ist in Tabelle 6 dargestellt. Nach jedem Tempersschritt erfolgte die Bestimmung des Phasenbestands. Während des Temperprozesses unter Luftatmosphäre kam es zur Bildung von Kupfer- und Zinnoxidschichten. Aus diesem Grund wurden längere Temperversuche mit einer Dauer von 9 Tagen unter Vakuum durchgeführt.

**Tabelle 6: Temperaturprofil der in-situ Temperversuche unter Luftatmosphäre**

T, °C	t, h
25	0 (Messung mit und ohne Dome*)
200	1
320	1,5
320	2
320	2,5

(\*) bei den in situ-Messungen kann auf die Proben ein Aufsatz (Dome) appliziert werden, so dass die Temperung unter Sauerstoffausschluss stattfindet

Sowohl an Luft als auch im Vakuum zeigen die Diffraktogramme durch den Temperprozess (Abbildung 16 und Abbildung 17) eine Verringerung der Halbwertsbreite der Reflexe der Kupfer/Zinn-Mischkristallphase. Dies lässt sich als Ausheilen von Defekten oder als Kornwachstum deuten. Nach dem Temperprozess an Luft liegen Kupferoxid und eine geringe Menge an nanokristallinem Zinnoxid als weitere Phasen vor. Kupferoxid ist durch die Reflexe bei ca. 35,5° und 38,5° 2 $\theta$  erkennbar. Zinnoxid ist am breiten Reflex bei ca. 37,5° und 52° 2 $\theta$  erkennbar. Die Bildung einer intermetallischen Phase konnte bei diesen Versuchsbedingungen nicht nachgewiesen werden.





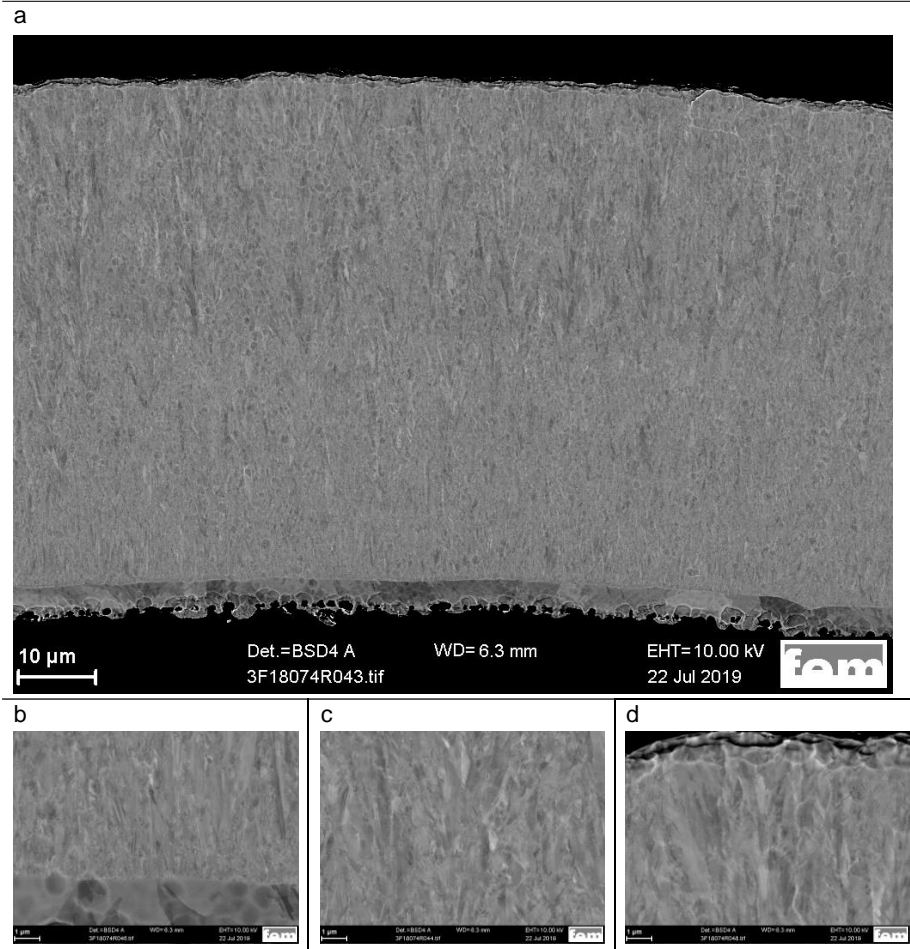


Abbildung 18: Querschliff durch eine freistehende Folie (Al055) a) gesamter Verlauf der CuSn-Schicht b) Beginn der CuSn-Schicht auf der Cu-Startschicht c) Mitte der CuSn-Schicht d) Ende der CuSn-Schicht

**Korrosionsbeständigkeit**

Im Rahmen des 2. PA-Treffens wurden gemeinsam mit dem PA drei Medien für die Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit ausgewählt. Diese drei Flüssigkeiten sind ein Simulated Body Fluid (SBF), Waschlauge und Getriebeöl. Die Korrosionsversuche wurden mit galvanisch hergestellten Miralloy-Folien, gewalzter CuSn6-Bronze und V4A-Edelstahl (Legierungszusammensetzung s. Tabelle 7) durchgeführt.

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung von V4A-Edelstahl (Massen-%) [19].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
---	----	----	---	---	----	----	----	---



≤ 0,07	≤ 1,0	≤ 2,0	≤0,045	≤0,03	16,50-18,50	2,00-2,50	10,0-13,0	≤0,1
--------	-------	-------	--------	-------	-------------	-----------	-----------	------

SBF ist eine Flüssigkeit, die als Hauptsalz NaCl enthält und durch TRIS-Puffer auf einen pH-Wert von 7,4 eingestellt wurde. Die Proben und die gesamte Prüfkammer (Nebelsprühkorrosionskammer) wurden mit SBF befeuchtet und 1,5 Liter Reservevolumen in die Kammer hinzugefügt. Die Flüssigkeit und die Prüfkammer wurden während der Prüfzeit auf 40 °C gehalten.

Bereits nach drei Stunden waren Korrosionsprodukte auf den Miralloy- und CuSn6-Bronze-Proben zu sehen, weshalb die Prüfkammer bereits zu diesem Zeitpunkt zum ersten Mal geöffnet wurde. Die Bilder zur Dokumentation wurden erst nach 24 Stunden aufgenommen (s. Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21).

Gewalzte Bronze-Proben zeigten nach 24 Stunden Exposition in SBF deutliche Korrosionserscheinungen. Auf den CuSn6-Proben sowie auf Miralloy konnten nicht alle Korrosionsprodukte durch Ultraschallreinigung entfernt werden. Im Vergleich zur gewalzten Bronze und Miralloy zeigte Edelstahl keinen visuell erkennbaren korrosiven Angriff. Flecken und Salzkristalle auf der Oberfläche konnten durch Ultraschallreinigung entfernt werden (s.



Abbildung 21).

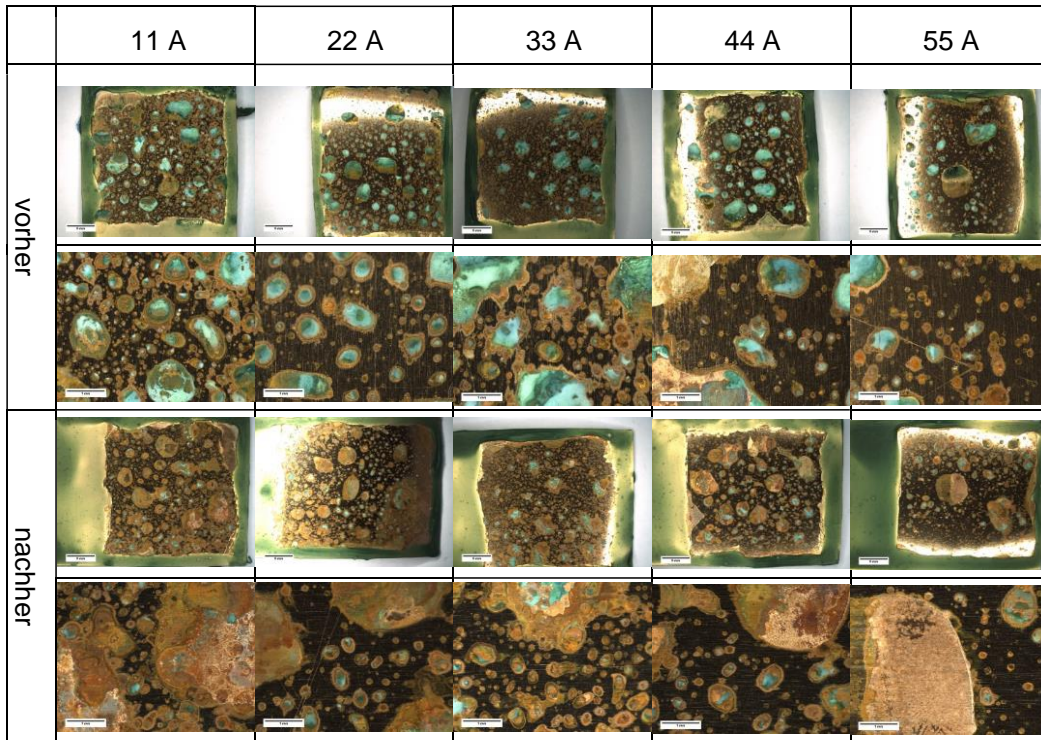


Abbildung 19: CuSn6 (gewalzt) nach 24 Stunden Korrosionstest in SBF; vor und nach Ultraschall-Reinigung

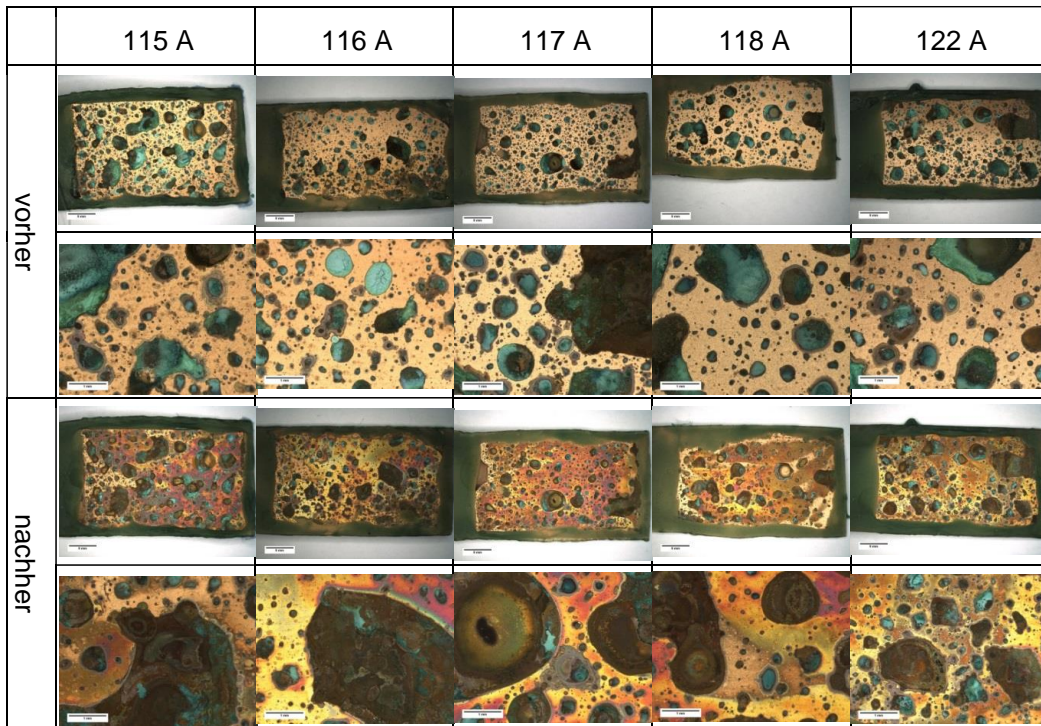


Abbildung 20: Miralloy-Folien nach 24 Stunden Korrosionstest in SBF; vor und nach Ultraschall-Reinigung

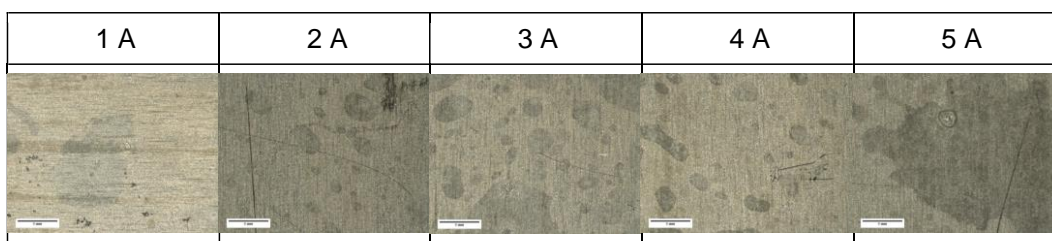
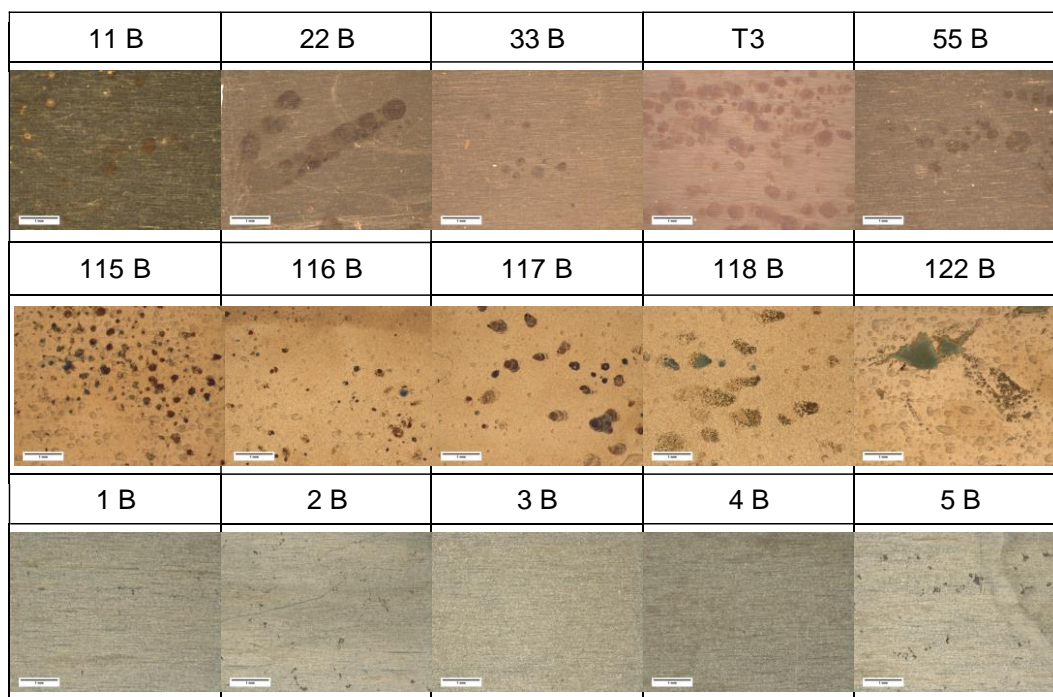


Abbildung 21: Edelstahl (V4A) nach 24 Stunden Korrosionstest in SBF; nach Ultraschall-Reinigung

Als zweites Korrosionsmedium wurde eine Waschlauge aus einem Vollwaschmittel verwendet (Bravil Activpulver, 1,33 g/l). Der pH-Wert dieser Lösung lag bei 10,6. Die Proben wurden für zwei Stunden bei 90°C in die Waschlauge eingetaucht und danach ohne Spülen für eine Stunde getrocknet. Dieser 3-Stunden-Zyklus wurde 12 Mal wiederholt, um eine gesamte Prüfdauer von 24 Stunden zu erreichen (s. Abbildung 22).

Die Auswertung der Korrosionsprüfung in der Waschlauge nach 24 Stunden Prüfdauer ist in Abbildung 22 dargestellt. Gewalzte CuSn6-Bronze zeigte bräunliche Verfärbungen auf der Oberfläche nach zwei Stunden, die im weiteren Verlauf der Prüfung nicht nennenswert zunahm. Die Miralloy-Folien zeigten nach 24 Prüfstunden in Waschlauge mehr bräunliche Verfärbungen als gewalzte Bronzeproben. Diese entstanden wie bei der gewalzten Bronze bereits in der Anfangsphase der Prüfung. Waschlauge hinterließ bei Edelstahl (V4A) keine visuell veränderte Oberfläche.



**Abbildung 22: CuSn6 (gewalzt) (11B - 55B), Miralloy-Folien (115B - 122B) und Edelstahl (V4A) (1B - 5B) nach 24 Stunden Korrosionstest in Waschlauge**

Bei der Korrosionsprüfung in schwefelhaltigem Getriebeöl wurden die Proben für insgesamt 96 Stunden in 90°C warmes Getriebeöl getaucht. Nach 24, 72 und 96 Stunden wurden die Proben optisch beurteilt. Abbildung 23 zeigt den Endzustand aller Proben nach 96 Stunden bei 90°C in Getriebeöl. Bei der gewalzten Bronze wurde die Oberfläche deutlich bräunlicher verfärbt. Der sehr dunkle Bereich am Rand stammt von der Abdeckung der Kanten mit SLOTOWAX. Die Miralloy-Oberfläche wurde nur geringfügig dunkler. Keine visuellen Änderungen der Oberfläche nach 96 Stunden wurden dagegen auf Edelstahl festgestellt. Bei allen Tests in Getriebeöl wurde die Abdeckung mit SLOTOWAX während der Prüfung sehr weich und instabil, so dass sie direkt nach der Prüfung noch vor der Dokumentation entfernt wurde.

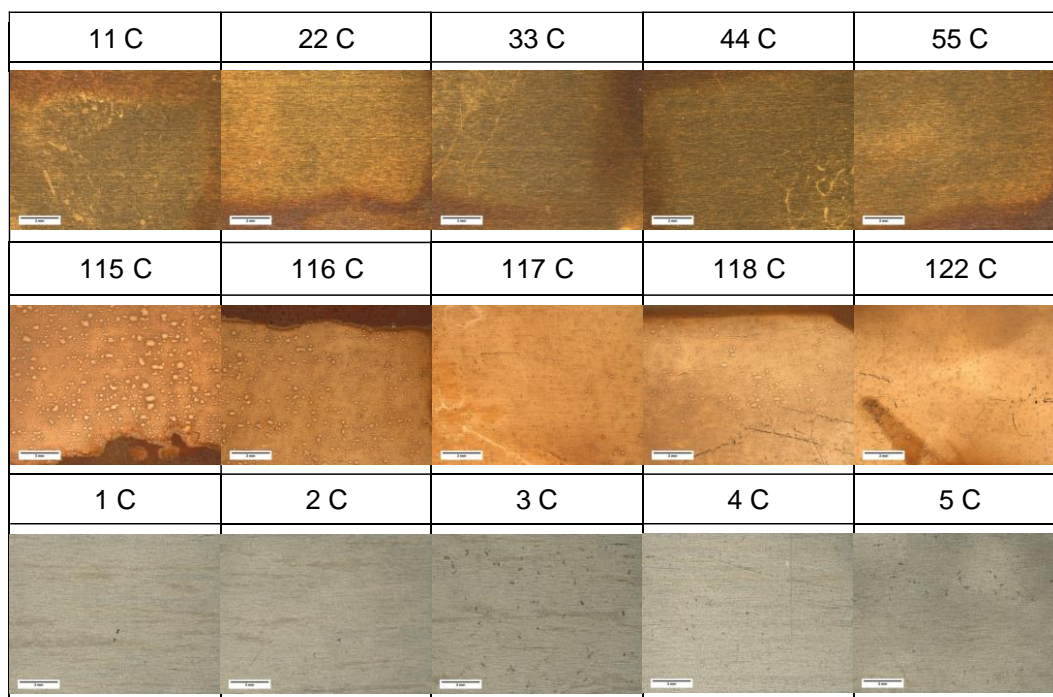


Abbildung 23: CuSn6 gewalzt (11C – 55C), Miralloy-Folien (115C – 122C) und Edelstahl (V4A) (1C – 5C) nach 96 Stunden Korrosionstest in Getriebeöl

Als potentielle Schutzschichten für Miralloy-Folien wurden Hochglanz-Nickel und Nickel-Phosphor auf freistehende Bronze-Folien abgeschieden. Die Miralloy-Folien konnten vollflächig beschichtet werden und zeigten lediglich kleinere Poren und Defekte in der Nickelschicht (Abbildung 24). Es handelte sich hierbei um Testversuche zur prinzipiellen Machbarkeit. Für zukünftige Anwendungen, bei denen eine Schutzbeschichtung benötigt wird, kann durch Optimierung der Parameter eine bessere Schichtqualität erwartet werden.

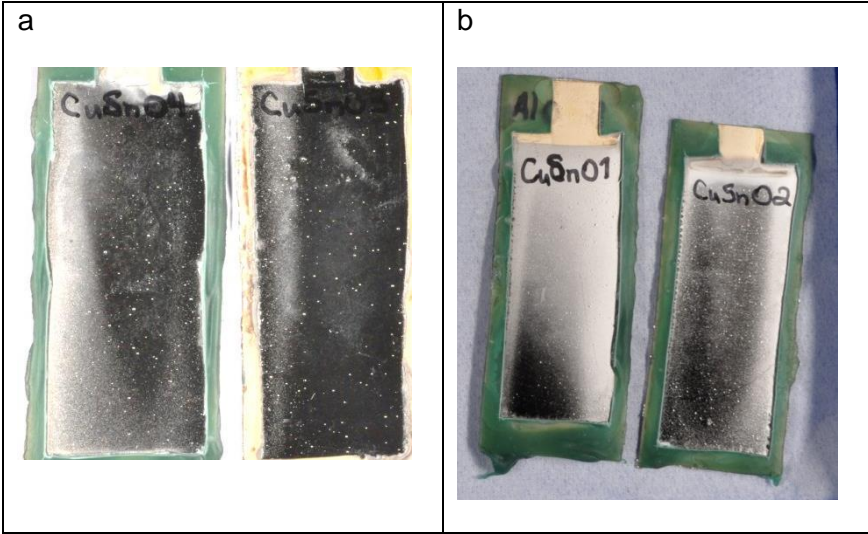


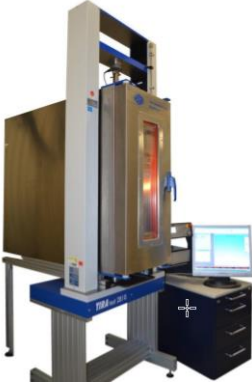
Abbildung 24: Schutzschichten auf galvanischen CuSn-Folien, a) Hochglanz-Nickel, b) Nickel-Phosphor

**Inhalte HS-S:**

**Relaxationsversuche**

Für gewalzte Materialien zur Membranherstellung existieren umfangreiche Datenblätter der Hersteller. Diese können für die Simulation und Auslegung der Membran genutzt werden, bei galvanisch hergestellten Folien existieren solche nicht. Um die Parameter für die Simulation zu ermitteln wurden geeignete Proben hergestellt und Relaxationsversuche mit einer Zugprüfmaschine des Typs TiraTest 2810 mit Klimakammer durchgeführt. Bei der Relaxation handelt es sich um eine Spannungsabnahme über der Zeit im Material bei gleichbleibender Dehnung. Die Dehnung wird dabei innerhalb 1 s auf die die Probe aufgebracht.

**Temperatur:** -40°C ... 180°C  
**Feuchte:** 10% ... 95% r.F.  
**Kraftmessbereich:** 1 kN, 10 kN



- Probenlänge: 115 mm
- Probenbreite (mittig): 12,5 mm
- Probendicke: 50...70 µm

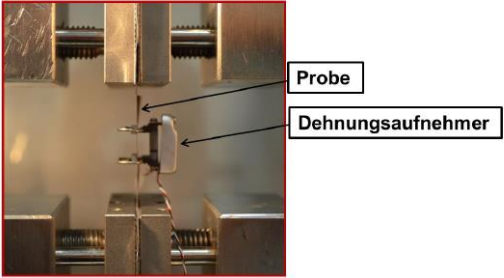


Abbildung 25: Relaxationsversuche: TiraTest 2810, Probengeometrie, Probeneinspannung

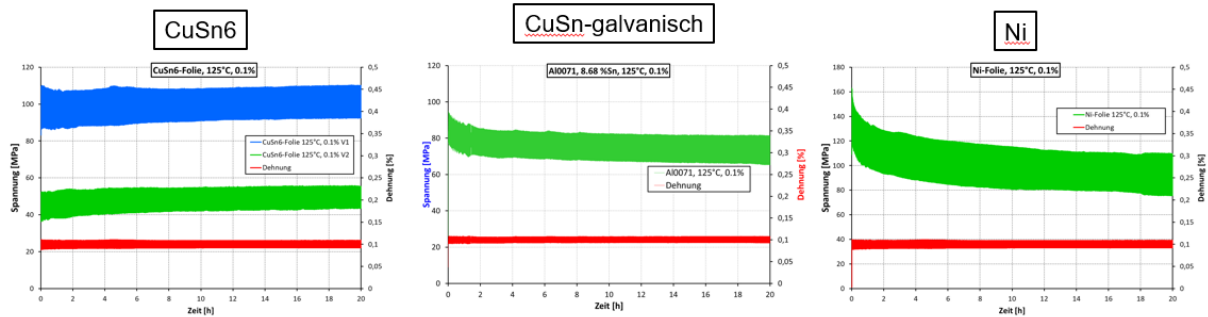


Abbildung 26: Relaxationsversuche: Vergleich Galvanisch hergestellte und tiefgezogene Proben

Die Ergebnisse der Relaxationsversuche sind wie folgt:

- Bei CuSn6-Folien ist bei 125°C und 0,1% Dehnung keine Relaxation zu erkennen.
- Bei Ni-Folien ist bei 125°C und 0,1% Dehnung Relaxation zu erkennen.
- Bei den galvanisch Abgeschiedenen Proben ist bei 125°C und 0,1% Dehnung Relaxation zu erkennen

Aus dem Vergleich von galvanisch abgeschiedenen Proben mit gewalztem Bandmaterial lässt sich ableiten, dass galvanische Abscheidung das Relaxationsverhalten von CuSn Legierungen begünstigt.

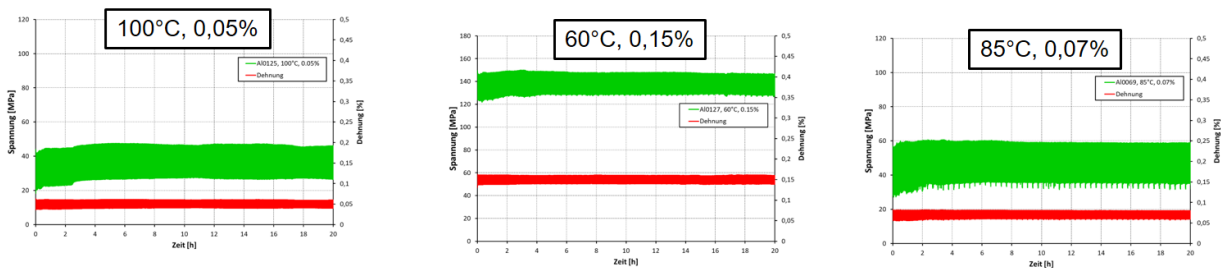


Abbildung 27: Relaxationsversuche zur Ermittlung der Einsatzgrenzen von galvanisch abgeschiedenen CuSn

Aus den Ergebnissen der Relaxationsversuche wurde die maximal mögliche Dehnung für die Simulation in AP 5 abgeleitet, bei der keine Relaxation im Material auftritt

Tabelle 8: Ermittelte Einsatzgrenzen CuSn (9,2%Sn) galvanisch abgeschieden

Temperatur [°C]	Dehnung [%]	Dehnung [mm/mm]
60°C	0,15	0,0015
85°C	0,07	0,0007
100°C	0,05	0,0005

**Relaxationsversuche galvanisch abgeschiedenes CuSn mit Wärmebehandlung**

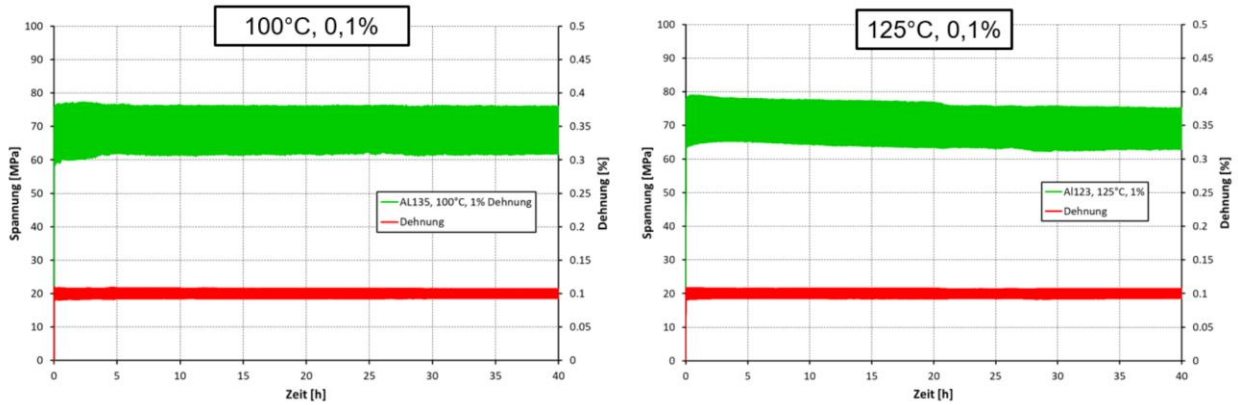


Abbildung 28: Relaxation galvanisch abgeschiedenes CuSn mit Wärmebehandlung

Eine Wärmebehandlung der galvanisch abgeschiedenen CuSn Legierung ergibt eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Bei 100°C und 1% Dehnung ist keine Relaxation in den Messergebnissen zu erkennen. Erst bei 125°C zeigt sich eine geringe Abnahme der gemessenen Spannung.

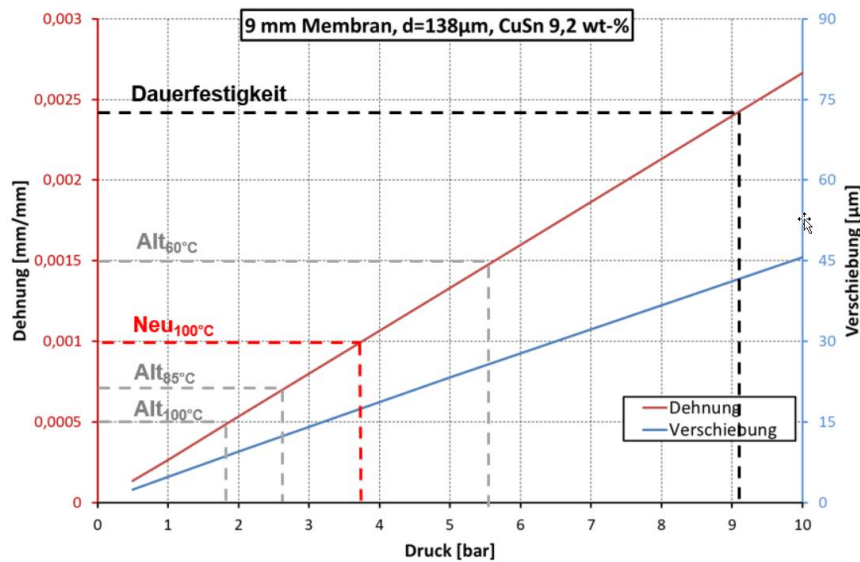


Abbildung 29: Einsatzgrenzen einer Membran mit 9mm Durchmesser



Tabelle 9: Einsatzgrenzen für eine Membrandicke von 50 µm bei 100°C Einsatztemperatur

9 mm Membran		
Druck	Dicke [µm]	Max. Dehnung [mm/mm]
50 mbar	50	0,00007
100 mbar	50	0,00015
500 mbar	50	0,00073
700 mbar	50	0,00102
2 bar	100	0,00091

14,7 mm Membran		
Druck	Dicke [µm]	Max. Dehnung [mm/mm]
50 mbar	50	0,00022
100 mbar	50	0,00041
300 mbar	50	0,00101

### Charakterisierung gesinterter Silberpaste

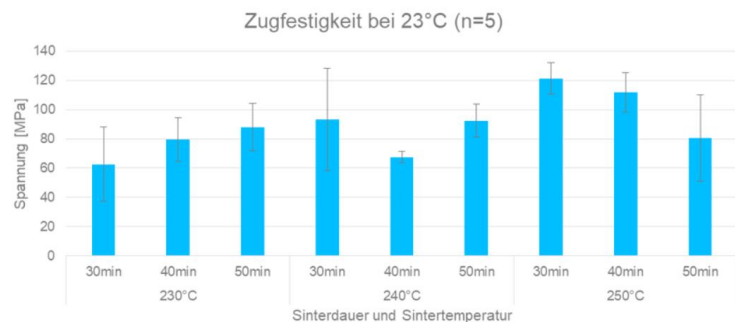


Abbildung 30: Gesinterte Zugstäbe aus Silberpaste, Messergebnisse Zugversuch für unterschiedliche Sinterparameter

Die gemessene Zugfestigkeit von gesintertem Silber ohne zusätzlichem Druck beim Sintervorgang liegt im Bereich 62,6 MPa bis 121,3 MPa. Laut Literatur liegt die Zugfestigkeit von druckassistiertem gesintertem Silber bei ca. 135 MPa. Somit entsprechen die erzielten Ergebnisse den Erwartungen.

## 2.4 AP4: Voruntersuchungen zum Fügen der galvanisch hergestellten Folien auf Leiterplatte

**Einzelergebnis:** Dokumentation der Ergebnisse

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte fem:**

### Abscheidungen auf tiefgezogenen CuSn-Membranen

Membranen aus tiefgezogenem CuSn wurden mit zwei TLP-Beschichtungen für das Hahn-Schickard-Institut Villingen-Schwenningen beschichtet. Die CuSn-Membranen wurden entweder mit einem Ag + Sn Schichtsystem oder nur mit Sn beschichtet. Die folgenden Elektrolyte und Vorbehandlungssysteme wurden dafür verwendet:

- Slotoclean EL KG ® Entfettungsbad der Firma Schlötter
- 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Dekapierung
- Mattzinnbad SAT 20-1 ® der Firma Schlötter
- Arguna ® ET der Firma Umicore

Die CuSn-Membranen wurden mit einem bleifreien Lot auf Drähte gelötet und die Rückseite mit SLOWAX abgedeckt. Die Membranen wurden anschließend entfettet und dekapiert.

Für die Beschichtung mit Ag + Sn wurde nach dem Dekapieren und Spülen eine dünne Silberschicht aus einem cyanidischen Vorsilberbad aufgebracht. Anschließend wurde aus einem cyanidischen Ag-Elektrolyten (Arguna ® ET) bei Raumtemperatur und einer Stromdichte von 1 A/dm<sup>2</sup> eine 10 µm dicke Ag-Schicht abgeschieden. Die mit Silber beschichteten Substrate wurden gespült und erneut kurz dekapiert. Die Abscheidung von Mattzinn erfolgte aus dem Elektrolyten SAT 20-1 bei Raumtemperatur und einer Stromdichte von 1,5 A/dm<sup>2</sup>. Es wurde eine 5 µm dicke Zinnschicht abgeschieden.

Die ausschließlich mit Sn beschichteten Substrate wurden direkt nach der Dekapierung in das Mattzinn-Bad eingetaucht, es wurde ebenfalls eine 5 µm dicke Zinnschicht abgeschieden.

Die Ag- und Sn-Schichtdicken wurden nach der Beschichtung mittels RFA bezüglich Gleichmäßigkeit kontrolliert und die Ergebnisse dem Projektpartner in Villingen-Schwenningen mitgeteilt.

### Abscheidungen auf Leiterplatinen

TLP-Leiterplatinen wurden ebenfalls mit zwei Schichtsystemen beschichtet. Wie bei den CuSn-Membranen wurden die Leiterplatten entweder mit Ag + Sn oder nur mit Sn beschichtet. Dazu kamen die gleichen Elektrolyte wie oben beschrieben zum Einsatz.

Die TLP-Leiterplatinen wurden so gelötet, dass nur der zu beschichtende äußere Ring elektrisch kontaktiert wurde. Im Unterschied zu den CuSn-Membranen erfolgte die Behandlung nur im cyanidischen Vorsilberbad, zunächst außenstromlos und danach kurzzeitig mit äußerem Strom. Anschließend wurden die Leiterplatinen mit dem cyanidischen Ag-Elektrolyten bei Raumtemperatur und einer Stromdichte von 1 A/dm<sup>2</sup> beschichtet. Es wurde wiederum eine 10 µm dicke Ag-Schicht abgeschieden. Nach der Silberbeschichtung wurden die Proben gespült und nach kurzer Dekapierung in den Mattzinn-Elektrolyten eingetaucht. Die Abscheidung erfolgte bei Raumtemperatur mit einer Stromdichte von 1,5 A/dm<sup>2</sup>. Auch hier wurde eine 5 µm dicke Sn-Schicht aufgebracht. Die direkte Verzinnung erfolgte nach dem Dekapieren aus dem Mattzinn-Elektrolyten mit einer Schichtdicke von 5 µm Sn. Die Kontrolle der Gleichmäßigkeit der Schichtdickenverteilung wurde mittels RFA durchgeführt und dokumentiert.

Bei den ersten beschichteten Leiterplatinen konnten große Unregelmäßigkeiten in den Ag- und Sn-Schichtdickenverteilung festgestellt werden. Als Ursache wurden Verschmutzungen der Oberfläche aus dem Herstellungsprozess der Leiterplatte vermutet. Diese Verschmutzungen wurden mit verschiedenen Methoden untersucht (Lichtmikroskopie, REM/EDX, EDX Mapping).

Nachdem die Ursache der Unregelmäßigkeiten geklärt war, wurden die Proben vor der Beschichtung lichtmikroskopisch auf Verschmutzungen der Oberfläche hin untersucht und dokumentiert.

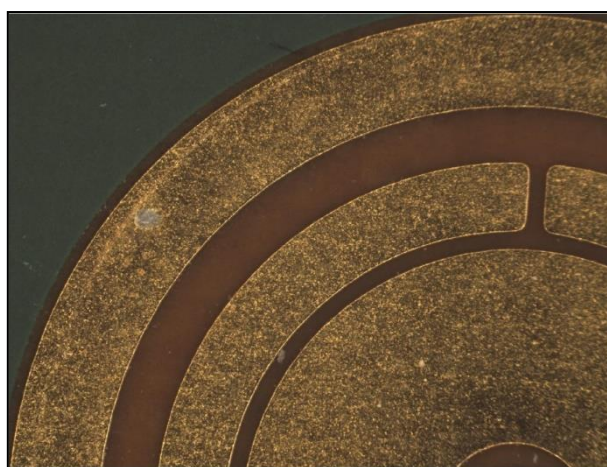


Abbildung 31: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Leiterplatte mit Verunreinigung auf der Leiterbahn

## Inhalte HS-VS:

### AP4.1: Reaktives Fügen

Das reaktive Fügen basiert auf der kontrollierten Wärmefreisetzung durch exotherme Reaktion eines Mehrschichtsystems. Dieses besteht aus einem Stapel von Einzelschichten aus unterschiedlichen Materialien, hier aus Nickel und Aluminium, mit Dicken von wenigen Nanometern. Durch einen kurzzeitigen Energieeintrag wird die Reaktion gestartet, die frei werdende Wärmeenergie kann dann zum Aufschmelzen von Lotschichten und damit zur Herstellung einer Lötverbindung genutzt werden. Im Gegensatz zum Lötprozess im Reflowofen, bei welchem das ganze Bauteil auf die Löttemperatur erwärmt wird, ist beim reaktiven Fügen die

Wärmeeinwirkung auf die Fügestelle begrenzt und dauert nur wenige Millisekunden. Somit ist nach dem Fügevorgang deutlich weniger Stress im Bauteil vorhanden.

Da es sich beim hier durchgeführten reaktiven Fügeprozess letztlich um die Herstellung einer Weichlotverbindung handelt, ist es erforderlich, dass die zu verbindenden Oberflächen eine für die verwendete Lotsorte benetzbare Oberfläche besitzen. Die für diesen Prozess eingesetzten Leiterplatten aus dem Material HELP H sind bereits mit Leiterbahnstrukturen aus Cu, Ni und Au versehen, so dass diese direkt ohne weitere Vorbehandlung eingesetzt werden können. HELP H besteht aus halogenfreiem glasfaserverstärktem Epoxidharz und ist somit besonders temperaturbeständig [Help H].

Mit den in AP 2 galvanisch hergestellten Referenzproben vom Forschungsinstitut Edelmetalle & Metallchemie (fem) wurden erste Fügeversuche auf Leiterplatten durchgeführt um die grundsätzliche Machbarkeit des Fügeverfahrens zu verifizieren.

**Referenzproben fem:** Die Referenzproben vom fem wurden als Folien geliefert und mussten auf Membrangröße gebracht werden. Hierfür wird ein Beschriftungslaser (Fa. Rofin Sinar, LMD PowerLine E-25 SGH) verwendet.

**Reaktive Folie:** Das reaktive Multischichtsystem (RMS) wurde in diesem Vorhaben als Folie aus Ni/Al, 40 µm dick und beidseitig mit je einer 10 µm dicken Sn-Schicht als Lot von zwei externen Materiallieferanten bezogen [Indium Corp. und IWS]. Die Folien wurden mit dem Beschriftungslaser und speziell angepassten Leistungsparametern in passende Ringe mit seitlichen Fahnen zum Zünden der Folie geschnitten.

**Reaktive Fügeprozesstechnik:** Zum Fügen wird ein Flip-Chip-Bonder (Fineplacer pico, Finetech GmbH) verwendet. Dieses Gerät bietet die Möglichkeit, Referenzprobe, Reaktivfolie und Leiterplatte gegeneinander zu positionieren und mit einer definierten Anpresskraft zu versehen. Damit die Membran nur im ringförmigen Bereich der Fügezone belastet wird, wurde ein spezielles Anpresstool gefertigt. Die Reaktion wird durch einen kurzzeitigen Energieeintrag in die RMS-Folie initiiert. Hierzu wird die elektrische Ladung eines Kondensators über zwei Wolframnadeln an die beiden Zündfahnen gelegt.

Abbildung 32 zeigt die zum reaktiven Fügen der Referenzfolien verwendeten Einzelkomponenten sowie die Fügeprozesstechnik.



Abbildung 32: Von links: Leiterplatte, Referenzprobe fem, RMS-Folie, Prozesstechnik

Abbildung 33 zeigt die Darstellung der untersuchten Bereiche sowie schematisch die Schichtfolgen der Referenzfolien, RMS und Leiterplatten.

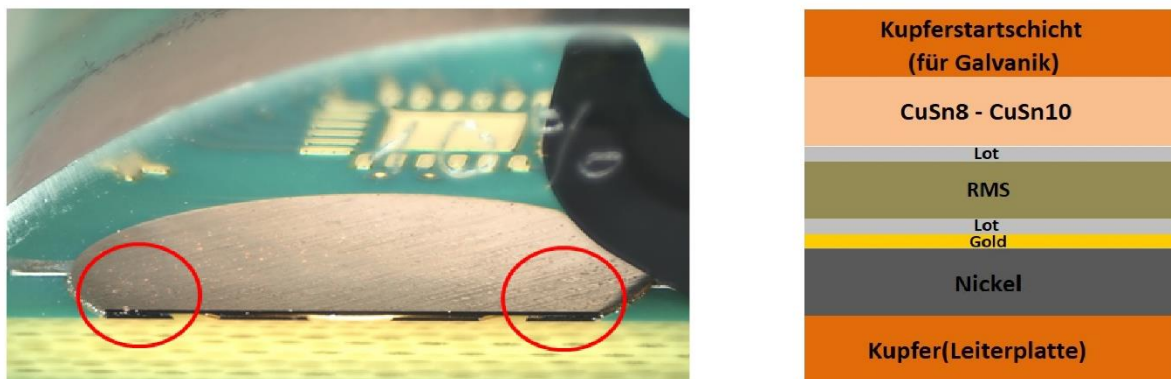


Abbildung 33: Links: Fügezonen im Querschliff, Rechts: schematische Schichtfolgen

Abbildung 34 zeigt die Fügezonen, die mikroskopisch begutachtet wurden. Die Untersuchung im Querschliff zeigt, dass CuSn<sub>8</sub>-Membrane ohne weitere Kontaktmetallisierung gefügt werden können und eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Membran und Leiterplatte hergestellt werden kann.

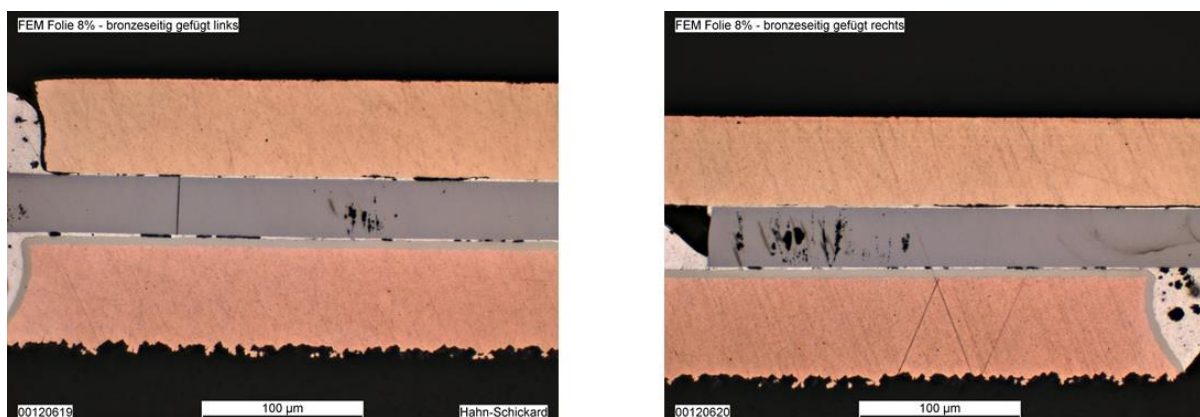


Abbildung 34: Reaktiv gefügte Referenzfolie galvanisch abgeschieden im Querschliff

### Inhalte HS-S:

Der Bericht über die Ergebnisse der Voruntersuchungen und der Durchführung der AVT Verfahren erfolgt gemeinsam im Kap. 3.7

## 2.5 AP5: Simulation

**Einzelergebnis:** Galvaniksimulation, parametrisiertes Simulationsmodell, Membranauslegung, Bericht über das Simulationsergebnis

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

### **Beschreibung:**

Inhalte fem:

#### **2D- und 3D-Simulationen galvanischer Abscheidungen und Membranprofil-Optimierungen**

Das Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics 5.3a mit dem Zusatzmodul Electrodeposition wurde für 2D- und 3D-simulierte Legierungsabscheidungen eingesetzt. COMSOL ist in der Lage Abscheidungen in 1D, 2D und 3D nachzubilden. Die Legierungsabscheidung wurde zunächst im Labor durchgeführt und anschließend in COMSOL nachgestellt. Dadurch konnten die simulierten Abscheidewerte mit den tatsächlichen Laborergebnissen abgeglichen werden und die Simulationsparameter an die reale Situation angenähert werden.

#### **2D-Simulationen einer galvanischen Legierungsabscheidung**

Um die CuSn-Legierungsabscheidung in COMSOL zu simulieren, wurden zwei separate Metallabscheidungsreaktionen betrachtet: eine Kupferreaktion und eine Zinnreaktion. Die Reaktionen wurden durch Gleichgewichtspotentiale, Austauschstromdichten und andere Parameter bestimmt.

Durch Abscheidungen in der Hull-Zelle konnten verschiedene Stromdichten getestet werden. Die Abscheidegeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Stromdichte wurden als Kennwerte für die Simulation verwendet. Dadurch konnten die Legierungszusammensetzung und die Abscheidegeschwindigkeit von Miralloy mit Hilfe von COMSOL nachgebildet werden.

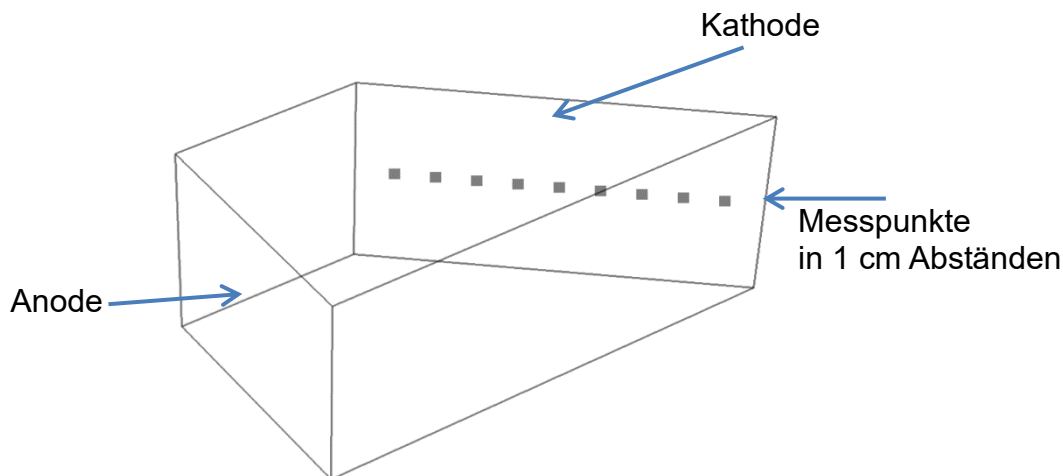


Abbildung 35: 3D-Hull-Zellen-Geometrie mit Anode und Kathode: wurde sowohl für Laborabscheidungen als auch in COMSOL-Simulationen verwendet. Für die Simulationen der Hull-Zelle wurde eine 2D-Geometrie verwendet.

Abbildung 35 zeigt die 3D-Geometrie einer Hull-Zelle für die Laborversuche. Die Lage von Kathode und Anode in der Zelle ist eingezeichnet. In COMSOL wurden die Hull-Zellen-Simulationen in 2D ausgeführt, um die Simulationszeiten in Grenzen zu halten. Die grundsätzliche Geometrie der Zelle war aber die gleiche. Die Ergebnisse der Schichtdickenmessung der im Labor beschichteten Hull-Zellen sind in Abbildung 36 aufgeführt. Diese wurden mit der simulierten Schichtdicke verglichen. Wie eingangs schon erwähnt ist eine Stromdichte von  $3 \text{ A/dm}^2$  für die Abscheidung aus dem Miralloy-Elektrolyten ideal, da hiermit die gewünschte Legierungszusammensetzung von  $\sim 10 \text{ Gew.-%}$  Zinn erreicht wird. Bei den Simulationen lag das Hauptaugenmerk auf einer der Realität entsprechenden Abscheidegeschwindigkeit von  $\sim 0,6 \mu\text{m/min}$  bei  $3 \text{ A/dm}^2$ . Die Mess- und Simulationsergebnisse ober- und unterhalb einer Stromdichte von  $3 \text{ A/dm}^2$  waren von der Tendenz her passend, entsprachen sich jedoch einander nicht genau. Die Legierungszusammensetzung bei  $3 \text{ A/dm}^2$  lag sowohl in der Simulation als auch bei den Laborversuchen bei  $\sim 10 \text{ Gew.-%}$  Zinn. Mit diesen Parametern wurden auch die folgenden Simulationen berechnet.

Kleine Unterschiede zwischen Simulation und Realität waren zu erwarten, da nicht alle physikalischen Aspekte in COMSOL berücksichtigt werden können, wie z.B. Rührungseffekte (in der Simulation wird eine gleichmäßige Vermischung angenommen), Gasentwicklung beim Abscheiden, Leitungsverluste in der elektrischen Leitung etc.

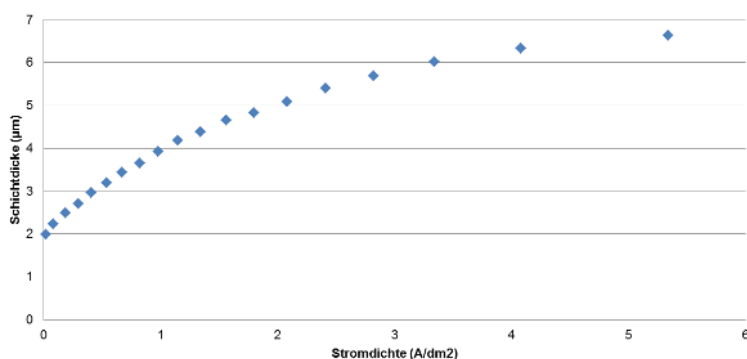


Abbildung 36: Schichtdicke bei unterschiedlichen Stromdichten: Laborversuch zur Miralloy-Legierungsabscheidung in der Hull Zelle (10 Minuten)

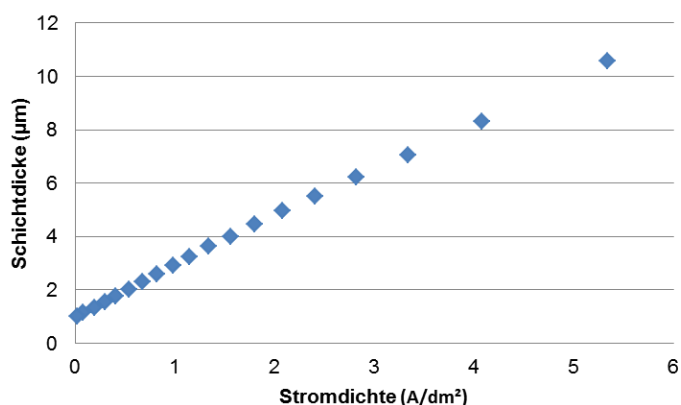


Abbildung 37: Hull-Zellen-Simulation mit COMSOL: Schichtdicke bei unterschiedlichen Stromdichten (10 Minuten)

### **3D-Simulationen von galvanisch abgeschiedenen Membranen**

Es wurden 3D-Simulationen an drei verschiedenen Proben-Geometrien durchgeführt: an einer freistehenden Folie, an einem Träger für 9 Membranen mit einem Durchmesser von 9 mm (Anordnung 3x3 Membranen), sowie an einem Träger für 4 Membranen von 14,7 mm Durchmesser (Anordnung 2x2 Membranen).

Zur Verifizierung der mittels 2D-Simulation ermittelten Abscheidparameter wurde im Laborversuch eine freistehende Miralloy-Folie auf Grundlage dieser Parameter abgeschieden. Zusätzlich wurden diese Parameter auf eine 3D-Simulation übertragen. Auf Abbildung 38 ist Versuchsanordnung für die Laborabscheidung und die 3D-Simulation dargestellt (Geometrie des Beschichtungsbad, Anode, Kathode und die Miralloy-Folie).



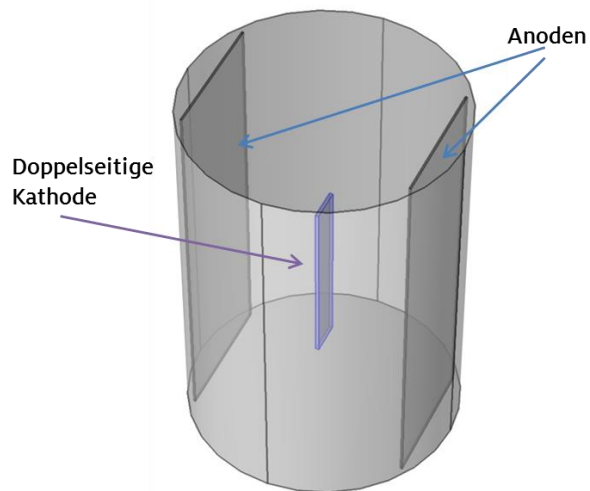


Abbildung 38: 3D-Simulation mit COMSOL: Abscheidungsgeometrie der Folienherstellung im Becherglas

Die Simulationen mit COMSOL zeigten sehr geringe Schwankungen in der Legierungszusammensetzung über die Folienfläche. Geringe Änderungen wurden auch auf den im Labor abgeschiedenen Folien gemessen. Wie auf Abbildung 39 dargestellt, betragen diese Schwankungen weniger als 1 Gew.-% Zinn und sind im Rahmen dieses Projekt akzeptabel.

Abbildung 39 zeigt ebenfalls den Schichtdickenverlauf über eine abgeschiedene Folie. Die simulierten Schichtdickenunterschiede sind in einem zu erwartenden und akzeptablen Bereich. Höhere Schichtdicken an den Rändern und Ecken der Folie sind durch die normale Verteilung der Stromliniendichte bedingt. An den Ecken und Ränder ist die Stromliniendichte höher als in der Mitte, wenn ein System keine Abschirmungen/Blenden enthält.

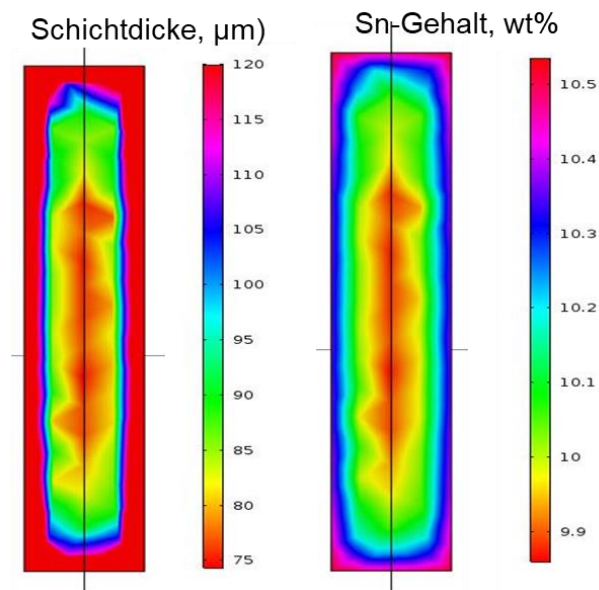


Abbildung 39: Simulation der Folienbeschichtung mit COMSOL:

Schichtdicke und Sn-Gehalt bei einer Stromdichte von  $3 \text{ A/dm}^2$

Mit den ermittelten Simulationsparametern waren auch Simulationen von Membrangeometrien möglich. Abbildung 40 zeigt die Skizze des Versuchsaufbaus zur Abscheidung von Drucksensormembranen.

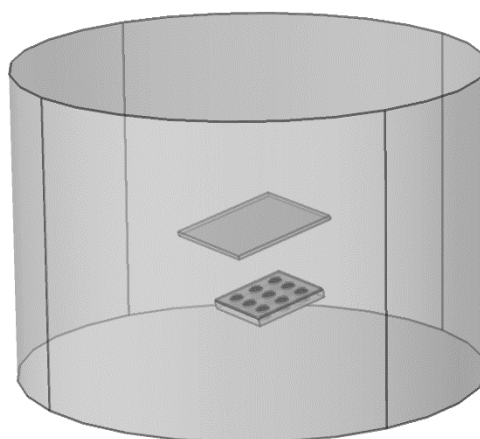


Abbildung 40: 3D-Simulation mit COMSOL: Abscheidung von 3x3 Membranen im Becherglas

Mit Hilfe von Simulationen wurde versucht, die Laborversuche zur Beschichtung auf 3D-Membransubstraten so genau wie möglich abzubilden. Für diese Simulationen wurde als Startschicht eine Metallisierung von 500 nm Kupfer mit einer Cu-Leitfähigkeit von  $5,998e+7$  S/m angenommen. Wie bei der Simulation der Folien zuvor wurde die Legierungszusammensetzung und die Schichtdicke analysiert. Abbildung 41 zeigt die Ergebnisse einer simulierten Abscheidung. Die Legierungszusammensetzung liegt im Mittel bei ungefähr 10 Gew.-% Zinn. Die vier Membranen in den Ecken des 3x3-Arrays sind geringfügig dicker als die Membranen in der Mitte des Trägers. Der Vergleich des Schichtdickenprofils einer simulierten COMSOL-Membran und einer im Labor abgeschiedenen Miralloy-Membran ist in Abbildung 42 dargestellt. Auf der ringförmigen Erhebung der Membrane ist beim Laborversuch eine höhere Schichtdicke festzustellen. Dies liegt am geringeren Abstand der Erhebung zur gegenüberliegenden Anode. Insgesamt konnten mit der Simulation die realen Ergebnisse aus den Laborversuchen gut abgebildet werden, die Erhebungen weisen in beiden Fällen eine ca. 5-10% höhere Schichtdicke auf als die mittige Fläche. Auch die geringere Schichtdicke in der Nähe der Membranränder, die durch den Abschirmungseffekt des nicht leitenden Kunststoffdeckels erklärt werden kann, wurden bei der Simulation erfasst.

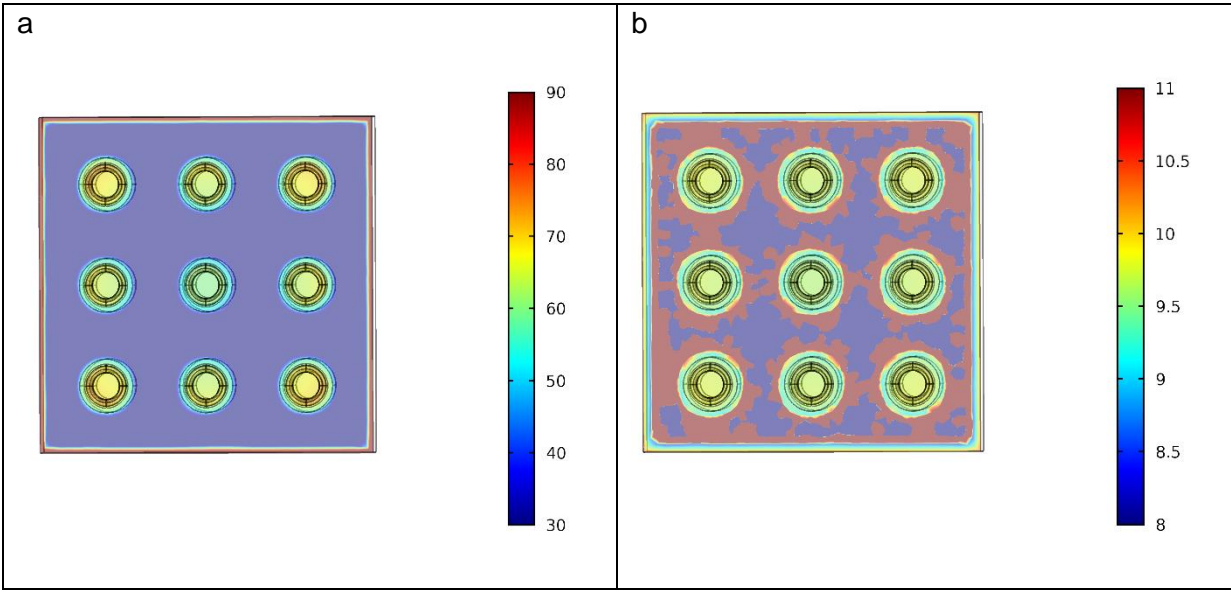


Abbildung 41: 3D-Simulation mit COMSOL, 3x3 Membranen a) Schichtdicken-verteilung (in  $\mu\text{m}$ ) b) Sn-Gehalt (in Gew.-%)

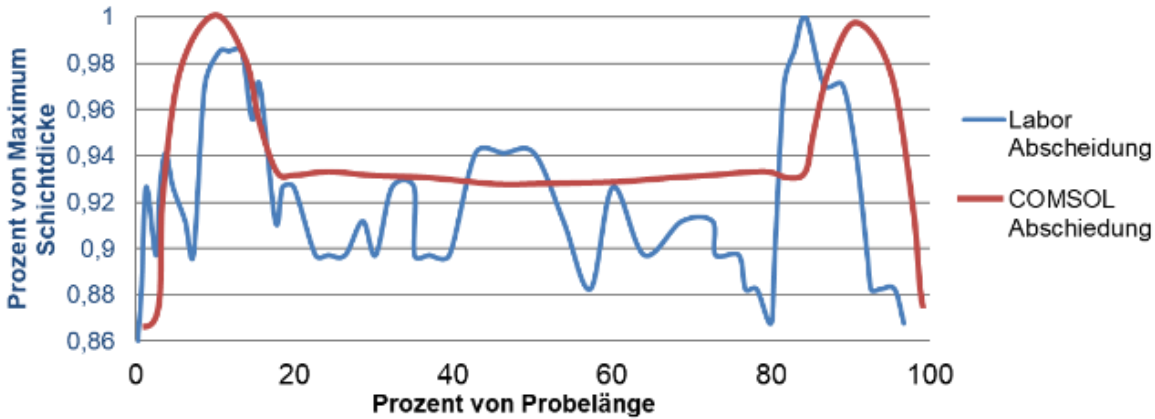


Abbildung 42: Vergleich der Schichtdickenverteilung zwischen Laborabscheidung (im Querschliff) und der simulierten COMSOL-Abscheidung

Es wurden Simulationen mit weiteren Geometrien des Blendendeckels durchgeführt, um deren Effekte auf das Schichtdickenprofil zu ermitteln. Diese Simulationsversuche sind als eine Art Vorversuch zu verstehen. Statt jede neue Blendengeometrie mit Hilfe eines 3D-Druckers anzufertigen und in Laborversuchen zu testen, wurden die Effekte und Tendenzen anhand der Simulation bestimmt. Abbildung 43 zeigt den Vergleich von zwei Blendengeometrien (eine Blende, die im Labor eingesetzt wurde und eine Blende mit zusätzlichem Ring, der die erhöhte Abscheidung über den Erhebungen verhindern soll). Abbildung 43 Bild c stellt diese Blende im Querschnitt dar.

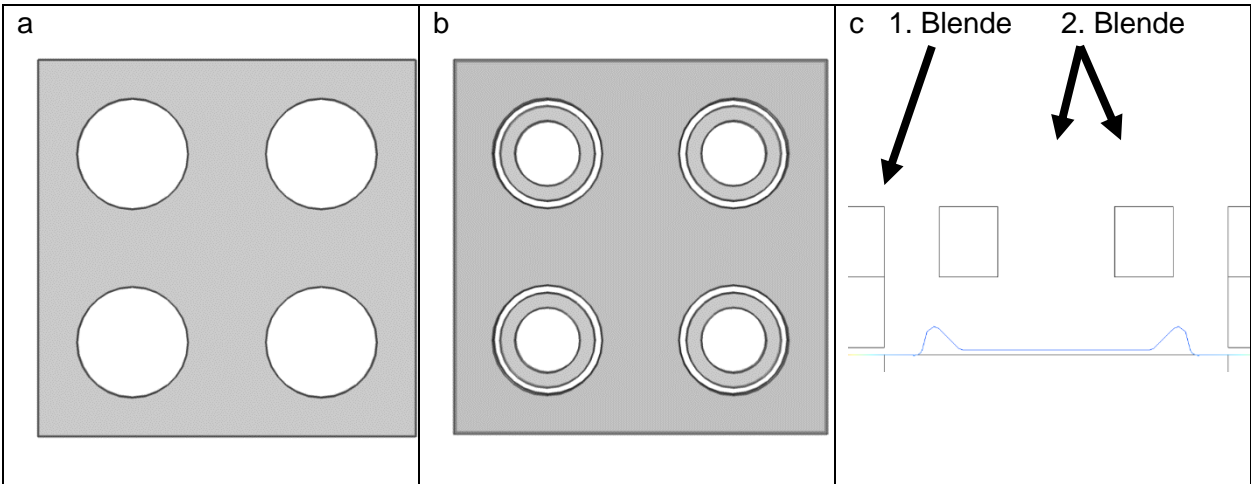


Abbildung 43: Blendendeckel für 2x2 Simulationen mit COMSOL a) Ursprüngliche Blendendeckel-Geometrie b) Geänderter Blendendeckel zur Verbesserung des Schichtdickenprofils c) Querschnitt durch einen Membranträger mit den beiden oben aufgesetzten Blenden

Anhand dieser Simulationen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden: je schmaler und passgenauer die Blendenringe über der Erhebung sind, desto geringer ausgeprägt sind die Schichtdickenspitzen auf den Erhebungen. Durch Verbreiterung der Blendenringe werden die mittigen Flächen der Membrane gleichmäßiger beschichtet. Bei Verdopplung der Dicke der 1. Blende von 1,5 mm auf 3 mm wurde die Schichtdickenverteilung etwas verbessert (kleinere Unterschiede und flachere Anstiege der Schichtdickenänderung).

**Inhalte HS-S:**

Es wurde ein parametrisiertes Simulationsmodell für die mechanische Auslegung der Drucksensormembranen in ANSYS® erstellt, welches auf Basis der im AP 3 bestimmten Materialparameter und in AP 4 ermittelten Geometrien/Abstände der Fügepartner eine Auslegung und geometrische Optimierung der Sensormembranen unterstützt.

**Parametrisiertes Sensormodell:**

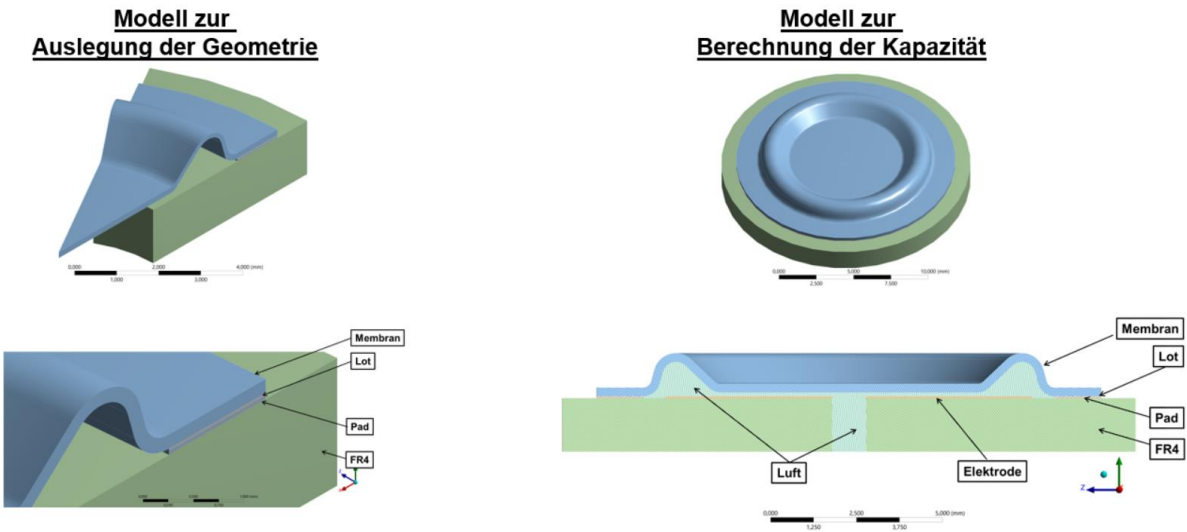


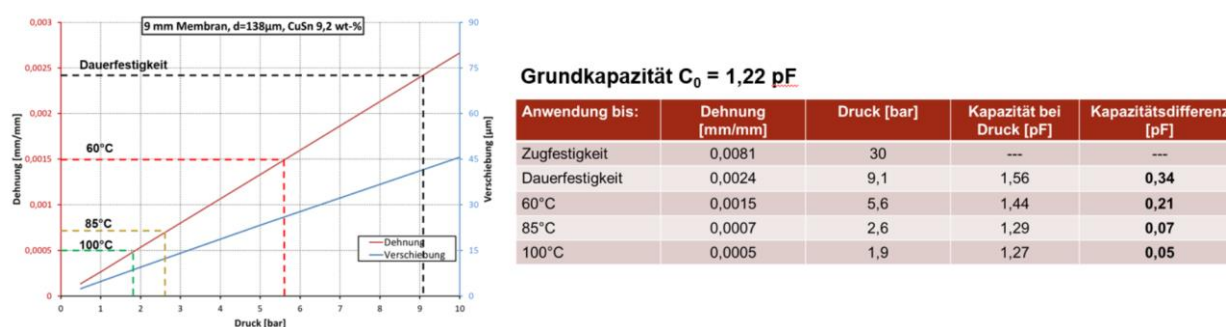
Abbildung 44: Parametrisiertes Simulationsmodell

Dabei wurden folgende Materialparameter verwendet

**Tabelle 10: Materialdaten**

Bauteil	Material	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dauerfestigkeit [MPa]	CTE [ppm/ K]	Referenz -temperatur [°C]	Materialverhalten
Luft	Luft						$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m
Membran	CuSn8 (galvanisch)	92.800	749	225	18	20	linear-elastisch
Membran	Edelstahl 1.4435	200.000	---	---	16	20	linear-elastisch
Sinterschicht	Silber (gesintert)	27.500	60...120	---	19	230	temperaturabhängig
Lötschicht	SAC305	50.000	---	---	19,6	217	Temperatur-/ Zeitabhängig/ plastisch (Kriechen)
Ankontaktierung	Kupfer	110.000	430	---	18	20	linear-elastisch
Leiterplatte	FR4	19.300	---	---	15,7 / 54	20	temperaturabhängig

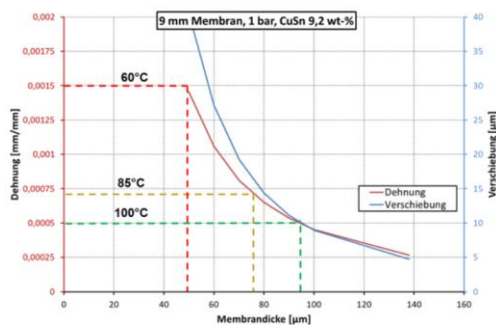
Aus der mechanischen Simulation der Verformungen unter Druckeinfluss wurde ebenfalls in ANSYS die resultierende Kapazität und deren druckabhängige Änderung simuliert.



**Abbildung 45: Simulationsergebnis: Einsatzgrenzen einer Membran mit 9 mm Durchmesser und einer Dicke von 138 µm**

Wie in Abbildung 45 gezeigt ist, kann mit einer Membran (Standardabmessungen bei HS-S: Durchmesser = 9 mm, Dicke = 138 µm) aus galvanisch abgeschiedenem Kupfer eine Dauerfestigkeit bis zu einer Druckbelastung von 9,1 bar erreicht werden. Allerdings kann, ausgehend von den Relaxationsversuchen in Kapitel 2.3, bei Temperaturbelastung mit Spannungsrelaxation gerechnet werden, d.h. das Drucksensorsignal wird bei dauerhafter Belastung über der Zeit driften.

Abbildung 46 zeigt die Auslegung einer galvanisch abgeschiedenen 9 mm Membran für den Druckbereich bis 1 bar bei unterschiedlichen Einsatztemperaturen.



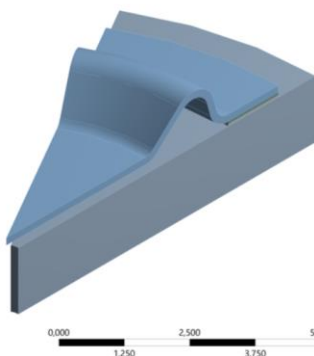
Grundkapazität  $C_0 = 1,22 \text{ pF}$

Anwendung bis:	Dehnung [mm/mm]	Dicke [ $\mu\text{m}$ ]	Kapazität bei Druck [pF]	Kapazitätsdifferenz [pF]
Zugfestigkeit	0,0081	18	---	---
Dauerfestigkeit	0,0024	37	1,67	<b>0,449</b>
60°C	0,0015	49	1,47	<b>0,250</b>
85°C	0,0007	77	1,32	<b>0,093</b>
100°C	0,0005	94	1,28	<b>0,061</b>

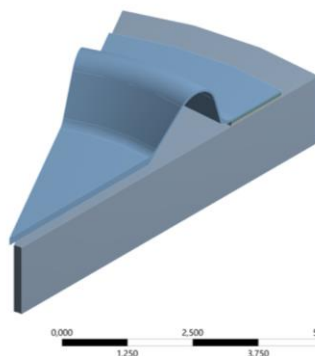
Abbildung 46: Simulationsergebnis: Auslegung einer Membran mit einem Außendurchmesser von 9 mm für den Messbereich 1 bar

Ein Vorteil der galvanischen Abscheidung ist es, dass durch Verwendung von Blenden unterschiedliche Bereiche mit unterschiedlichen Dicken herstellen kann. Mittels Simulation wurde geprüft, ob dieser Vorteil auch für galvanisch abgeschieden Membranen genutzt werden kann. Wie in Abbildung 47 dargestellt wurden hierfür die Dicke der gesamten Membran, der Welle und der Elektrodenfläche variiert.

Variation: Dicke Membran



Variation: Dicke Welle



Variation: Dicke Elektrodenfläche

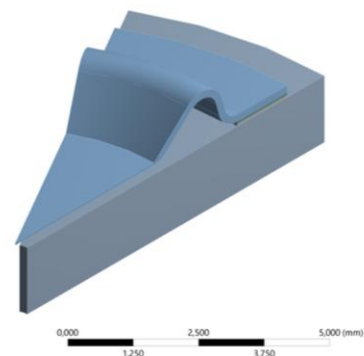


Abbildung 47: Modell zur Dickenvariation für galvanogeformte Membranen

In Abbildung 48 sind die Ergebnisse der Simulationen zu sehen. Dabei zeigte sich, dass eine Verringerung der Dicke der Elektrodenfläche zu einer höheren Spannungs-/ Dehnungsbelastung als die Verringerung der Gesamtdicke der Membran oder der Dicke der Welle führt. Weiter zeigte eine Verringerung der Gesamtdicke der Membran eine höhere Kapazitätsdifferenz bei Druckbelastung als eine Verringerung der Dicke der Welle oder der Dicke der Elektrodenfläche.

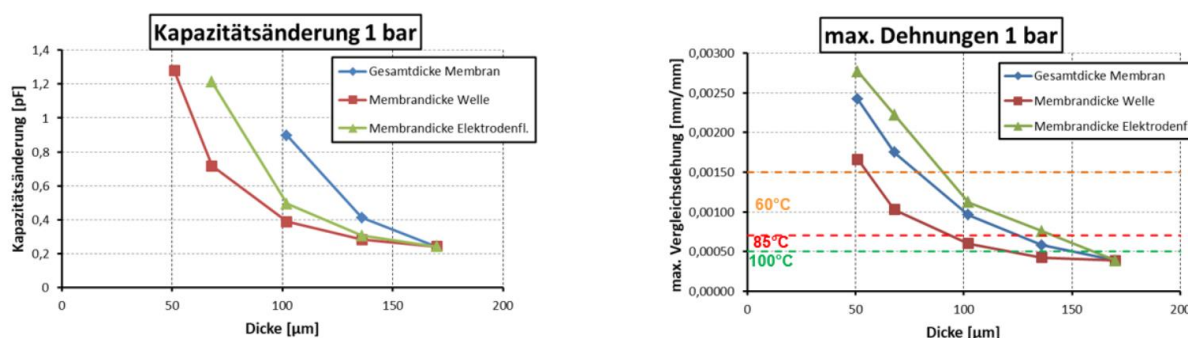


Abbildung 48: Simulationsergebnis Designvariationen

Die Simulationen zeigen also, dass unterschiedliche Dickenbereiche bei den hier gezeigten Drucksensormembranen hinsichtlich Performance keinen weiteren Vorteil bieten. Daher erfolgt die Auslegung der Drucksensorfamilie mit homogener Materialdicke.

## 2.6 AP6: Untersuchungen zur Substratherstellung für die Galvanik und galvanische Abscheidung von Sensormembranen auf den Substraten

**Einzelergebnis:** Prozessdokumentation für Substratherstellung und galvanische Beschichtung

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte fem:**

Der gesamte Aufbau für die Abscheidung auf einem Kunststoffsubstrat besteht aus vier Hauptkomponenten. Als Grundlage dient der Polymerträger, auf welchen eine Metallisierungsschicht aufgebracht wird, so dass der Kunststoff eine leitfähige, beschichtbare Oberfläche aufweist. Darauf wird eine gelochte Metallfolie oder ein kleiner Metallstreifen angebracht, um Kontakt zwischen der Metallisierung und der Stromquelle herzustellen. Als Abdeckung wird ein gedruckter Polymer-Blendendeckel eingesetzt, der verschraubt wird. Der Polymer-Blendendeckel ermöglicht die gezielte Abscheidung und die Trennung der einzelnen Drucksensormembranen voneinander. Jede der vier Komponenten wird im Folgenden näher beschreiben und Varianten davon aufgezeigt.

### 3D-Kunststoff-Substrat-Varianten

Die Polymerträger geben die 3D-Form vor, die durch die Membran abgebildet werden soll. Der Vorteil der Kunststoffträger ist die Flexibilität in der Herstellung und gegenüber



Geometrieänderungen für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Es wurden im Projekt drei Kunststoffvarianten verwendet: 3D-gedruckte Duroplast Digital Light Processing (DLP)-Kunststoffsubstrate, Träger aus gefrästem PMMA und thermogeformte Cyclo-Olefin-Polymer (COP) Kunststofffolien (s. Abbildung 49).

Bei 3D-Druckverfahren entstehen prozessbedingt Stufen, die potentielle Schwachstellen bei der Membranherstellung und in der späteren Anwendung darstellen könnten. Als Alternative zu 3D-gedruckten stufigen Substraten wurden von HS-VS stufenlose Substrate aus thermogeformtem Kunststoff (COP) bereitgestellt. Weiter wurden von HS-S durch Drehen hergestellte PMMA-Substrate untersucht.

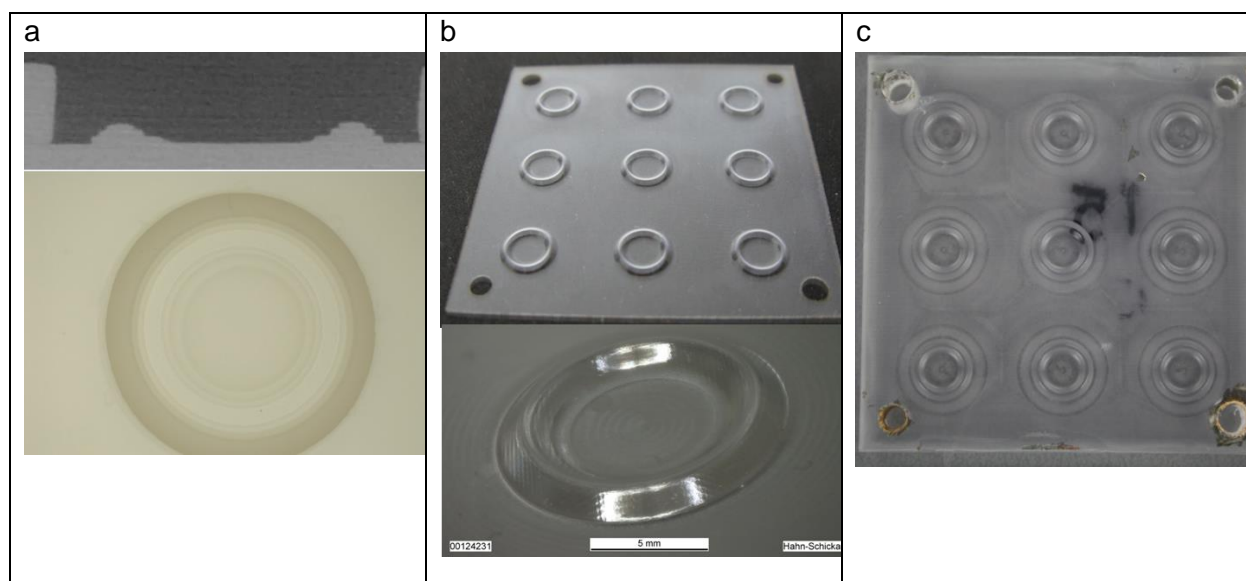


Abbildung 49: Kunststoff-Substrate links: 3D-gedrucktes Duroplast DLP-Substrat, Mitte: Thermogeformtes COP-Substrat, rechts: gefrästes PMMA-Substrat

### **Metallisierung von Kunststoff-Substraten**

Da die Kunststoffträger selbst nicht leitfähig sind, musste eine gut haftende leitfähige Metallisierung aufgebracht werden, um die Substrate galvanisch beschichten zu können. Als Metallisierungsverfahren im Zuge des Projekts wurden PVD-Beschichtungen und ein leitfähiges Cu-Spray (s. Abbildung 50) ausgewählt. Zwei Varianten von PVD-Startschichten wurden auf COP-Folien aufgebracht: zum einen Cu-PVD mit Titan als Haftvermittler, zum anderen reines Cu-PVD.

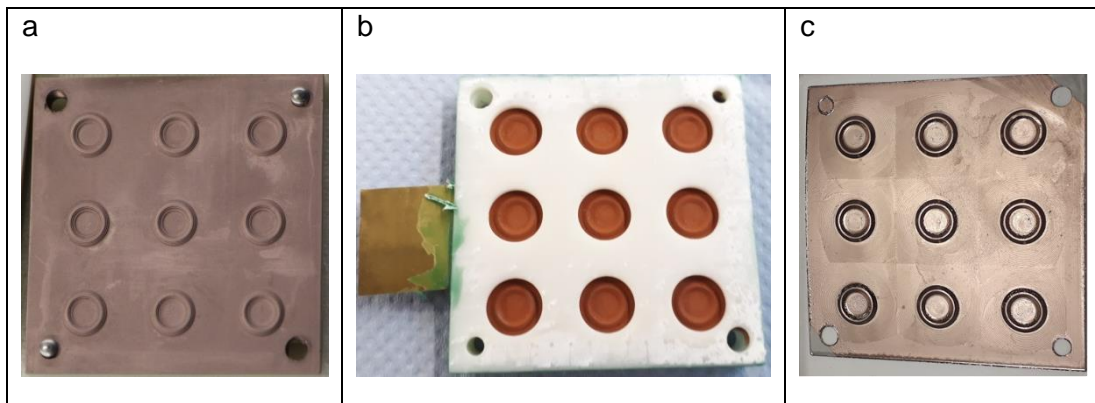


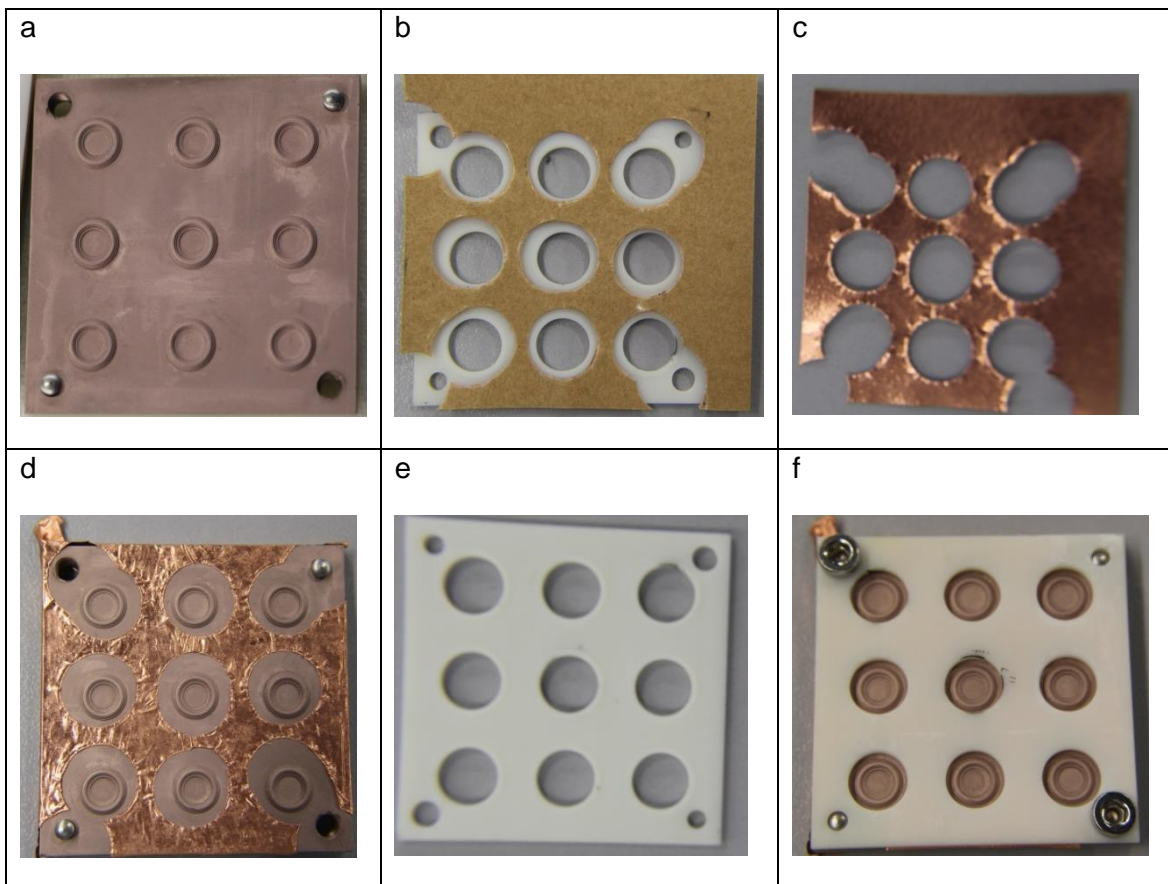
Abbildung 50: Metallisierungsvarianten a) Cu-PVD-Metallisierung auf DLP-Kunststoff-träger, b) Kupferleitspray auf DLP-Kunststoffträger mit Blendendeckel und Kontaktierungsfahne, c) Ti+Cu-PVD-Metallisierung auf COP-Kunststoffträger

Bei der Verwendung von Cu-Spray entstanden Blasen zwischen Kupfer und Kunststoffträger. Diese Blasen wurden vom Treibgas der Sprühdose verursacht und verursachten Löcher in der abgeschiedenen Schicht. In einem Folgeversuch wurde der Cu-Leitlack mit einem Pinsel aufgetragen. Alle strukturellen Störstellen und Ungleichmäßigkeiten (Löcher, Abhebungen, dünnere Bereiche und Flüssigkeitsansammlungen insbesondere an Kanten) wurden in den darauf abgeschiedenen Miralloy-Schichten abgebildet. Auch mit Hilfe eines Blendendeckels konnte keine Verbesserung erzielt werden. Der Cu-Leitlack haftete zudem während der Miralloy-Beschichtung nicht gut genug auf den DLP-Kunststoffsubstraten, so dass dieser Weg nicht weiterverfolgt wurde.

### Miralloy-Abscheidungen auf 3D-gedruckten DLP-Kunststoffsubstraten

Bei der Abscheidung auf den DLP-Kunststoffsubstraten wurden zwei Möglichkeiten zur Herstellung der elektrischen Kontaktierung zwischen Metallisierung und Stromquelle getestet. Zunächst wurde ein doppelseitiges Cu-Klebeband so gelocht, dass die späteren Sensormembranen einzeln ausgespart waren und die PVD-Schicht in den Zwischenräumen flächigen Kontakt hatte. Als Variante davon wurde anstatt des Cu-Klebebands eine Edelstahl-Folie eingesetzt. Der schrittweise Zusammenbau des DLP-Substrats mit Cu-PVD-Metallisierung und gelochter Cu-Folie ist auf Abbildung 51 dargestellt.

Die Kombination von doppelseitigem Cu-Klebeband als Kontaktierung und Cu-PVD-Startschichten stellte sich für die Miralloy-Abscheidungen als nicht optimal heraus. Auf vielen Membranen waren mittig Abhebungen erkennbar. Dickere Miralloy-Schichten mit längeren Abscheidezeiten waren zwar formstabiler, hier traten jedoch auch Abhebungen auf der mittleren Fläche und dem Erhebungsring auf. Die Membranen wurden mit einer gelochten Cu-Folie als Kontaktierung abgeschieden. Die einzelnen Membranen blieben auf dem DLP-Kunststoffsubstrat haften, nur wenige konnten mit Skalpell und Pinzette lösen vom Träger gelöst werden.



**Abbildung 51: Schrittweiser Zusammenbau des 3D-Membransubstrats auf Duroplast Kunststoff a) Cu-PVD-Metallisierung auf DLP-Kunststoffträger, b) und c) gelochte Kupferfolie mit doppelseitigem Klebeband, d) Kupferfolie und Kontaktstreifen auf dem metallisierten Kunststoffträger, e) Blendendeckel, f) fertig montiertes 3D-Duroplast DLP-Kunststoffsubstrat mit gelochter Kupferfolie als Kontaktierung**

Als Versuch zur Optimierung wurden Abscheidungen ohne gelochte Cu-Folie als Kontaktierung durchgeführt. Der elektrische Kontakt wurde durch einen kleinen, am Rand eingebauten Kontaktstreifen gewährleistet. Mit diesem Aufbau konnten 3 von 9 Membranen mit wenigen, bis keinen Abhebungen hergestellt werden. Die restlichen Membranen zeigten dagegen große Abhebungen auf der Mittelfläche und die Erhebungsstufen wiesen Schwachstellen mit vermehrter Dehnung auf. Selbst die vergleichsweise besten Membranen auf einem DLP-Substrat (auf Abbildung 52) zeigen kleine Unebenheiten oder Defekte auf den Erhebungsstufen.

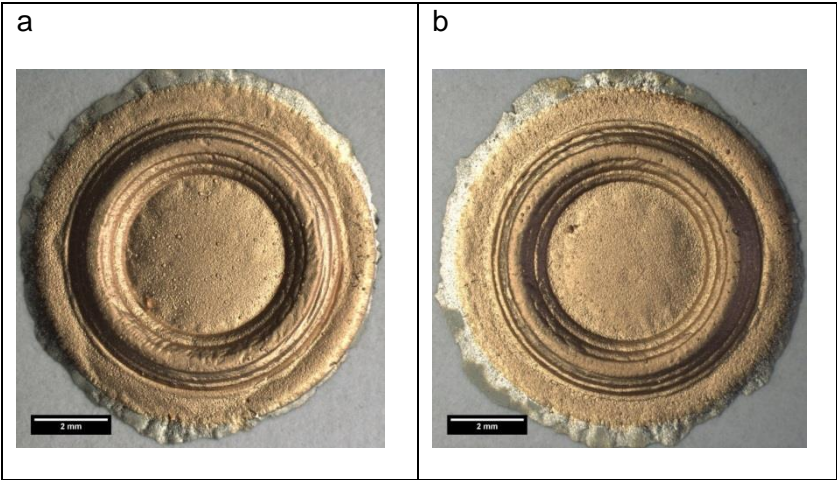


Abbildung 52: Vergleichsweise beste Membranen der Miralloy-Abscheidungen auf einem DLP Duroplast-Kunststoffträger mit 500 nm Cu-PVD-Metallisierung ohne Kontaktfolie

Die vergleichsweise besten Membranen der Abscheideversuche mit nur wenigen Defekten und ohne Abhebungen wurden beim Hahn-Schickard-Institut in Stuttgart zur Analyse der Ebenheit weiter untersucht. Die Ebenheit von Drucksensormembranen ist eine wichtige Eigenschaft, um Druckänderungen genau aufnehmen zu können. Die Konfokalmikroskopie (Keyence VHX5000) ist eine lichtmikroskopische Methode, bei der ein dreidimensionales Abbild der Oberfläche eines Objekts erstellt wird. Diese Methode wurde zur genaueren Darstellung der gefertigten Membranen und der Kunststoffträger verwendet.

Es zeigten sich Ungleichmäßigkeiten der galvanisch abgeschiedenen Membran im Bereich der nachgebildeten Stufen und eine Anhebung der Mittelfläche im Höhenprofil (Querschnitt).

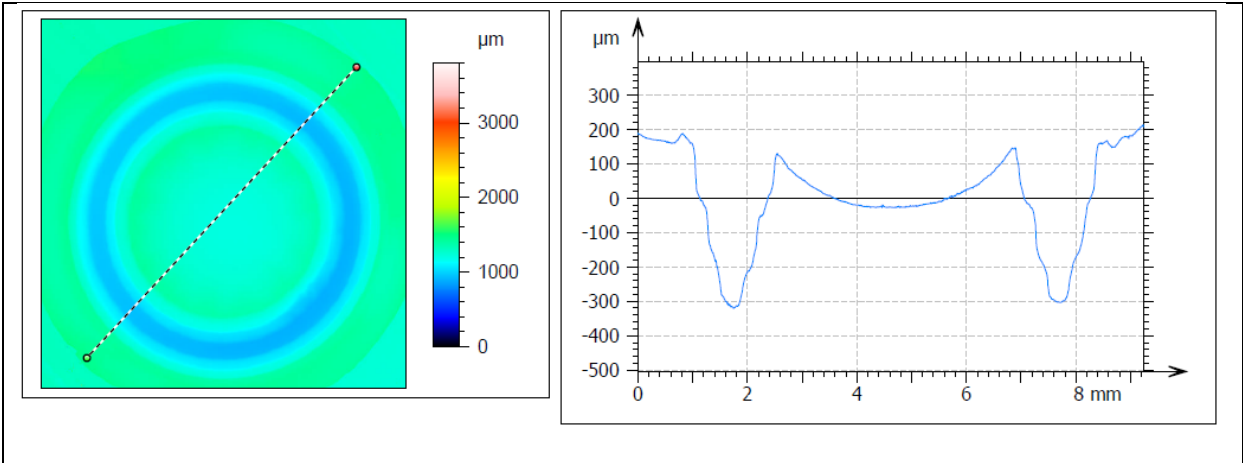


Abbildung 53: Konfokalmikroskopie Miralloy-Membran, abgeschieden auf einem metallisierten DLP-Kunststoffträger, Höhenprofil im Querschnitt durch die Miralloy-Bronze-Membran

### Miralloy-Abscheidungen auf gefrästen PMMA-Kunststoffsubstraten

Die PMMA-Kunststoffsubstrate wurden zunächst auf die finale Geometrie gefräst und danach mit Cu-PVD metallisiert. Die Träger wurden für die Abscheidung mit einem elektrischen Kontaktstreifen zwischen der PVD-Metallisierung und dem Blendendeckel versehen. Die abgeschiedenen Proben zeigten mehrere Defekte (s. Abbildung 54). Auf allen Membranen kam es beim Abscheiden zur Entstehung von Abhebungen der mittigen Fläche. Es wurden auch einige Falten auf der ringförmigen Erhebung festgestellt.

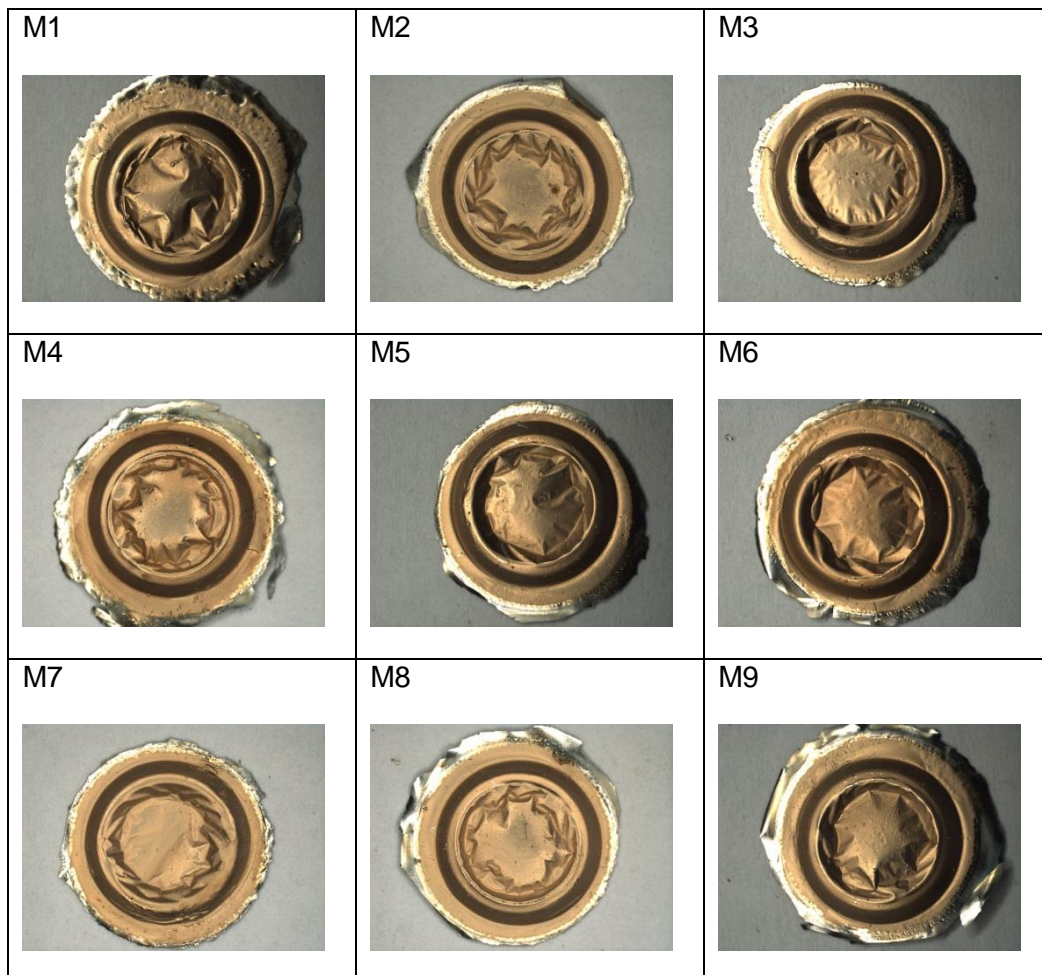


Abbildung 54: Galvanisch hergestellte Membranen: Abscheidung von Miralloy auf gedrehten PMMA-Kunststoffträgern mit 500 nm Cu-PVD-Metallisierung a) Beschichtungsaufbau mit PMMA-Kunststoffträger, Blendendeckel und Kontaktstreifen nach Beschichtung und Spülen, b) Membranen #1-9

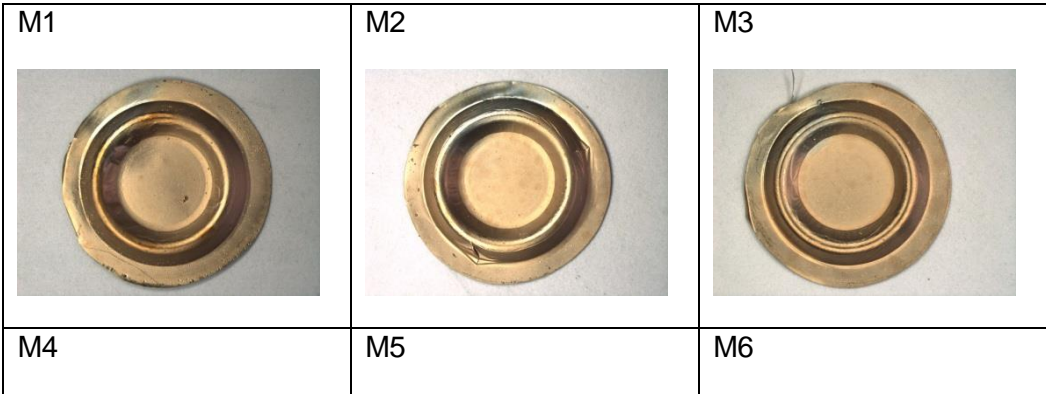
Auch vom PMMA-Kunststoffträger wurde ein dreidimensionales Oberflächenmodell mittels Konfokalmikroskopie angefertigt, um zu untersuchen, ob die Defekte in den Membranen auf

Fehler im Substrat zurückzuführen sind. Dies konnte ausgeschlossen werden, da die mittige Fläche des Trägers keine Erhebungen aufweist. Von den Miralloy-Membranen, die auf den PMMA-Trägern abgeschieden wurden, wurden keine mikroskopischen Aufnahmen angefertigt, da alle Membranen deutlich sichtbare Defekte aufgewiesen haben.

**Miralloy-Abscheidungen auf thermogeformten COP-Kunststoffsubstraten**

Die thermogeformten COP-Kunststoffträger wurden vom Hahn-Schickard-Institut in Villingen-Schwenningen gefertigt. Als Metallisierung auf den COP-Trägern wurden zwei PVD-Schichtsystemen getestet: zum einen eine direkt auf der COP-Folie aufgebrachte Cu-PVD-Metallisierung, zum anderen eine Startschicht aus Titan als Haftvermittler mit einer darüber aufgebrachten Cu-PVD-Schicht. Zusätzlich wurden beide Möglichkeiten zur elektrischen Kontaktierung getestet (Metallstreifen, flächiges Cu-Lochblech). Auffallend war, dass die Membranen von mit Ti+Cu PVD metallisierten Trägern viele Risse, Falten und Abhebungen aufwiesen. Die Defekte auf den Membranen waren derart ausgeprägt, dass diese Metallisierungsmethode nicht weiterverfolgt wurde. Cu-PVD metallisierte Träger wurden mit Metallstreifen und flächigem Cu-Lochblech als elektrische Kontaktierung getestet. Die Proben der Abscheidung mit dem Metallstreifen zeigten häufiger Abhebungen der mittleren Fläche sowie Falten auf dem Erhebungsring im Vergleich zu Proben, die mit einem flächigen Cu-Lochblech als Kontaktierung hergestellt wurden.

Zwar waren auch die Proben mit flächiger elektrischer Kontaktierung nicht frei von Defekten, jedoch war die Anzahl an Abhebungen und Falten geringer. Da diese Membranen den optisch besten Eindruck aufwiesen, wurden die Kanten der Membranen als Vorbereitung auf den Einbau in einen Drucksensor rund geschliffen.



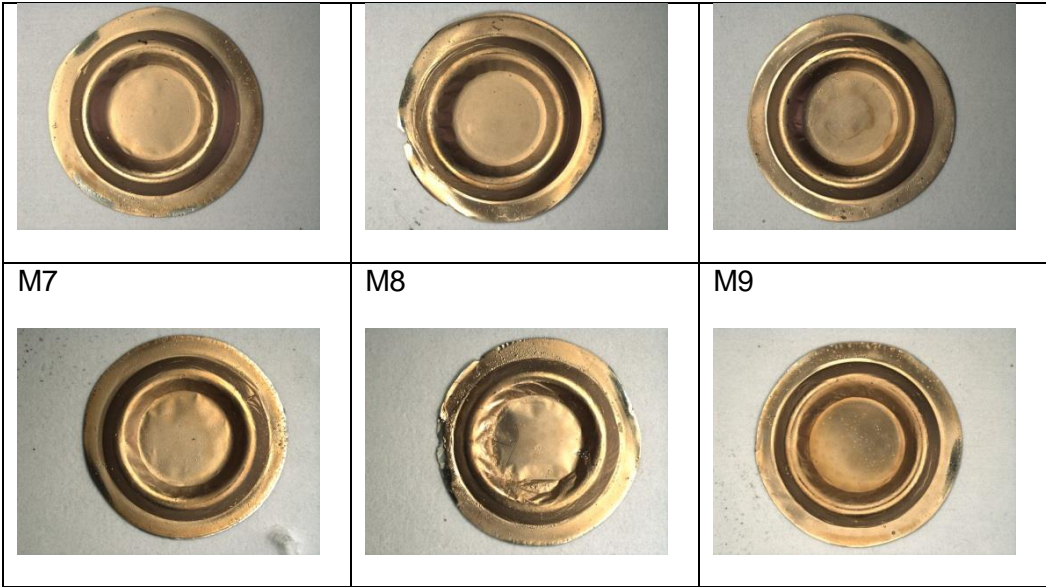
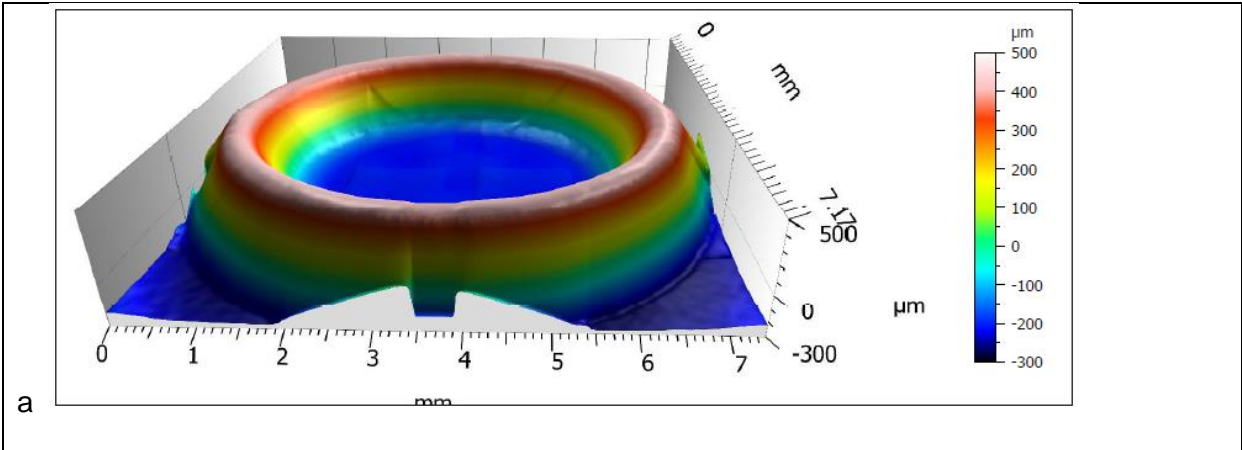


Abbildung 55: Galvanisch hergestellte Membranen: Abscheidung von Miralloy auf thermogeformtem COP-Kunststoffträger mit 500 nm Cu-PVD-Metallisierung und einer gelochten Edelstahlfolie als Kontaktierung, Membranen #1-9

Sowohl von den COP-Kunststoffträgern (mit der PVD-Metallisierung) als auch von Membranen nach Abscheidung auf den COP-Kunststoffträgern wurden dreidimensionale Oberflächendarstellungen mittels Konfokalmikroskopie aufgenommen. Mit dieser Substratvariante konnten die insgesamt besten Membranen hergestellt werden, mit weniger und geringer ausgeprägten Abhebungen der mittigen Fläche als beispielsweise bei den Miralloy-Membranen auf den DLP-Substraten (optisch die nächstbesten Membranen).



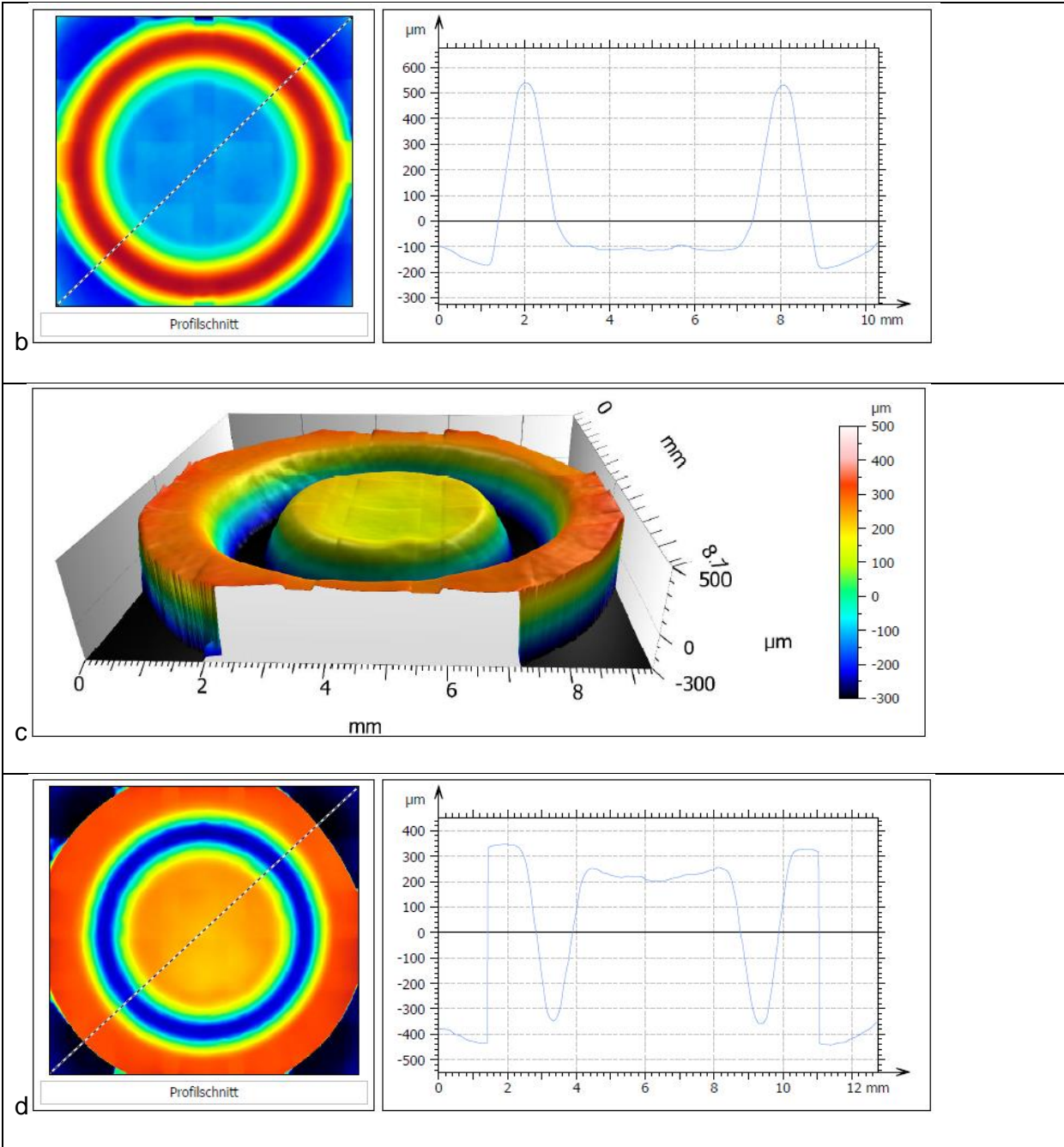


Abbildung 56: a) Konfokalmikroskop-Aufnahme eines Cu-PVD metallisierten COP-Kunststoffträgers b) Höhenprofil des Kunststoffträgers im Querschnitt c) Konfokal-mikroskop-Aufnahme einer Miralloy-Bronze-Membran abgeschieden auf einem metallisierten COP-Kunststoffträger d) Höhenprofil der Miralloy-Bronze-Membran im Querschnitt



### Miralloy-Abscheidungen auf Edelstahlsubstraten

Drucksensoren aus Miralloy-Bronze können auch auf Edelstahlsubstraten abgeschieden werden. Neun tiefgezogene Edelstahlträger mit dem gewünschten Oberflächenrelief wurden in einem 3x3-Array auf PMMA platziert (entsprechend einem Kunststoffsubstrat ohne Metallisierungsschicht). Ein Edelstahl-Kontaktblech wurde als Blende und gleichzeitig als elektrische Kontaktierung eingesetzt. Die Blende presst die neun Edelstahl-Träger auf das PMMA-Substrat, so dass die Träger während der Abscheidung fixiert werden. Damit ist eine gute elektrische Kontaktierung zur Stromquelle gewährleistet. Um keine unerwünschte Abscheidung auf der Blendenoberseite zu erhalten, wurde diese mit einem Abdecklack (SLOTOWAX) abgedeckt.

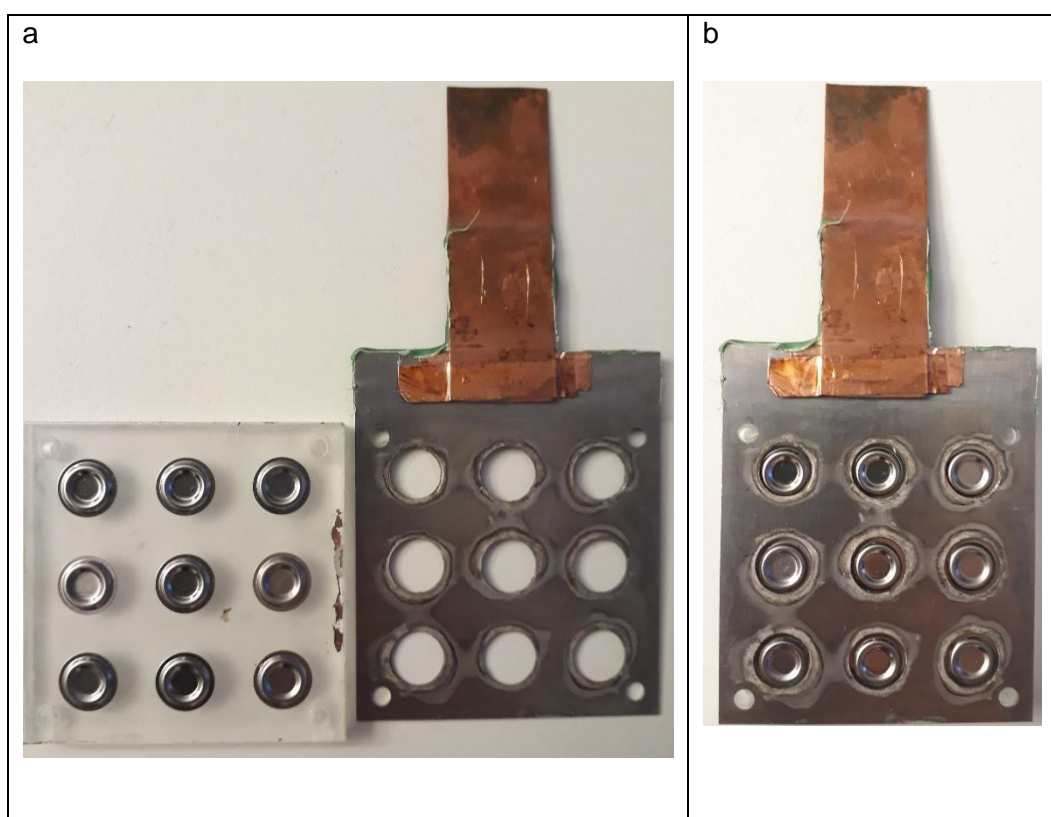


Abbildung 57: a) PMMA-Substrat mit 3x3 tiefgezogenen Edelstahlträgern (links) und Edelstahlblende/Kontaktierung (rechts) b) fertig montierter Edelstahlträger (Blende wird anschließend noch lackiert)

Die Vorbehandlungsschritte für die Abscheidung auf Edelstahl sind in Tabelle 1 beschrieben. Im ersten Schritt wurde der Edelstahlträger entfettet, danach erfolgte die zweistufige Aktivierung des Edelstahls [(HCl 1:1 + CuCl<sub>2</sub> 2 g/l) für 15 Sekunden und anschließender galvanischer Kupfer-Abscheidung aus dieser Lösung für 15 Sekunden (T = RT, i = 1,25 A/dm<sup>2</sup>)]. Nach der Abscheidung wurden die Membranen mit einem Skalpell von den tiefgezogenen Edelstahlträgern

abgehoben, wobei es am Hebelpunkt teilweise zu mechanischen Verletzungen des Membranrandes kam.

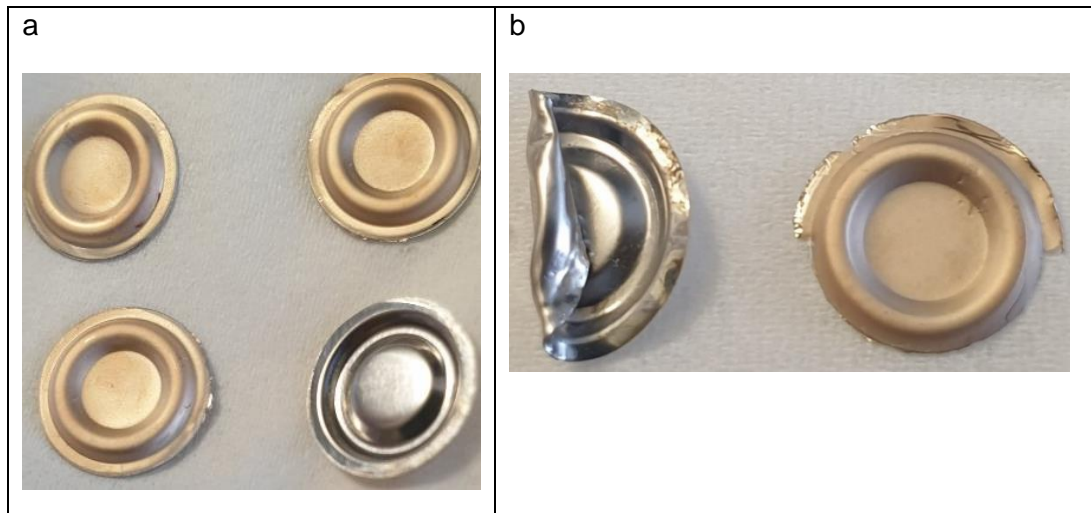


Abbildung 58: Miralloy-Bronze-Membranen, abgeschieden auf tiefgezogenen Edelstahlträgern a) blasenfreie Miralloy-Membranen b) Verletzungen der Membranen am Hebelpunkt durch das Entfernen

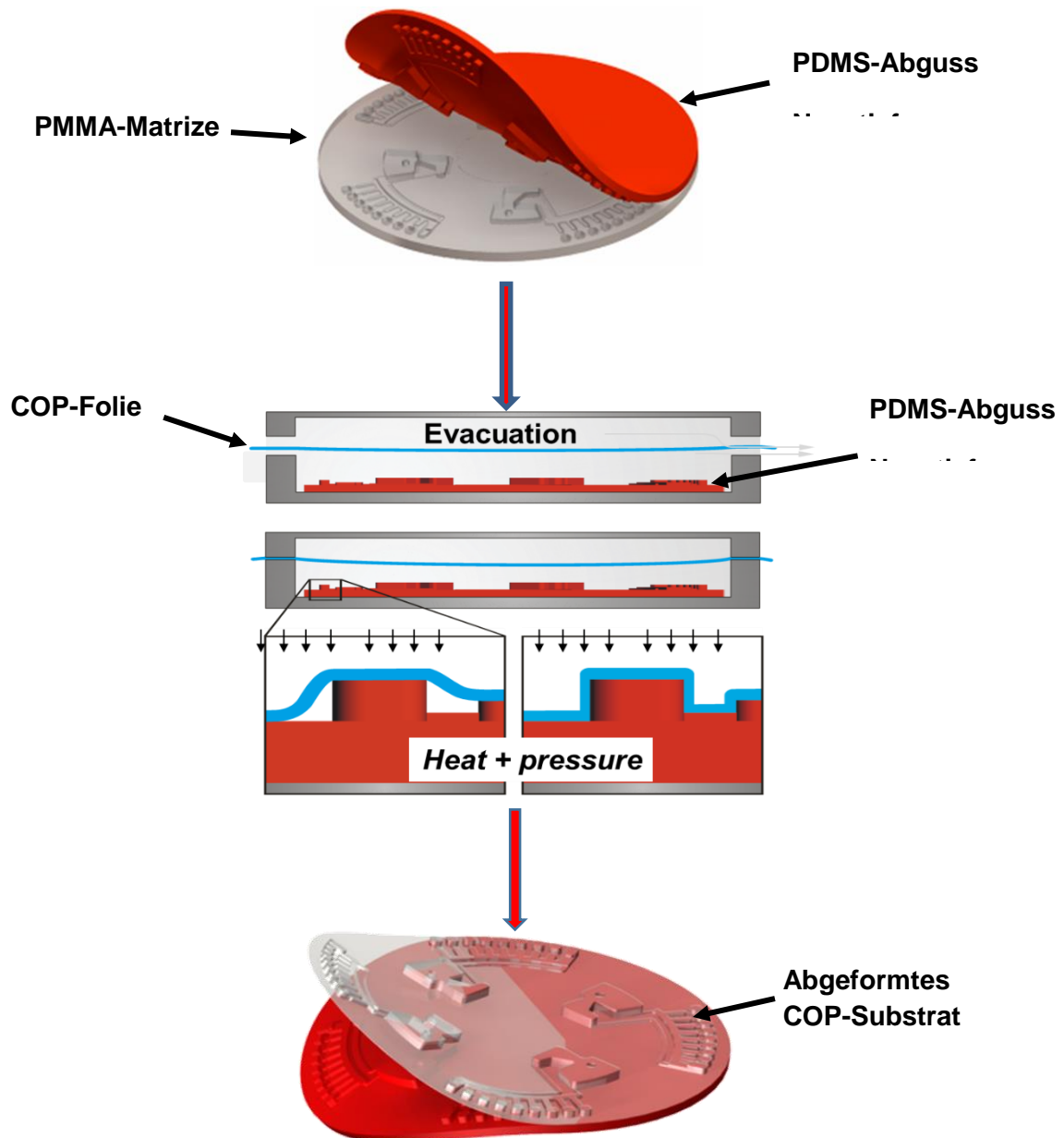
Um die Fertigung der Drucksensormembranen in guter Qualität und größerer Stückzahl durchführen zu können, erscheint die Abscheidung auf Edelstrahlträgern am vielversprechendsten. Die Verwendung von tiefgezogenen, biegbaren, dünnen Edelstahlblechen als Träger wäre nach entsprechender Aktivierung des Edelstahls und unter Verwendung einer geeigneten Blende realisierbar. Auf der Größe eines DIN-A4-Blattes könnten etwa 150 Drucksensormembranen simultan abgeschieden werden und danach durch Biegen des dünnen Blechs (ohne mechanische Hilfsmittel) vom Träger entfernt werden. Derartige Edelstahlträger wären langlebig und oft wiederverwendbar. Auf diese Art und Weise wäre eine industrielle Produktion von Drucksensormembranen gut vorstellbar, wobei für die Umsetzung noch weitere Vorversuche angeschlossen werden müssten.

### Inhalte HS-VS:

Für die Abscheidung der galvanisch hergestellten Drucksensormembranen sollte ein strukturiertes Kunststoffsubstrat, mit dem bei HS-VS verfügbaren Multi Jet Modeling Drucker (MJM) ProJet MJP 3600 Max hergestellt werden. Das Verfahren stellte sich aber aufgrund der druckbaren Auflösung in z-Richtung als ungeeignet heraus. Stattdessen wurde das Verfahren des Mikrothermoformens untersucht und angewendet.

Beim Prozess des Mikrothermoformens (Abbildung 59) wird durch Mikropräzisionsfräsen eine Matrize aus PMMA hergestellt, die dieselbe Geometrie wie das Endprodukt aufweisen muss.

Anschließend wird die Negativform mit PDMS abgegossen die zum Abformen der Folien verwendet wird.



**Abbildung 59: Prozess des Mikrothermoformens mit Herstellung der Matrize am Beispiel einer Lab-on-a-chip-Disc**

Die PDMS-Negativform wird in den unteren Werkzeughalter eingesetzt, und die Abformfolie wird über dem Werkzeughalter platziert. Für unser Vorhaben wird ein cyclischer Olefin-Polymerfilm (COP) verwendet. Anschließend wird die Folie erhitzt und das Setup evakuiert, damit sich zwischen PDMS-Formwerkzeug und COP-Folie keine eingeschlossene Luft mehr befindet. Jetzt wird der obere Werkzeughalter geschlossen, die Folie eingeklemmt und die Kammer oberhalb

der der Folie mit Druck beaufschlagt. Die Folie schmiegt sich an die PDMS-Negativform an. Das Werkzeug wird anschließend abgekühlt und die mikrothermogeformte Folie kann entnommen werden. Dieser Prozess wurde bei HS am Standort Freiburg durchgeführt.

Es wurden 25 Folien hergestellt, siehe Abbildung 60, und an das fem zur galvanischen Abscheidung von Membranen übergeben.

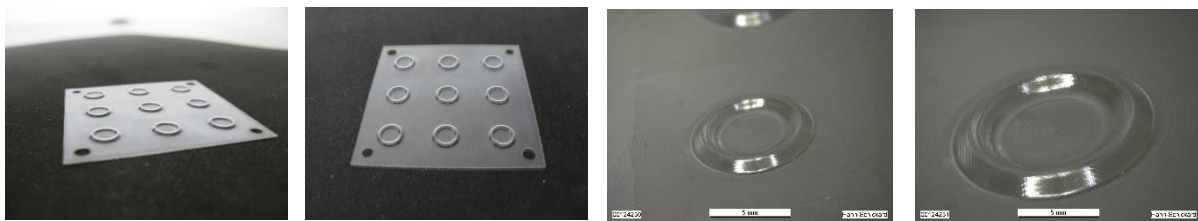


Abbildung 60: Mikrothermogeformte Membranträger für die Galvanik

### Inhalte HS-S:

Duroplast-Substrate und eine passende Blende für den Galvanoforming Prozess wurden konstruiert und anschließend mittels im DLP –Prozess (Digital Light Processing) generativ gefertigt.

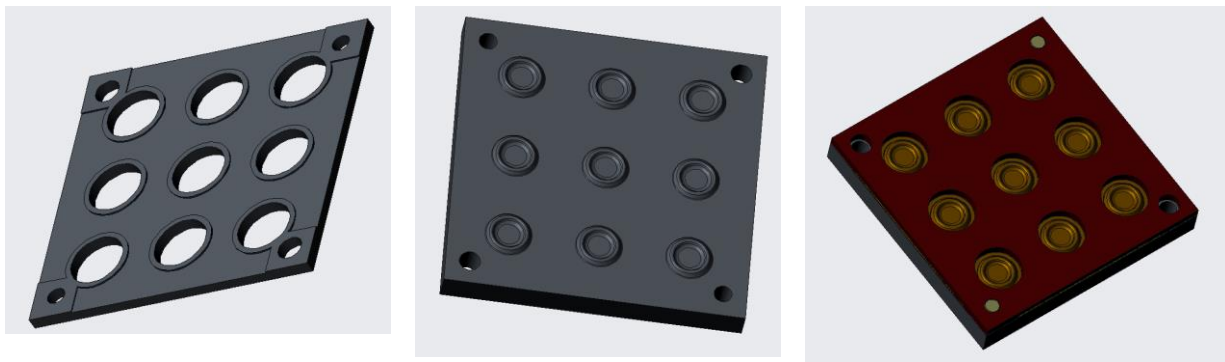


Abbildung 61: Konstruktion der Duroplast Substrate: Blende; Träger; Zusammenbau mit Membranen

Mittels Sputtern wurden unterschiedliche Startschichten für die anschließende galvanische Abscheidung am fem aufgebracht. Die Startschichten hatten dabei einen Einfluss auf die Haftfestigkeit und auf die erzielbaren Genauigkeit der abgeschiedenen Membranen. Dies wird bei den Inhalten fem genauer ausgeführt.

Die mittels Galvanoforming hergestellten Membranen wurden auf ihre Oberflächengenauigkeit untersucht und mit den tiefgezogenen Membranen verglichen.

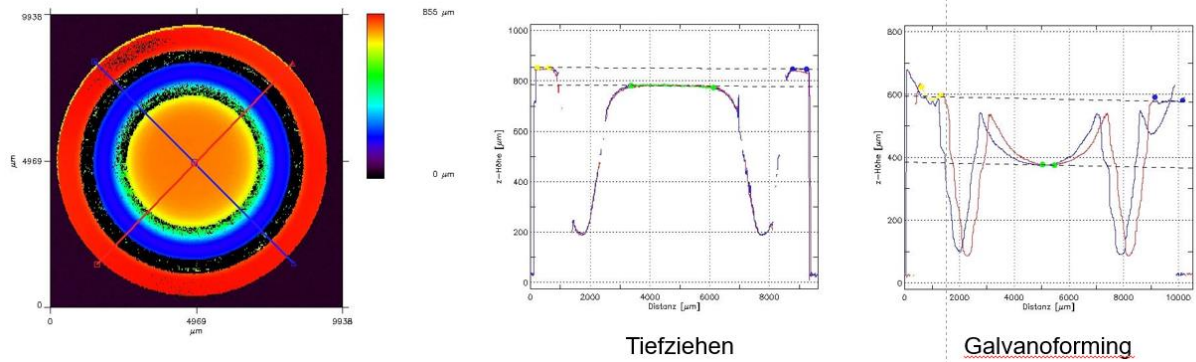


Abbildung 62: Oberflächenprofil einer tiefgezogenen Membran mit Durchmesser 9,2mm verglichen mit einer Galvanoforming-Membran von einem DLP Substrat

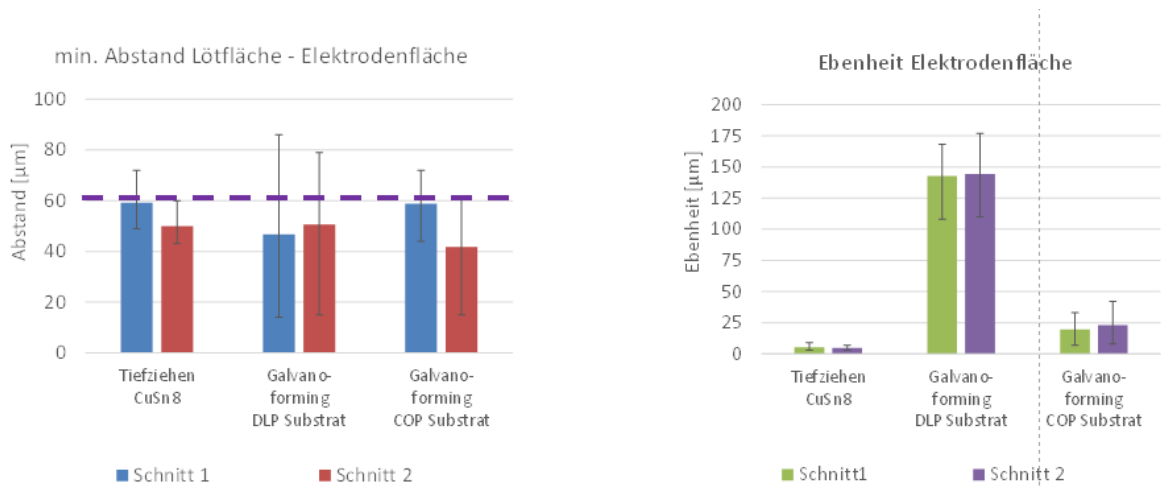
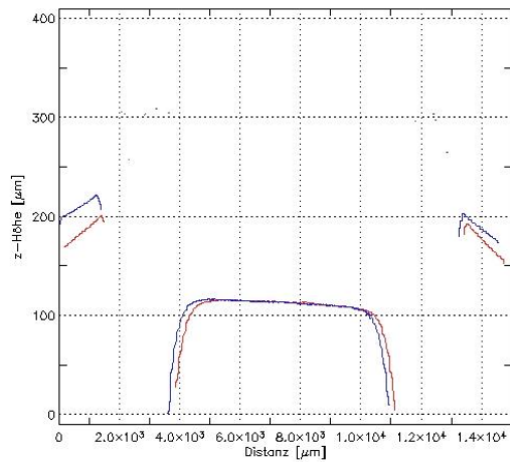


Abbildung 63: Vergleich der Oberflächengenauigkeiten tiefgezogener und mittels Galvanoforming hergestellten Membranen im Durchmesser 9,2mm

Tiefgezogene Membranen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit der Soll-Geometrie bei geringer Exemplarstreuung. Bei den mittels Galvanoforming hergestellten Membranen ist das Substrat entscheidend: Bei den DLP Substraten streut der Abstand Lötfläche – Elektrodenfläche stark und die Ebenheit ist wesentlich schlechter. Membranen von COP Substraten zeigen hingegen eine gute Oberflächengeometrie.



11995 Membran Nr. 1

Edelstahl; Ø 14,7mm; 50µm Dicke			
Membran Nr.	Abstand Rand -> Elektrodenfläche [µm]		
	Schnitt 1	Schnitt 2	Δ
1	97	79	18
2	96	87	9
3	95	83	12
4	89	97	-8
5	79	98	-19
Mittelwert	90		
Sollwert	70		

Edelstahl; Ø 14,7mm; 150µm Dicke			
Membran Nr.	Abstand Rand -> Elektrodenfläche [µm]		
	Schnitt 1	Schnitt 2	Δ
1	97	97	0
2	88	109	-21
3	104	91	13
4	96	97	-1
5	95	98	-3
Mittelwert	97		
Sollwert	85		

Abbildung 64: Charakterisierungsergebnisse von tiefgezogenen Drucksensormembranen mit einem Durchmesser von 14,7mm

Die Charakterisierung von tiefgezogenen Drucksensormembranen mit einem Durchmesser von 14,7mm für Niederdruckeranwendungen ergab ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung mit der Soll-Geometrie. Somit sind keine Probleme in der Fertigung der Drucksensoren zu erwarten.

## 2.7 AP7: Erarbeitung von AVT-Verfahren für das spannungsarme und kriechfeste Fügen von Drucksensormembranen

**Einzelergebnis:** Die Fügeprozesse Reaktives Fügen, TLP Bonden, Silbersintern und Schweißen wurden entwickelt und die Fügeparameter optimiert

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel. Zusätzlich zu den im Antrag beschriebenen Fügeverfahren reaktives Fügen und Widerstandsschweißen, für die Membran wurde Silbersintern und TLP Bonden untersucht. Laserlöten mit hochschmelzenden Loten wurde entgegen dem Antrag nicht untersucht.

**Beschreibung:**

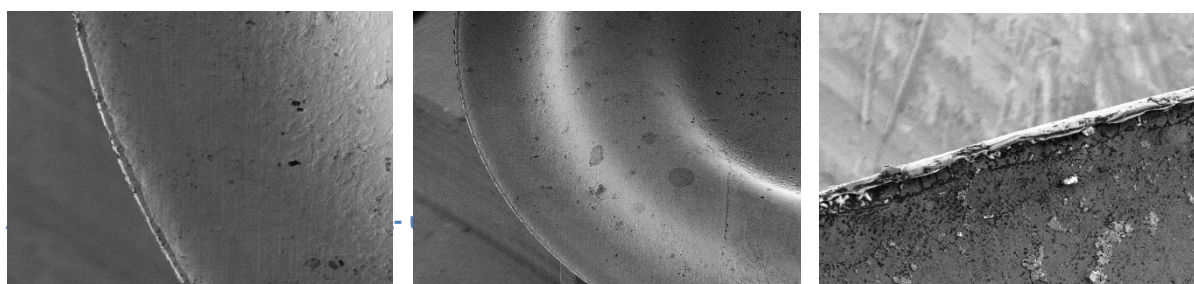
**Inhalte HS-VS:**

### AP7.1: Reaktives Fügen

Die Ergebnisse aus AP4 fließen direkt in AP7 ein.

Um die Membranen reaktiv mit den Leiterplatten verbinden zu können, müssen vorbereitende Maßnahmen getroffen werden.

**Vorbereiten der Membranen:** Die Membranen aus  $\text{CuSn}_8$  müssen vor dem reaktiven Fügeprozess mit Schleifpapier leicht angeschliffen werden, um einerseits die an Sauerstoff ausgebildete Oxidschicht und andererseits den störenden Stanzgrat am Rand zu entfernen, siehe Abbildung 65. Auf die Membranen aus Edelstahl muss nach dem Abschleifen des Stanzgrates noch eine zusätzliche lötfähige Schicht aus Ni und Au durch Sputtern aufgebracht werden.



**Vorbereiten der Reaktivfolie:** Die RMS wurde analog zu AP4 mit dem Beschriftungslaser in passende Preforms geschnitten.

**Reaktive Fügeprozesstechnik:** Es wurde dieselbe Fügeprozesstechnik wie in Abbildung 32 verwendet. Abbildung 66 zeigt die zum reaktiven Fügen verwendeten Einzelkomponenten.

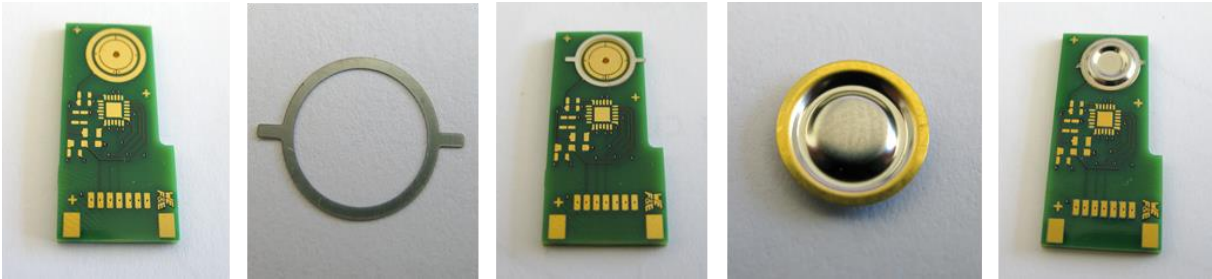


Abbildung 66: Einzelkomponenten zum reaktiven Fügen. Von links nach rechts: Leiterplatte, RMS-Preform, Leiterplatte mit RMS, beschichtete Edelstahlmembran, Membran und RMS auf Leiterplatte positioniert.

Durch die Vorversuche und Analysen, insbesondere Schliffproben, konnte ein stabiler Prozess zum reaktiven Fügen der Membranen auf die Leiterplatte erarbeitet werden. Abbildung 67 zeigt die Bereiche der Schliffproben, bzgl. der Qualität der Fügeverbindung, die für die Analysen und schlussendlich zur Erarbeitung des Fügeprozesses besonders interessant waren.

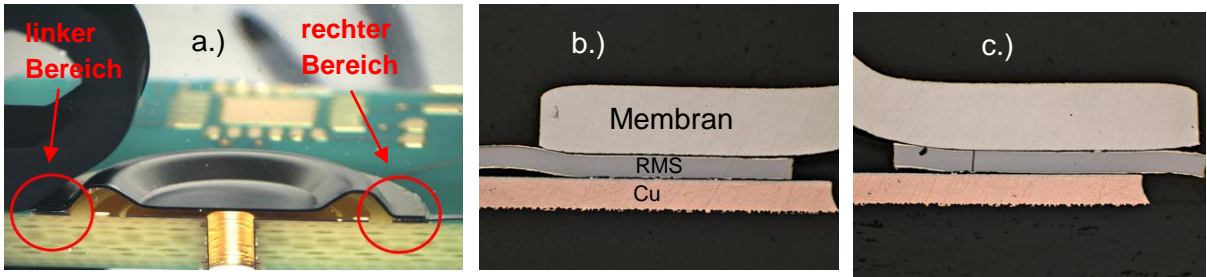


Abbildung 67: a.) Beide Bereiche des Querschliffes die analysiert werden, b.) linker Fügebereich, c.) rechter Fügebereich

Abbildung 68 zeigt exemplarisch zwei Schliffproben anhand solcher die Prozessparameter optimiert werden konnten.

Wie in Abbildung 68 a.) und b.) sichtbar, konnten die beiden Fügepartner bei den ersten Versuchen aufgrund von zu geringen Anpresskräften von 70 N nicht miteinander verbunden werden. Durch Erhöhung der Anpresskraft auf 90 N konnte ein stabiler Fügeprozess etabliert werden. Abbildung 68 c.) und d.)

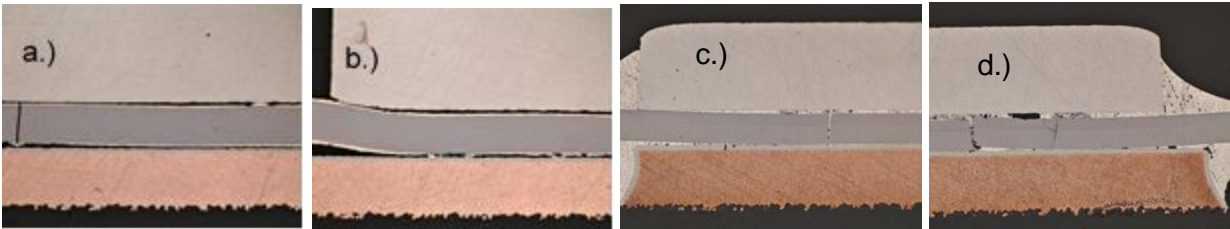


Abbildung 68: Querschliffanalyse zur Anpassung der Prozessparameter



## AP7.2: TLP-Bonden

Beim TLP-Bonden wird durch Diffusion aus einer niedrig- und einer hochschmelzenden Phase eine mechanisch feste und temperaturbeständige intermetallische Phase gebildet. Der Fügeprozess wird bei einer Temperatur geführt, die über der Schmelztemperatur der niedrigschmelzenden Komponente liegt. Am Beispiel der beiden Systeme Ag-Sn und Cu-Sn, die im Rahmen dieses Vorhabens eingesetzt wurden, wird aus den entsprechenden Phasendiagrammen (Abbildung 69) erkennbar, dass sich bereits bei einer Prozesstemperatur oberhalb des Schmelzpunkts von Sn (232 °C) in Kontakt mit festem Ag bzw. Cu die hochschmelzenden Legierungen  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  und  $\text{Ag}_{85}\text{Sn}_{15}$ , bzw.  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  und  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  bilden. Sobald das flüssige Zinn vollständig aufgebraucht ist, liegen nur noch hochschmelzende feste Phasen vor. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Prozesstemperaturen ist somit der in den gefügten Bauteilen auftretende thermo-mechanische Stress reduziert.

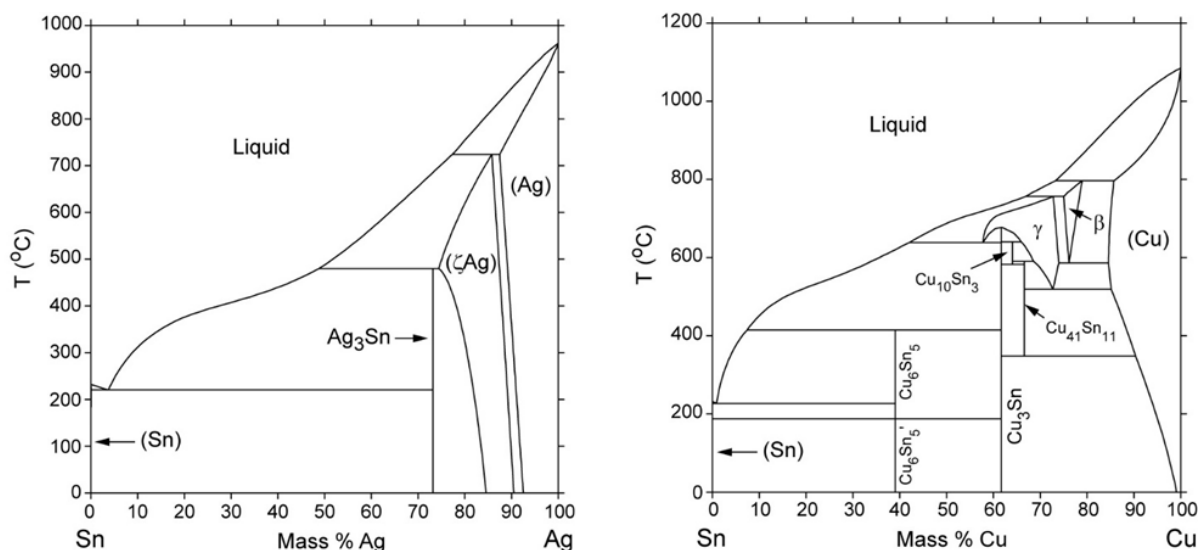


Abbildung 69: Phasendiagramme des Ag-Sn und des Cu-Sn-Systems [PhasAgSn, PhasCuSn].

Die TLP-Bondprozesse werden in einer evakuierbaren Kammer durchgeführt, in der sich zwei temperaturgeregelte Heizplatten befinden, zwischen die die zu verbindenden Bauteile eingebracht und zusammengepresst werden (Abbildung 70). Die Vakuumkammer dient dazu, störende Oxidbildung in der flüssigen Zinnphase zu vermeiden. Zur Positionierung der Membranen und der Leiterplatten sowie zur gleichmäßigen Kräfteinleitung am Membranrand dient ein Probenhalter aus Aluminium. Bis zu vier Membran-Leiterplatten-Paare können somit simultan in einem Prozessdurchlauf gebondet werden.

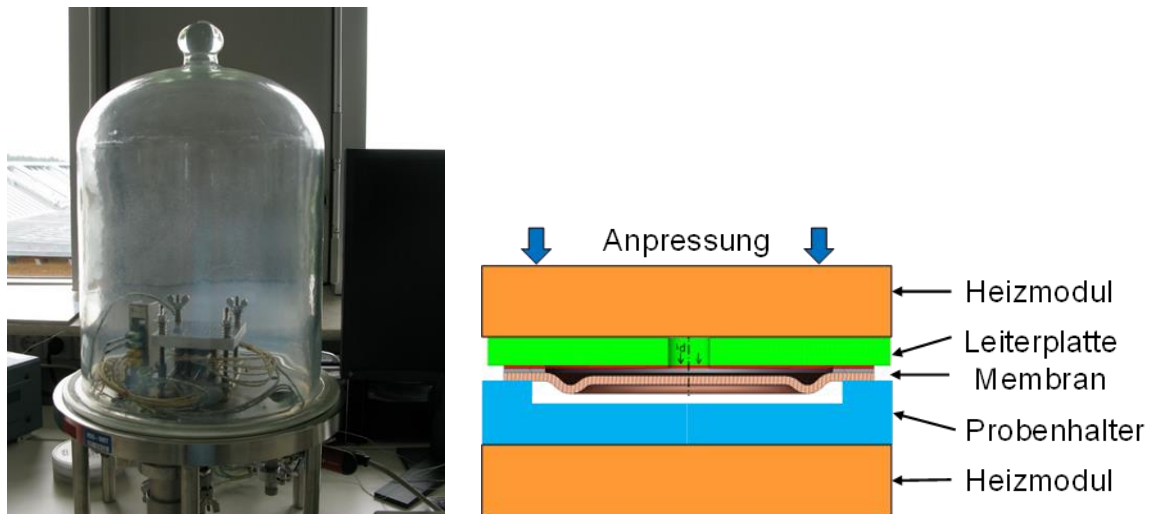


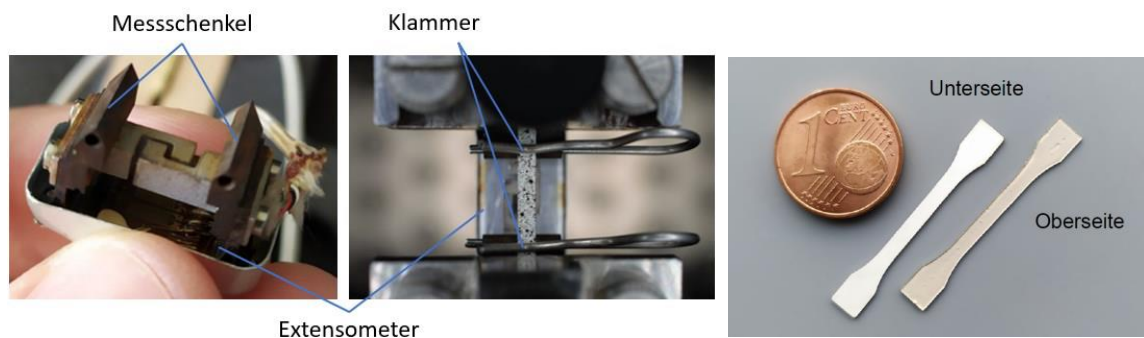
Abbildung 70: Ansicht der Vakuumkammer zum TLP-Bonden (links), sowie schematische Anordnung (rechts).

### Inhalte HS-S:

Im Rahmen von SkalaD wurde **druckfreies Silbersintern** als Alternative zum Weichlöten getestet. Ein großer Unterschied zum Weichlöten ist, dass beim Silbersintern das Fügmaterial nicht aufgeschmolzen werden muss. Stattdessen bilden Diffusionsprozesse durch Wärme eine intermetallische Phase zwischen den Fügepartnern. So liegen die theoretisch maximale Einsatztemperatur beim Silbersintern deutlich höher als beim Weichlöten und das bei ähnlichen Prozesstemperaturen. In der Fügeverbindung setzt dadurch das Kriechen theoretisch erst bei höheren Temperaturen ein. Es wurde iterativ vorgegangen mit dem Ziel eine durchgängige intermetallische Phase zu erzielen:

1. Optimierung der Reinigung
2. Vortrocknen
3. Prozessparameter-Optimierung
4. Beschichtung

Die Versuche wurden durch Simulationen unterstützt. Dafür wurden Materialdaten der verwendeten Silbersinterpaste aus Zugversuchen mit Probekörpern angelehnt an DIN EN ISO 527 gewonnen.



**Abbildung 71: Zugversuche mit Extensometer für die Materialdatengewinnung für Silbersintermaterial, Zugstäbe aus Silbersintermaterial**

Als Transferverfahren für die Verbindungsmedien wurde der Schablonendruck verwendet. Es wurden unterschiedliche Schablonenlayouts getestet. Die Bestückung der Membranen erfolgte zunächst bei einer Variation der Anpresskraft um die gewünschten Zielschichtdicken einzustellen.

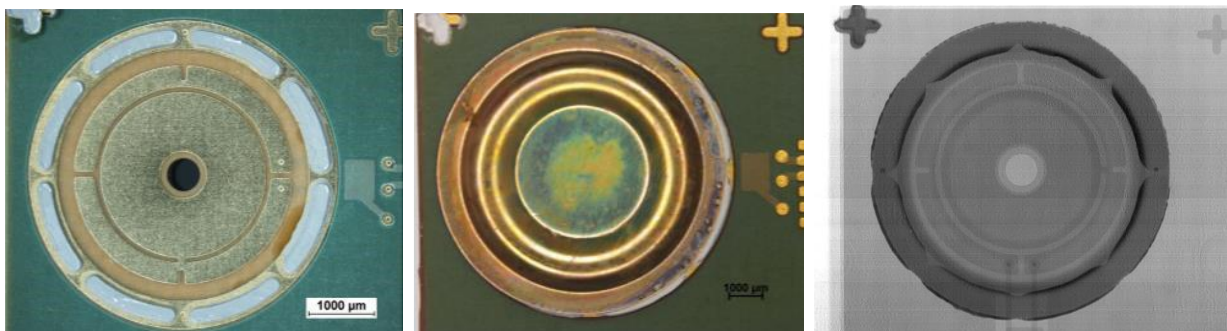


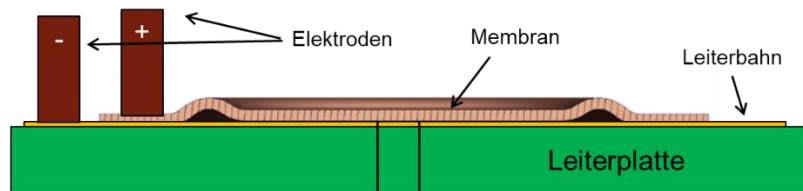
Bild: Links: Gleichmäßige Verteilung der Sinterpaste nach Rakeln, Mitte: Aufgesetzte Membran mit manuellen Präzisionsbestücker, Rechts: Röntgenbild nach dem Sintervorgang

Der Silbersinterprozess setzt saubere Oberflächen voraus. Im Rahmen der Vorbehandlung wurden deshalb unterschiedliche Reinigungsschritte durchgeführt. Die verwendeten druckfreien Pasten haben einen erhöhten Anteil an flüchtigen Materialien. Dadurch können im Sinterprozess Entlüftungskanälen entstehen. Um dies zu vermeiden wurden die Prozessparameter angepasst und Rampen gefahren.

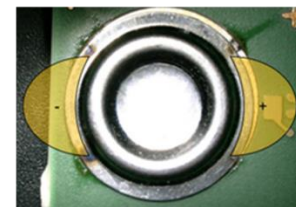
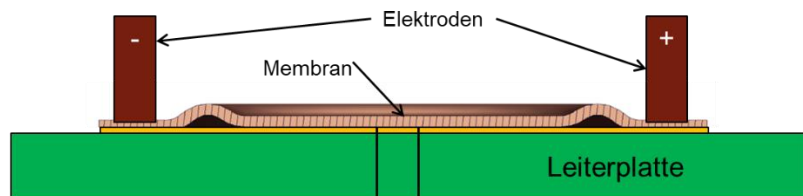
Ein weiteres Verfahren, welches im Rahmen von SkalaD untersucht wurde, ist das **Widerstandsschweißen**. Beim Widerstandsschweißen entsteht im Kontaktwiderstand der Verbindungsstelle Wärme durch Stromfluss. Da der Kontaktwiderstand anfangs höher ist als der Materialwiderstand können die Verbindungsstellen gezielt miteinander verschweißt werden. Es gibt beim Widerstandsschweißen einige Elektrodenkonfigurationen von denen im Projekt u.a.

eine Sertienschweiung mit weiter Spaltbreite und eine Stufenschweiung durchgefhrt wurden (s. Bilder unten).

Stufenschweien



Spaltschweien mit weiter Spaltbreite



Die Leiterplattenlayouts wurden dabei gezielt an die Anforderungen des Widerstandsschweiens angepasst und auch der Einfluss von Vias gezeigt. Im Projekt konnte die generelle Machbarkeit des Widerstandsschweiens mit Membranen und leiterplattenbasierten Schaltungsträgern gezeigt werden. Dies geschah u.a. anhand von Schertests und metallografischen Untersuchungen.

## 2.8 AP8: Aufbau von Drucksensoren mit tiefgezogener Sensor- membran

**Einzelergbnis:** Drucksensorgehäuse, Drucksensorplatinen, Drucksensordemonstratoren

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte HS-VS:**

### AP8.1: Reaktives Fügen

Es wurden 30 CuSn<sub>8</sub> Membranen und 30 Edelstahl 1.4435 Membranen mit RMS von IWS auf HELP H Leiterplatten reaktiv gefügt. Jeweils 10 CuSn<sub>8</sub> und Edelstahl 1.4435 Membranen mit RMS der Firma Indium Corp. (ältere Folie) wurden auf HELP H Leiterplatten reaktiv gefügt. Mit einer neu beschafften RMS-Folie der Firma Indium Corp. wurden weitere 5 Edelstahl-Membranen auf Leiterplatten gefügt.

Tabelle 2-11: Varianten der verschiedenen RMS-Folien für die Sensoraufbauten

Variante	IWS	Indium Corp. ältere Folie	IWS	Indium Corp. ältere Folie	Indium Corp. neue Folie
PCB	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H
Membran	CuSn8	CuSn8	1.4435	1.4435	1.4435
Anzahl gefügter Proben	30	10	30	10	5

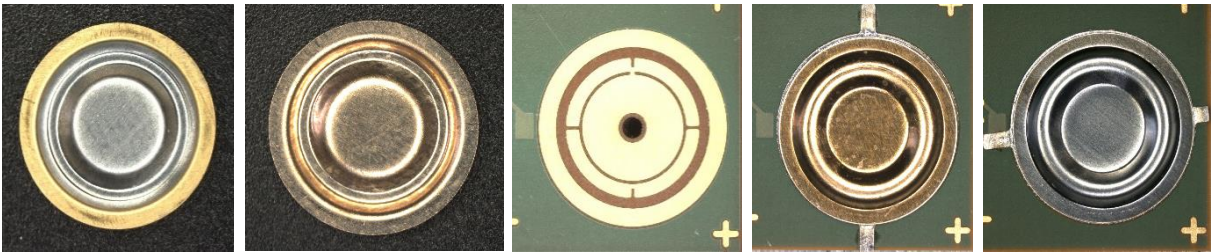


Abbildung 72: Von Links: Edelstahlmembran mit lötbare Ni/Au-Schicht, CuSn8-Membran, Leiterplatte, CuSn8-Membran auf Leiterplatte gefügt, Edelstahlmembran auf Leiterplatte gefügt.

Abbildung 72 zeigt exemplarisch die verschiedenen Membrane sowie die Leiterplatte vor und nach dem Fügeprozess.

## AP8.2: TLP-Bonden

Tabelle 2-12 zeigt die unterschiedlichen Varianten, die zum Aufbau der Drucksensoren durch TLP-Bonden eingesetzt wurden. Die zusätzlichen Ag- und Sn-Schichten wurden durch galvanische Abscheidung hergestellt.

Tabelle 2-12: Übersicht der Varianten zum Aufbau der Drucksensoren durch TLP-Bonden.

Variante Nr.	PCB	Membran	Ziellegierungen	Anzahl Aufbauten
1	HELP H	CuSn8 + 4 µm Ag + 2 µm Sn	Ag3Sn	4
2	HELP H + 2,5 µm Sn	CuSn8	Cu6Sn5 Cu3Sn	4
3	HELP H + 5 µm Sn	CuSn8	Cu6Sn5 Cu3Sn	4
4	HELP H + 10 µm Ag + 2,5 µm Sn	CuSn8	Cu6Sn5 Cu3Sn Ag3Sn	3
5	HELP H	CuSn8 + 5 µm Sn	Cu6Sn5 Cu3Sn	4
6	HELP H	CuSn8 + 10 µm Ag + 5 µm Sn	Cu6Sn5 Cu3Sn	4

Abbildung 73 zeigt beispielhaft zwei HELP H Leiterplatten im Probenhalter nach dem TLP-Bondprozess. Die gefügten Membranen befinden sich auf der Unterseite und sind daher nicht sichtbar. Die verwendeten Prozessparameter sind ebenfalls aufgelistet. In Abbildung 74 ist der Teilbereich der Leiterplatte, wo die Membran aufgebracht wird, vor und nach dem Fügeprozess dargestellt.

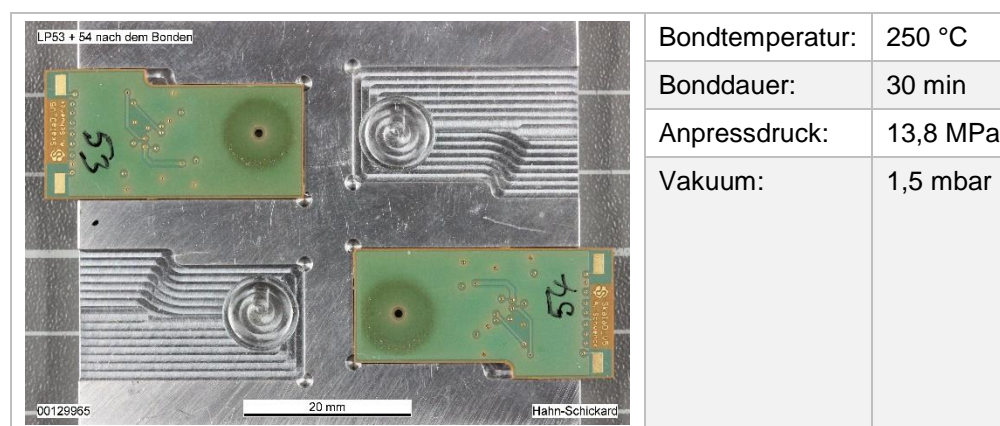


Abbildung 73: Zwei HELP H Leiterplatten im Probenhalter, nach dem TLP-Bondprozess, sowie die eingesetzten Prozessparameter.

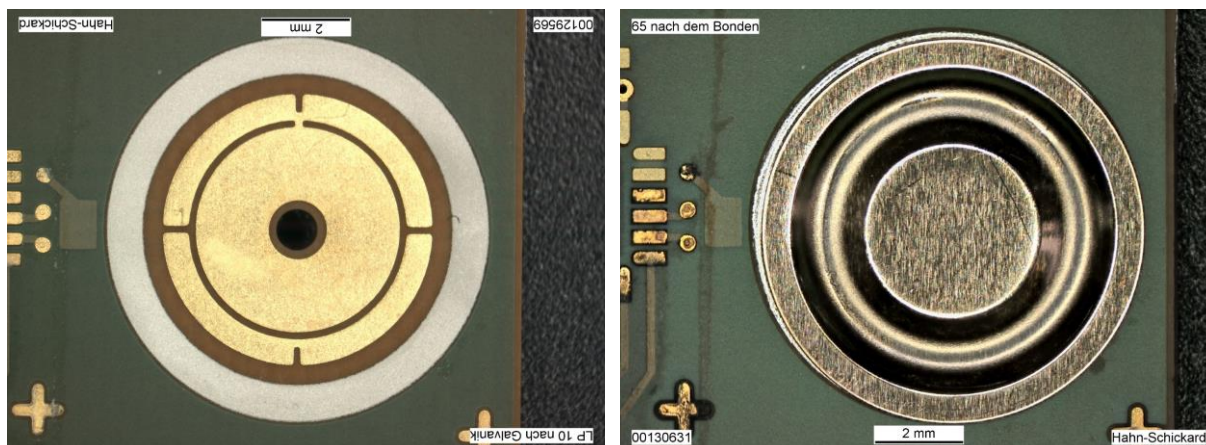


Abbildung 74: Teilansicht der Leiterplatte HELP H mit galvanisch abgeschiedener Ag-Sn-Schicht (links) und nach dem TLP-Bondprozess einer CuSn8-Membran (rechts).

## Inhalte HS-S:

### Gehäusekonstruktion und -fertigung

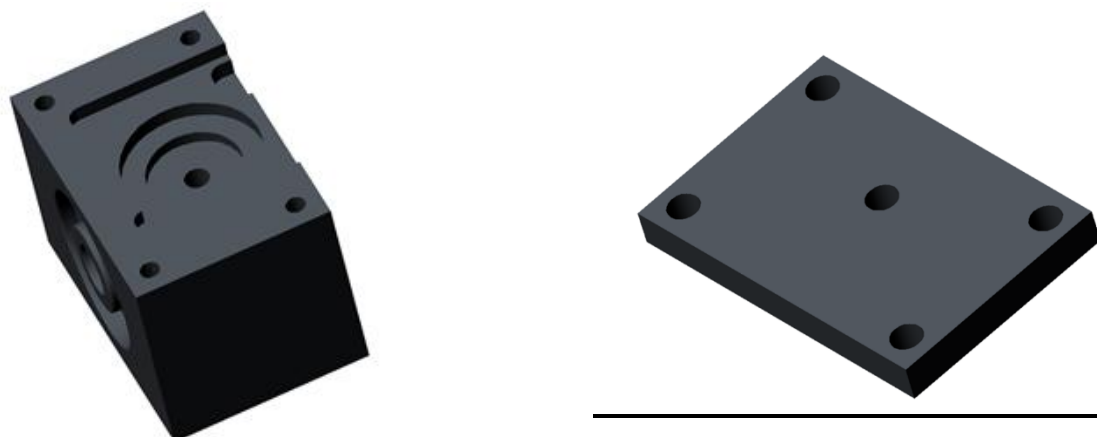


Abbildung 75: Gehäusekomponenten

Für den Drucksensor wurde ein Gehäuse- und Abdichtkonzept erarbeitet. Dabei wurde auf eine Abdichtung der Membran direkt gegen das Gehäuse geachtet, ohne Medienkontakt mit dem PCB. So kommen nur das Gehäuse, die Membran und der O-Ring in Kontakt mit dem Medium. Für Standardanwendungen kann ein Alugehäuse verwendet werden. Bei höheren Anforderungen an die Korrosionsfestigkeit kommt ein Edelstahlgehäuse und eine Edelstahlmembran zum Einsatz. Das Material der O-Ring Dichtung wird dabei im Hinblick auf die

Medienbeständigkeit ausgewählt. Im Vorgängerprojekt wurde bereits ein Duroplast- Spritzgussgehäuse entwickelt, welches auch mit dem hier vorliegenden Drucksensor kompatibel ist. Es wurde eine ausreichende Anzahl an Drucksensorgehäusen für die Charakterisierungen und die Aufbauten von Demonstratoren gefertigt.

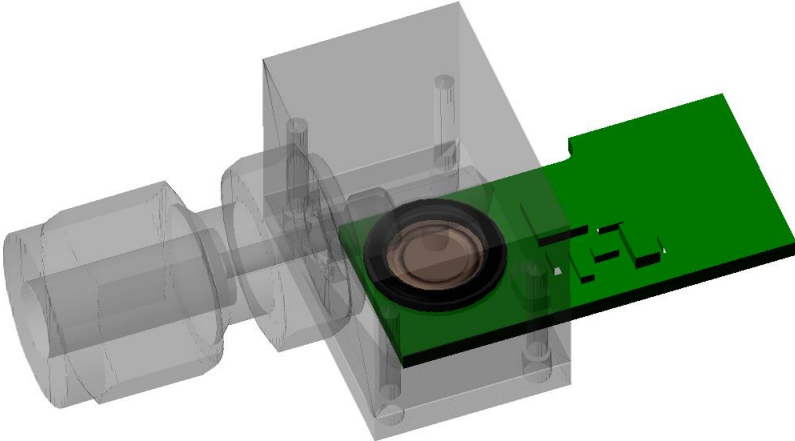


Abbildung 76: Drucksensor mit Gehäuse

**Elektrische Konzeption und Aufbau der Sensoren**

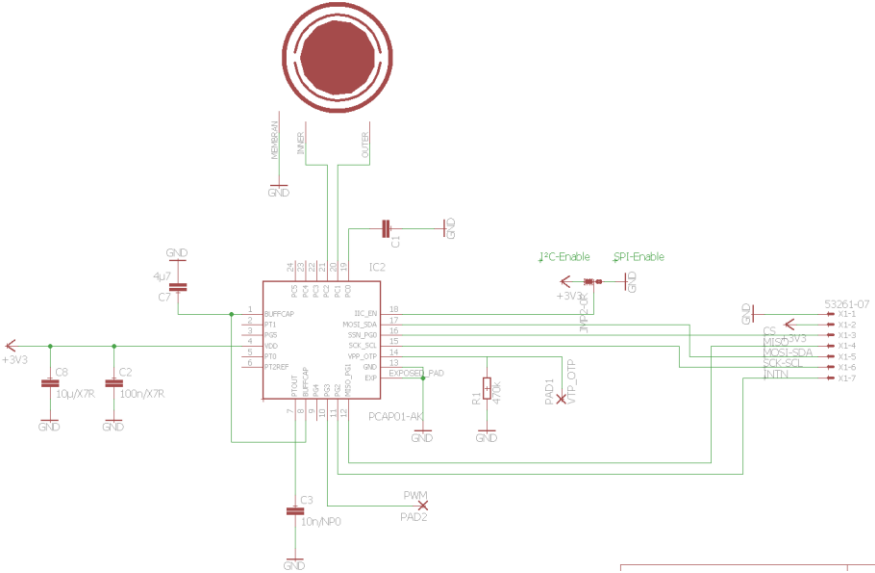


Abbildung 77: Schaltplan Drucksensor mit Elektronik PCap01



Die Auswerteschaltung für den Drucksensor wurde konzipiert, das PCB Layout erstellt und die Leiterplatten bei der Firma Schweizer Elektronik beschafft. Die Beratungen zum Layout und der Auswahl des Leiterplattenmaterials sowie teilweise die Fertigung der PCBs erfolgte als vorhabensbezogene Dienstleistung der Wirtschaft durch die Firma Schweizer Elektronik.

Nach der Bestückung der Membranen mit den in AP7 erarbeiteten Fügeverfahren erfolgte der finale Aufbau mittels SMD Bestückung der restlichen Schaltungskomponenten der Elektronik.

## **2.9 AP9: Charakterisierung der Drucksensoren**

**Einzelergebnis:** Bericht über die Ergebnisse der Charakterisierung

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte HS-VS:**

### **AP9.1: Reaktives Fügen**

Die Charakterisierung der Fügeverbindung wurde durch Anfertigung von Querschliffen mit anschließender mikroskopischer Analyse durchgeführt. Die erzielten Festigkeiten der Fügeverbindung wurden anhand von Druckversuchen ermittelt.

**Druckfestigkeit der Fügeverbindung:**

Für die Druckversuche diente eine eigenkonstruierte Haltevorrichtung, in welche die Leiterplatte inklusive Membran eingelegt und mit einem Stempel orthogonal zur Fügefläche druckbelastet werden kann. Damit der Stößel eine größere Angriffsfläche zur Krafterleitung auf der Membran bekommt, wurde die Leiterplatte im Bereich innerhalb der ringförmigen Fügefläche mit einem Loch versehen. Der Stößel selbst wurde so gefertigt, dass die Auflagefläche die Negativform der Membran abbildet. Die Kraft wird hiermit nicht punktuell eingeleitet, sondern flächig. Somit war es möglich, die Maximalkraft bis zum Ablösen der Membranen von der Leiterplatte zu ermitteln.

Die Prüfung erfolgte durch die Aufnahme von Kraft-Weg-Kurven mit der Zugprüfeinrichtung „Z010“ der Firma ZwickRoell mit verbautem Traversenwegaufnehmer, sowie ein Kraftaufnehmer der Gassmann Theiss Messtechnik, Serie K (Siehe Abbildung 78).

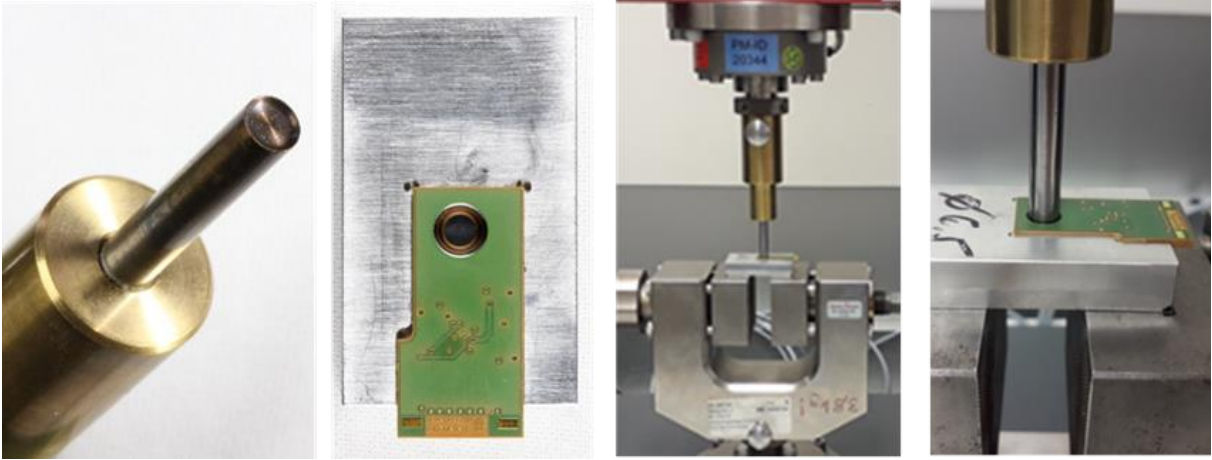


Abbildung 78: Vorrichtung zum Abdrücken der Membranen von der Leiterplatte

Als Prüfparameter wurden folgende Einstellungen für die Druckprüfungen verwendet:  
 Vorkraft: 5N  
 Vorkraft-Geschwindigkeit: 10 mm/min  
 Prüfgeschwindigkeit (nach Erreichen der Vorkraft): 1 mm/min

Tabelle 2-13: Proben die zur Druckprüfung eingesetzt wurden

Variante	IWS	Indium Corp. ältere Folie	IWS	Indium Corp. ältere Folie	Indium Corp. neue Folie
PCB	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H
Membran	CuSn8	CuSn8	1.4435	1.4435	1.4435
Eingesetzte Proben	5	5	5	5	5

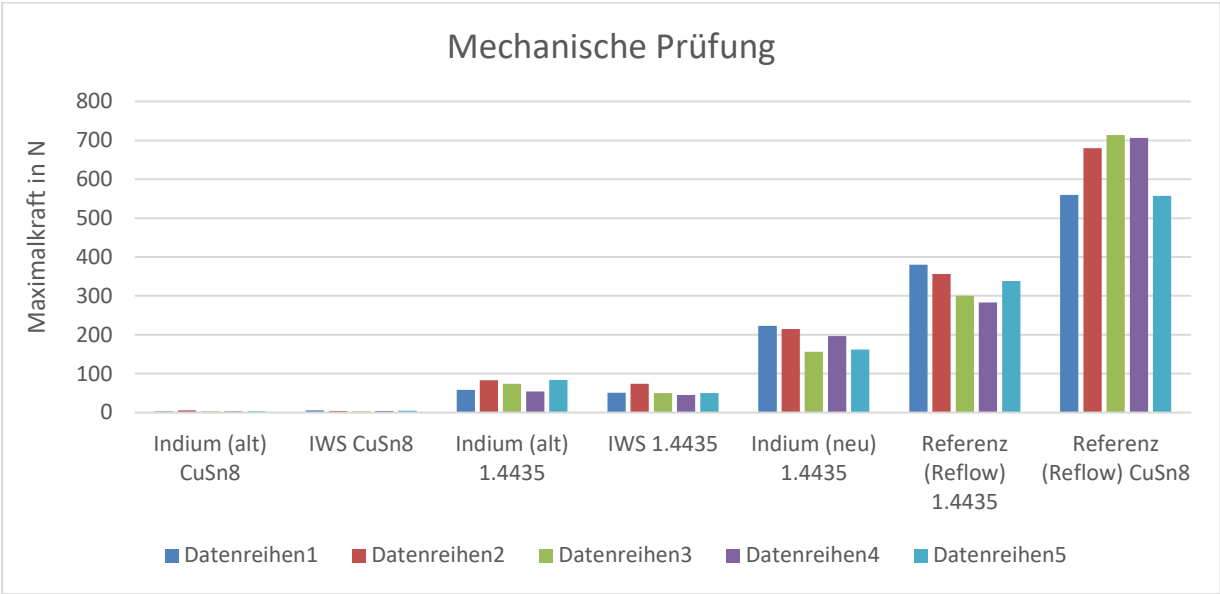


Abbildung 79: Ergebnisse der mechanischen Prüfung

Durch die Druckversuche wurde festgestellt, dass die CuSn<sub>8</sub> Membranen sehr schlecht auf der Leiterplatte anbinden. Der Grund dafür ist, dass durch die gute thermische Leitfähigkeit der Membranen, begünstigt durch den hohen Kupferanteil von 92%, während der Reaktion der RMS-Folie so viel Wärme abgeleitet wird, dass die Temperatur der Membran dann zu gering ist, damit eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Fügepartnern entstehen kann. Siehe Abbildung 80.

Die Edelstahl Membranen 1.4435 wiesen dagegen eine sehr gute Anbindung auf. Ergebnisse sind in Abbildung 81 dargestellt. Nach Auswertung der Ergebnisse der Druckversuche konnte

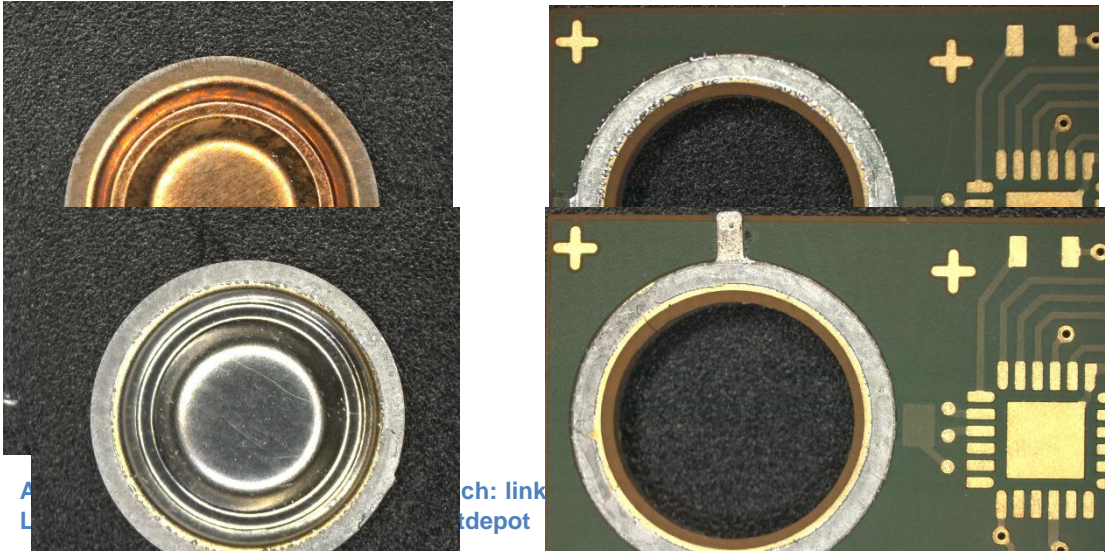


Abbildung 81: Probe nach Druckversuch: links: Edelstahlmembran vollständig mit Lot benetzt, rechts: Leiterplatte mit aufgeschmolzenem Lotdepot, es lag eine stoffschlüssige Verbindung vor

festgestellt werden, dass die Festigkeiten bei durchschnittlich 70 N liegen. Dies entspricht ungefähr 20% der Festigkeiten reflowgelöteten Membranen. Siehe Abbildung 79.

Die Festigkeiten den Proben mit der neu beschafften RMS-Folie von Indium Corp. und Edelstahl Membranen liegen durchschnittlich bei 190 N. Dies entspricht ungefähr 55% der Festigkeiten der reflowgelöteten Membranen. Siehe Abbildung 79.

### Hermetizität

Zur Charakterisierung der Fügeverbindung auf Dichtigkeit wurde ein einfacher Groblecktest durchgeführt. Hierfür wurde mittels des MJM-Druckers ein Schlauchstutzen gefertigt. Anschließend wurde der Schlauchstutzen an die Leiterplatte angeklebt. Die mit Membran bestückte Leiterplatte, angeklebtem Schlauchstutzen und aufgestecktem Schlauch wird in Wasser getaucht, stufenweise mit Druckluft beaufschlagt und auf Luftblasenbildung an der Fügestelle untersucht. Abbildung 82 zeigt die Bauteile und den Versuchsaufbau.

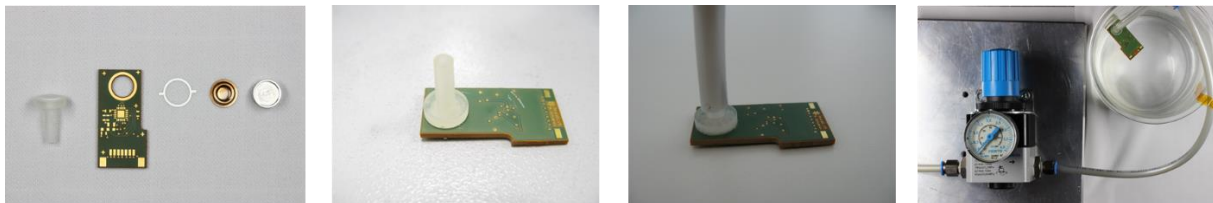


Abbildung 82: Von links beginnend: Reaktives Fügen der Membran auf Leiterplatte, ankleben des Schlauchstutzens, Schlauch auf Schlauchstutzen, Groblecktest in Wasserglas

Tabelle 2-14: Proben die zur Dichtigkeitsprüfung eingesetzt wurden

Variante	IWS	Indium Corp. ältere Folie	IWS	Indium Corp. ältere Folie	Indium Corp. neue Folie
PCB	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H
Membran	CuSn8	CuSn8	1.4435	1.4435	1.4435
Eingesetzte Proben	10	-	10	-	-

Wie aus Tabelle 2-14 ersichtlich wurden jeweils 10 bestückte Leiterplatten mit CuSn<sub>8</sub> Membranen und Edelstahlmembranen mit IWS RMS getestet. Alle Proben waren undicht. Wie bei den Druckfestigkeitsversuchen schon beschrieben, kommt bei den CuSn<sub>8</sub> Proben durch die gute

thermische Leitfähigkeit der Membranen keine stoffschlüssige Verbindung zwischen Fügepartnern zustande.

Die Ursachen der Undichtigkeiten der Edelstahlproben liegen wahrscheinlich im Schwindungsprozess der RMS während der Reaktion. Beim Ni/Al-System ist dieser etwa 12%. In Kombination mit der exothermen Reaktion entstehen während des Fügeprozesses Risse innerhalb der RMS. Das Lotdepot reicht hier nicht aus um die Risse zu verschließen.

**AP9.2: TLP-Bonden**

Um die Qualität der Fügeverbindungen zerstörungsfrei beurteilen zu können, wurden durch das fem von einigen ausgewählten Bauteilen 3D-Röntgen-CT-Aufnahmen angefertigt (Abbildung 83). Mithilfe dieser CT-Aufnahmen konnten Defekte, wie fehlerhafte Anbindung oder Poren und Spalte, sichtbar gemacht werden.

Variante / Bauteilnr.	Aufsicht	Anbindung links	Anbindung rechts
1 / 33			
2 / 37			
3 / 62			

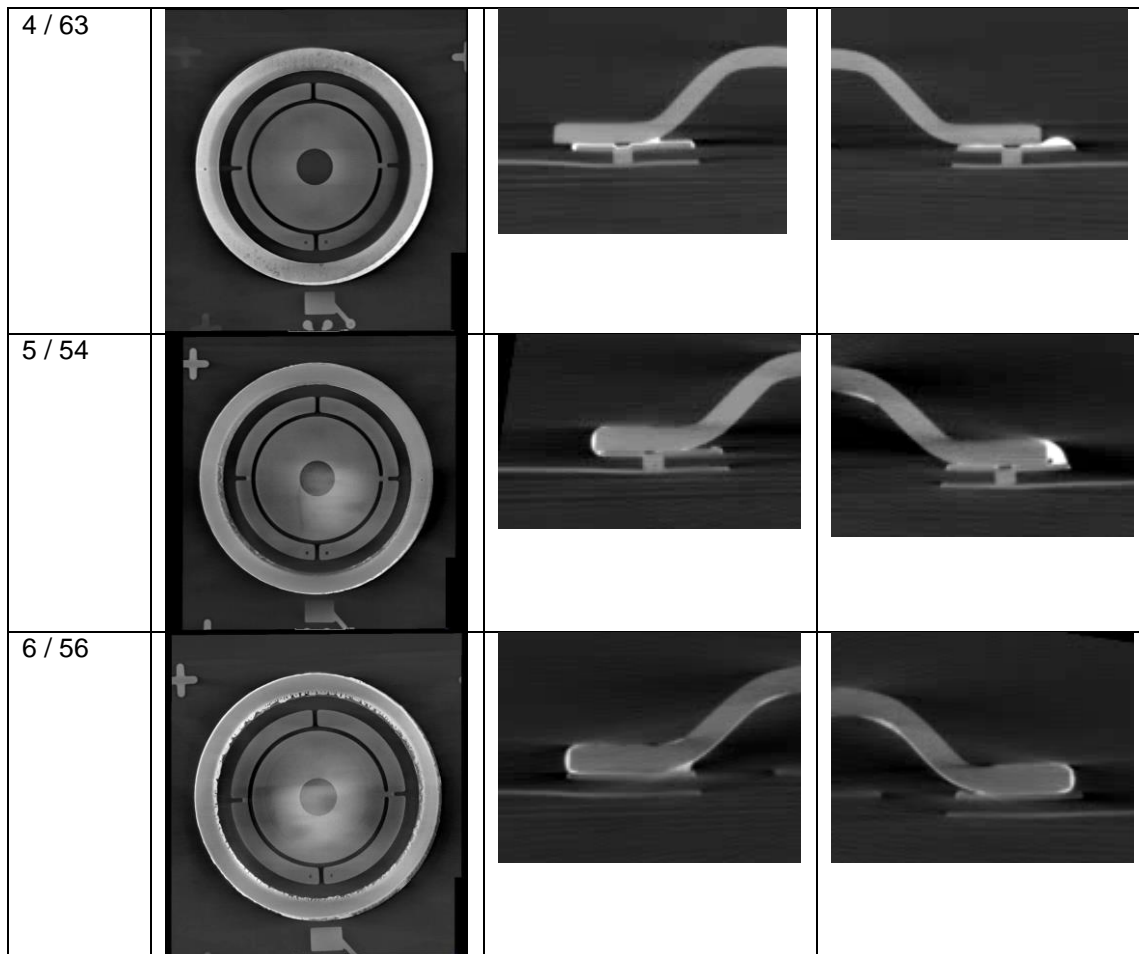


Abbildung 83: Ergebnisse der CT-Analyse an gefügten Bauteilen aller untersuchten Varianten.

Bei den Varianten 1 und 2 sind in der Aufsicht vereinzelt Defekte innerhalb der Fügezone in Form von Poren zu erkennen. Daher wurden bei diesen Varianten an einzelnen Proben mit dem Cross Section Polisher Querschnitte angefertigt und mit dem REM analysiert (Abbildung 84). In beiden Fügezonen sind Poren und Spalte erkennbar, die die Festigkeit der Fügeverbindung beeinträchtigen. Eine EDX-Analyse der Fügezone der Variante 1 ergab im größten Teil der Fügezone die Ausbildung einer Ag-Sn-Phase, während direkt angrenzend an die Ni-Schicht eine dünnere Ni+Sn-Phase gefunden wurde.

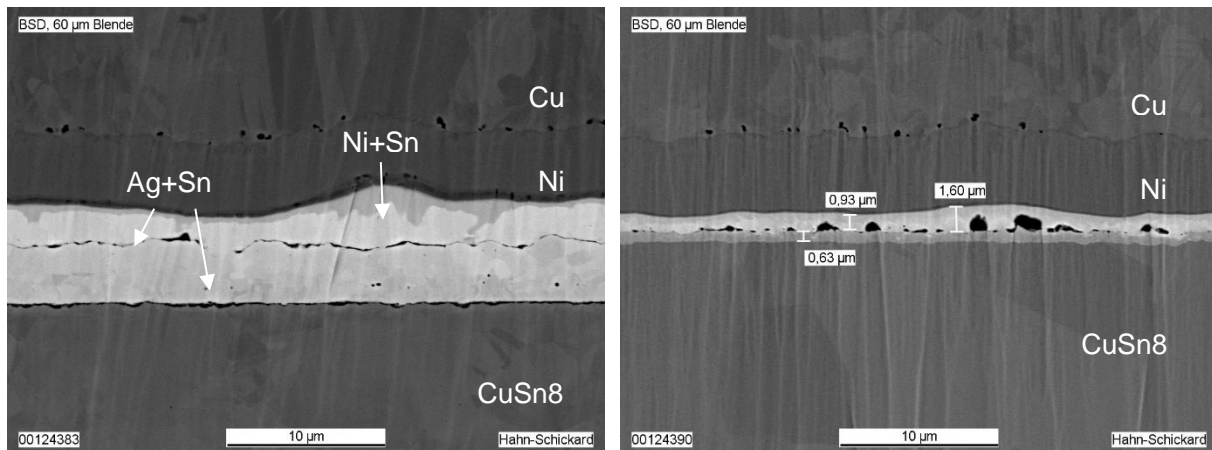


Abbildung 84: Querschnitte durch Fügezonen. Oben befindet sich jeweils die Cu-Ni-Metallisierung der Leiterplatte, unten die CuSn8-Membran. Links: Probe 33, Variante 1. Rechts: Probe 38, Variante 2.

Die mechanische Festigkeit der Fügeverbindung, gemessen an jeweils einer Probe der Varianten 1 und 2, ergab für Variante 1 eine Abrisskraft von 135 N, während die Abrisskraft bei Variante 2 so gering war, dass sie nicht gemessen werden konnte. Als Hauptursache der schlechten Anbindung wurden zu dünne Sn-Schichten vermutet, die eine gleichmäßige Verteilung der flüssigen Phase innerhalb der Fügezone während des Bondvorgangs verhindern. Daher wurden für die Demonstratoraufbauten mindestens 5 µm dicke Sn-Schichten vorgesehen. Weiterhin hatte sich die galvanische Belotung der Membranen als aufwändig herausgestellt, so dass bei den Demonstratoren in AP 10 ausschließlich die Leiterplatten belotet wurden.

## Inhalte HS-S:

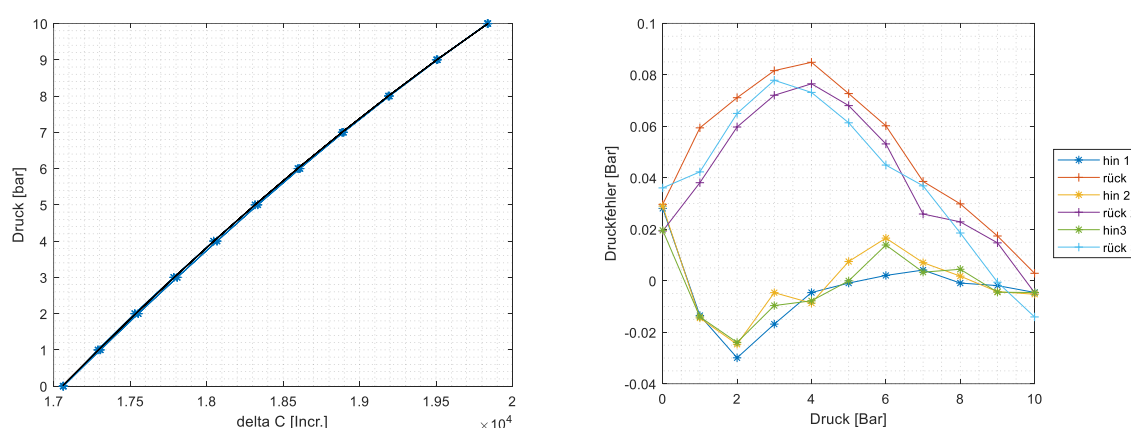
### Prüfstand und Vorgehen bei der Charakterisierung



Abbildung 85: Druckcontroller Wika Mensor CPC6000

Zur Charakterisierung der Drucksensoren wurde ein Druckcontroller der Firma Wika mensor vom Typ PCP6000 verwendet. Der Druckcontroller ist für Druckbereiche von -1 bar bis 100 bar geeignet und kann 2 Module mit je 2 Referenzdrucksensoren aufnehmen. Es können Absolut- und Relativdruck gemessen werden, bei Verwendung beider Kanäle auch Differenzdruck. Die Regelstabilität beträgt 0,003 % FS des aktiven Sensors und die Genauigkeit bis 0,01 % FS. Zur Charakterisierung kam ein Referenzdrucksensor mit einem Messbereich von -1 bis 20 bar und einer Genauigkeit von 0,01% der Messspanne sowie eine barometrische Referenz zum Einsatz. Während der Messung der Kennlinie oder der Langzeitstabilität wird auch gleichzeitig die Leckrate und somit die Hermetizität der Sensoren überprüft.

Der Messbereich beträgt bei Untersuchungen zum Fügeverfahren der Membran 10 bar und bei Untersuchungen zu galvanogeformten Membranen 1 bar.



**Abbildung 86: Gemessenes Sensorsignal und Kennlinie nach der Kalibration**

Die vom Sensor erfassten Kapazitätswerte und die vom Prüfstand erfassten Referenzwerte werden über ein Polynom 3. Ordnung kalibriert. Aus der Kennlinie werden angelehnt an die Normen DIN EN 61298-2 und DIN 1319 Nichtwiederholbarkeit, Hysterese und die maximale Messabweichung ermittelt. Diese dienen der Optimierung und dem Vergleich der Sensoren.



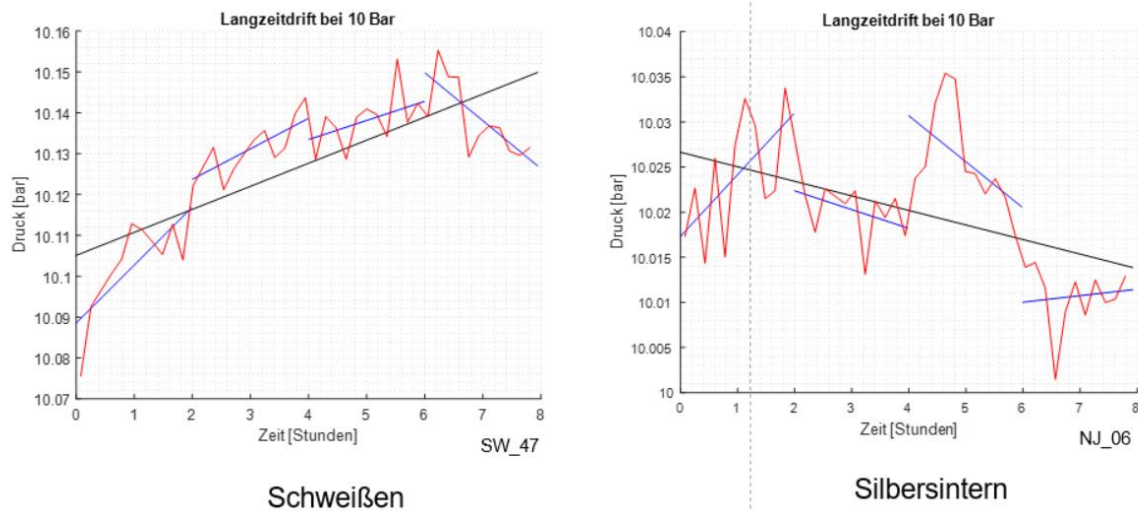


Abbildung 87: Langzeitdrift von zwei Beispielsensoren

Die Langzeitdrift der Sensoren wird bei Belastung mit Maximaldruck für 8 Stunden gemessen. Dabei wird der zeitliche Verlauf der gemessenen Kapazität des Sensors aufgezeichnet und der Druck anhand der bei der Kennlinienmessung ermittelten Kalibration berechnet. Um die Messergebnisse für einen Vergleich zusammenzufassen wurden Steigungsgeraden durch den kompletten Verlauf sowie für Abschnitte von jeweils 2 bar an die Kurve angelegt.

**Erste Charakterisierungen der Sensoren mit AVT Verfahren aus AP7**

In einem ersten Durchgang wurde für die AVT Verfahren für die Membran unterschiedliche Varianten bzw. Optimierungsmaßnahmen charakterisiert.

Tabelle 15: Erste Charakterisierungsergebnisse zur Prozessoptimierung der Fügeverfahren

Fügeverfahren	Nr.	Fügeverbindung nach Test OK?	Kennlinienmessung			Lanzeittest Abweichung [%FSO]
			Hysterese [%FSO]	Nichtwiederholbarkeit [%FSO]	max. Messabweichung [%FSO]	
TLP Bonden (5,7 µm Sn)	TLP_106	ja	0,5	0,1	0,5	1,4
TLP Bonden (11µm Sn)	TLP_110	ja	0,4	0,3	0,4	1,9
TLP Bonden (12 µm Ag + 6 µm Sn)	TLP_114	ja	0,1	0,2	0,1	0,9
TLP Bonden (12 µm Ag + 12 µm Sn)	TLP_118	ja	0,2	0,2	0,3	0,7
Reaktives Fügen CuSn8 Membran	IN3_6	ja	5,7	1,7	6,3	3,8
Reaktives Fügen CuSn8 Membran	IN3_10	ja	1,6	0,6	1,7	0,9
Reaktives Fügen 1.4435 Membran	IWS5_6	ja	0,2	0,1	0,2	1,9
Reaktives Fügen 1.4435 Membran	IWS5_7	ja	0,9	0,3	1,1	3,4
Reaktives Fügen 1.4435 Membran	IWS5_8	ja	1,4	0,4	1,4	3,5
Reaktives Fügen 1.4435 Membran	IWS5_9	ja	1,8	0,7	2,4	1,4
Reaktives Fügen 1.4435 Membran	IWS5_10	ja	2,7	0,8	2,8	1,3
Benchmarkschweißen	BS_1	ja	2,8	0,4	2,8	1,0
Benchmarkschweißen	BS_2	ja	2,8	0,8	3,0	1,0
Benchmarkschweißen	BS_3	ja	2,8	0,7	2,9	1,1
Sintern	HR_M3_C1	nein	7,5	2,5	7,3	24,8
Sintern	HR_M3_C2	nein	5,8	2,1	5,4	22,6
Sintern	HR_M3_NC_1	nein	10,5	2,5	10,6	23,6
Sintern	HR_M3_NC_2	nein	9,5	4,0	10,0	18,6
Sintern	HR_M4_NC_1	nein	6,6	2,4	7,0	16,4
Sintern	HR_M4_NC_3	nein	6,7	3,1	6,6	15,4

Anhand von Schertests wurde die Haftfestigkeit der Membranen überprüft und mit den Ergebnissen weitere Optimierungen durchgeführt.

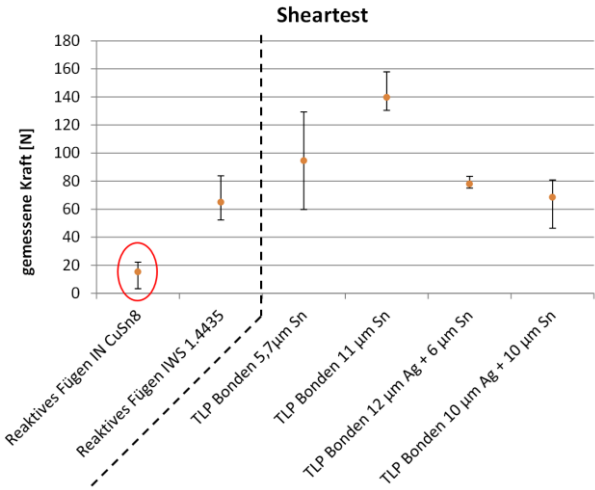


Abbildung 88: Haftfestigkeitsmessungen

## 2.10 AP10: Auslegungsmodell Drucksensorfamilie

**Einzelergebnis:** Auslegungsmodell Drucksensorfamilie

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**Inhalte HS-VS:**

### AP10.1: Reaktives Fügen

Die besten Ergebnisse aus den Druckversuchen wurden mit Edelstahlmembranen mit Ni/Au als lötbare Schicht und RMS-Folie der Firma Indium Corp. (neu) mit 10 µm Sn - 40 µm Ni/Al – 10 µm Sn erzielt. Siehe Abbildung 79. Mit dieser Kombination wurden weitere Membranen auf Leiterplatte gefügt die zum Aufbau und zur Charakterisierung der Drucksensor-Demonstratoren bei HS-S sowie zur Charakterisierung der Fügeverbindung bei HS-VS verwendet wurden.

Variante	IWS	Indium Corp. ältere Folie	IWS	Indium Corp. ältere Folie	Indium Corp. neue Folie
PCB	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H
Membran	CuSn8	CuSn8	1.4435	1.4435	1.4435
Gefügte Proben	-	-	-	-	55

### AP10.2: TLP-Bonden

Für den Aufbau der Drucksensor-Demonstratoren wurden HELP H Leiterplatten durch die PA-Firma Schweizer Electronic galvanisch mit vier unterschiedlichen Schichtsystemen beschichtet. Als Membranen dienten Stanzteile aus unbeschichtetem CuSn8 (Tabelle 5-2).

**Tabelle 2-16: Varianten der galvanischen Beschichtung der Leiterplatte für die Sensoraufbauten.**

Variante	1.1	3.2	5.2	7.1
PCB	HELP H 5,7 µm Sn	HELP H 11 µm Sn	HELP H 12 µm Ag 6 µm Sn	HELP H 10 µm Ag 10 µm Sn
Membran	CuSn8	CuSn8	CuSn8	CuSn8

Ziellegierungen	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ $\text{Cu}_3\text{Sn}$	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ $\text{Cu}_3\text{Sn}$ $\text{Ag}_3\text{Sn}$
-----------------	--	--

**Inhalte HS-S:**

Die Auslegung der Drucksensorfamilie ist in den Abbildung 89, Abbildung 90 und Abbildung 91 gezeigt. Es wurden für die Druckbereiche bis 50 mbar, 2 bar und 10 bar Regressionsmodelle erstellt, mit denen abgeschätzt werden kann, welche Membrandicke für eine bestimmte Kapazitätsänderung verwendet werden muss, und welche mechanischen Spannungen in der Membran bei der jeweiligen Verschiebung entstehen. Letzteres ist notwendig um sicherzustellen, dass die Membran innerhalb der Dauerwechselbelastung betrieben wird, und dass keine Relaxationseffekte im Betrieb auftreten.

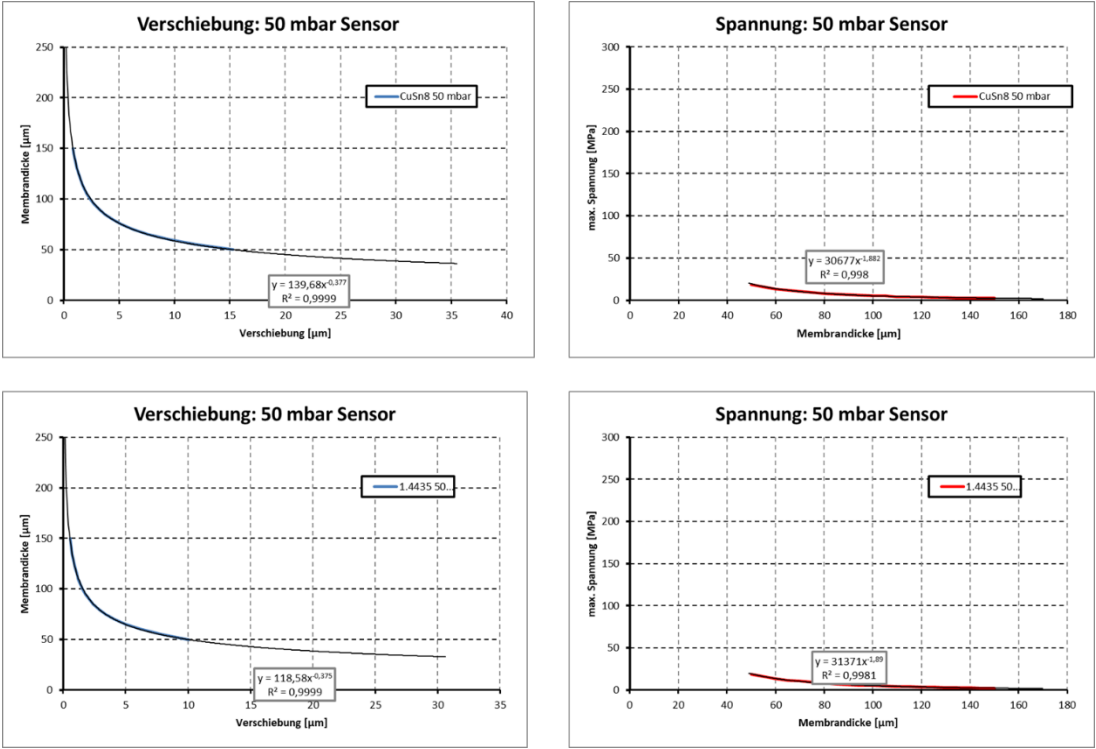


Abbildung 89: Auslegung eines 50 mbar Sensors aus den Materialien CuSn8 und Stahl 1.4435, Membrandurchmesser 14,7 mm

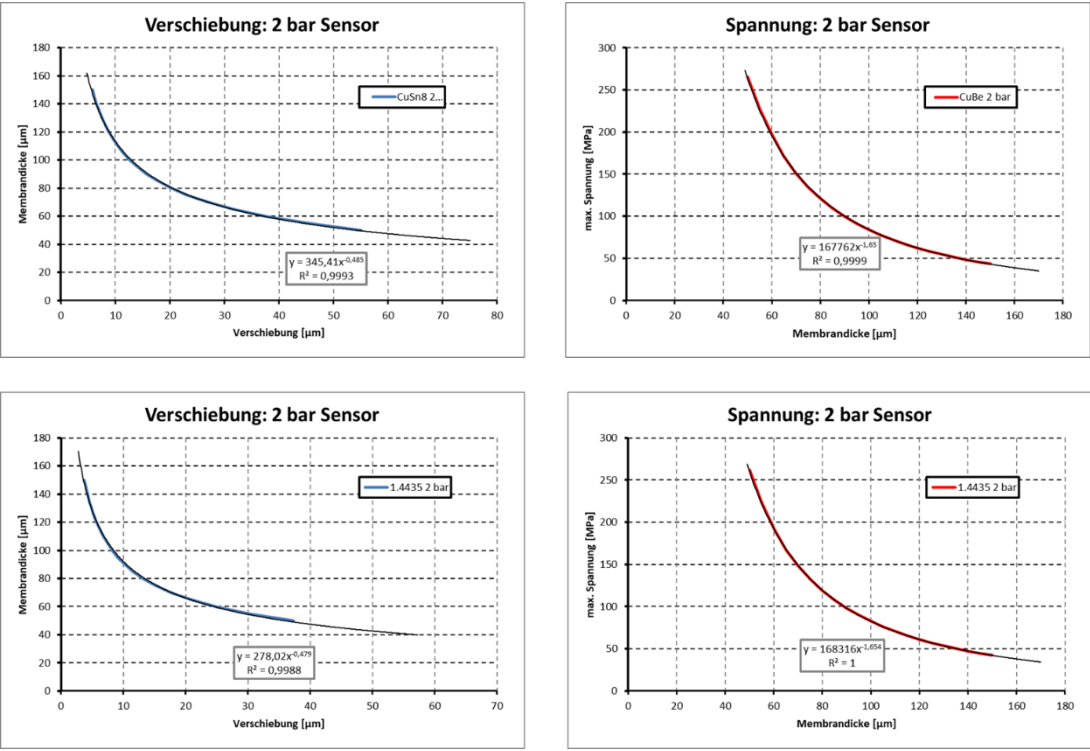


Abbildung 90: Auslegung eines 2 bar Sensors aus den Materialien CuSn8 und Stahl 1.4435, Membrandurchmesser 9,2 mm

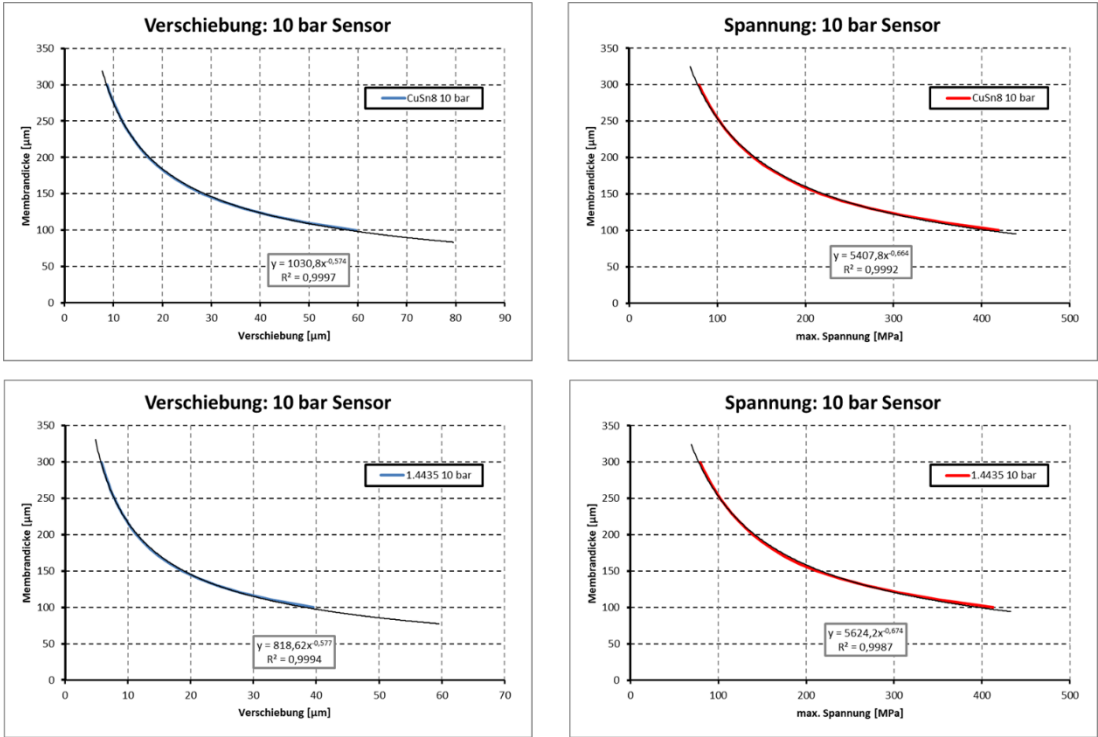


Abbildung 91: Auslegung eines 10 bar Sensors aus den Materialien CuSn8 und Stahl 1.4435, Membrandurchmesser 9,2 mm

Auf Basis der Berechnungsmodelle wurden folgende Membrantypen angefertigt:

Tabelle 17: Membranen für unterschiedliche Druckbereiche

Druckbereich [bar]	Material	Durchmesser [mm]	Dicke [µm]
0,05	1.4435	14,7	50
2	1.4435	9,2	50
10	1.4435	9,2	150
10	CuSn8	9,2	150

Aufbau + Charakterisierung der Sensordemonstratoren

**Einzelergebnis:** Aufgebaute und charakterisierte Drucksensordemonstratoren

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

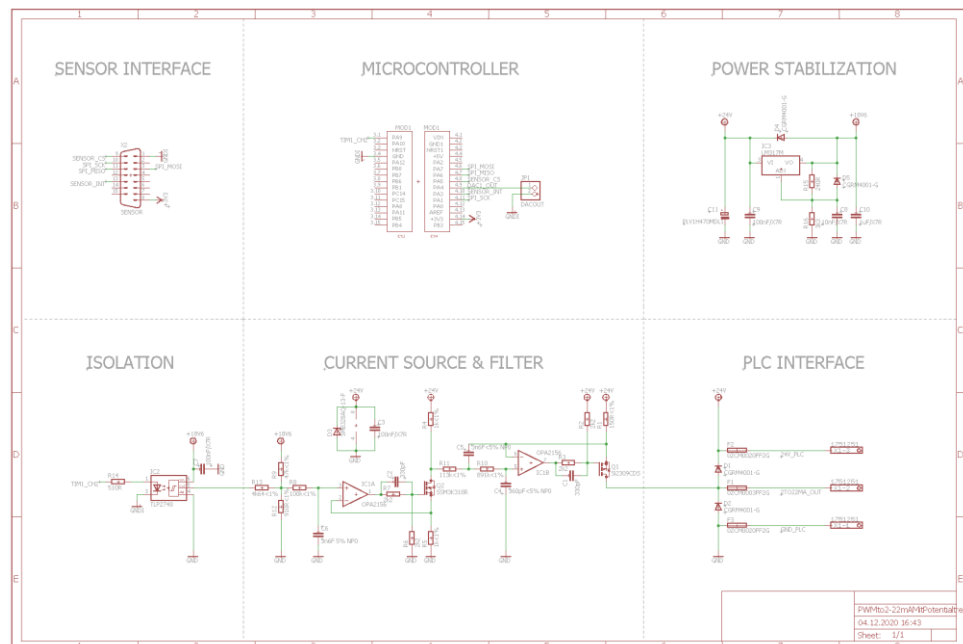
**Beschreibung:**

**Inhalte HS-S:**

**Demonstrator Füllstandsmessung**

Vom PA Mitglied Moosbach & Kanne wurden die Anforderungen für die Füllstandsmessung in Chemikaliertanks formuliert:

- Messung Füllstand in aggressiven Medien -> Edelstahlgehäuse + Edelstahlmembran
- Messbereich: 2m Wassersäule = 0,2 Bar -> Einsatz Drucksensor mit Messbereich 1 Bar, Verwendung einer Membran mit 50µm Dicke
- Auflösung: 0,02 Bar
- Schnittstelle der vorhandenen SPS: 4 .. 20 mA
- Temperaturbereich: 15 .. 25°C



**Abbildung 92: 4..20mA Schnittstelle mit Potentialtrennung**

Um den Demonstrator beim PA Mitglied in die vorhandene SPS integrieren zu können, wurde zusätzlich zum Antragsumfang eine 4..20mA Schnittstelle in die Auswerteelektronik integriert. Dabei wurde die Schnittstelle zur SPS galvanisch von der Sensor Stromversorgung getrennt.

Druck [Bar]	Strom [mA]	Empfindlichkeit [mA/Bar]
0	4,01	
0,05	4,61	12
0,1	5,4	15,8
0,15	6,2	16
0,2	6,99	15,8
0,25	7,8	16,2
1	20	15,99

Abbildung 93: Charakterisierung für die Füllstandsmessung mit 4..20mA Schnittstelle

Zur Optimierung der Auflösung bei gleichzeitig geringerem Messbereich wurde eine dünnere Membran (Dicke = 50µm) verwendet.

### Demonstrator bis 20 bar

Zur Druckmessung in Anwendungen mit höherem Druckbereich als 10 bar (vgl. AP10) wurde untersucht, wie sich die Sensorvarianten bei Charakterisierung bis 20 bar verhalten.

Fügeverfahren	Variante	Membran	Beschichtung der Membran
Reaktives Fügen		1.4435 tiefgezogen	Ni / Au
TLP Bonden	Schichtsystem aus dem PCB: 12 µm Sn + 6 µm Ag	CuSn8 tiefgezogen	x
Sintern	Paste mit Nanopartikeln (Nanojoin)	CuSn8 tiefgezogen	CuTi / Au
Schweißen	Stufenschweißen	1.4435 tiefgezogen	x

Abbildung 94: Sensorvarianten für die Charakterisierung bis 20 bar

Der Sensor mit gesinterter Membran hat bei 20 bar versagt und konnte nicht charakterisiert werden.



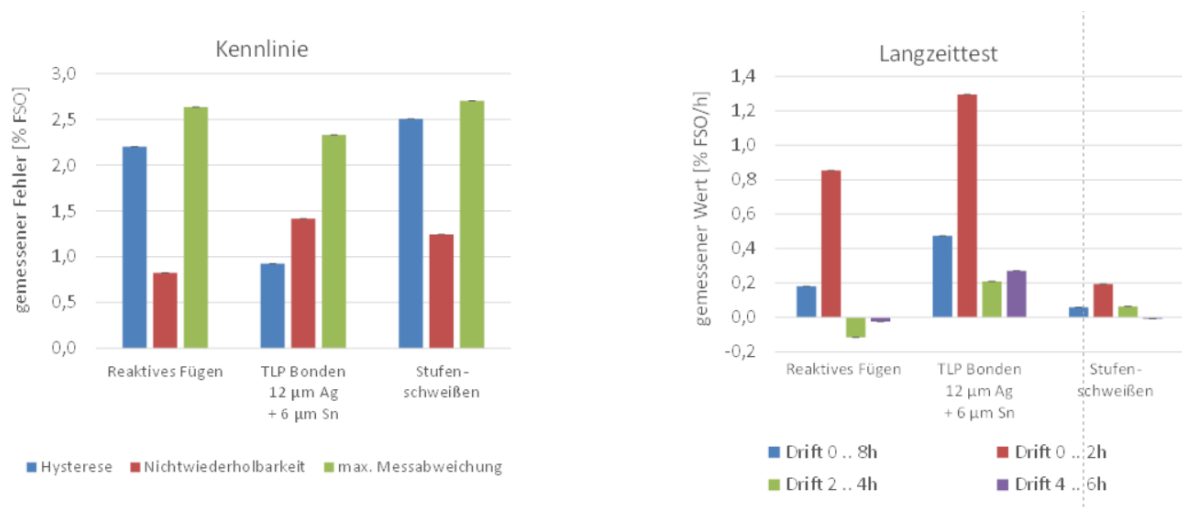


Abbildung 95: Charakterisierung bis 20 bar

Für Anwendungen bei höherem Druck eignen sich demnach die Sensoren mit geschweißter Membran am besten. Die Kennlinienmessung ergibt für die drei untersuchten Varianten ähnliche Ergebnisse, im Langzeittest ist jedoch nur der Sensor mit geschweißter Membran weitgehend kriechfrei.

### Demonstrator für höhere Datenrate

Für Messungen von Druckschwankungen in Pneumatik Anwendungen wurde für das PA Mitglied Festo ein Demonstrator aufgebaut. Die Anforderungen waren dabei:

- Messbereich bis 2 bar -> Verwendung einer dünneren Membran zur Optimierung der Auflösung
- Datenrate bis 1kHz -> Anpassung der Datenübertragung über den Mikrocontroller

### 12 Hz

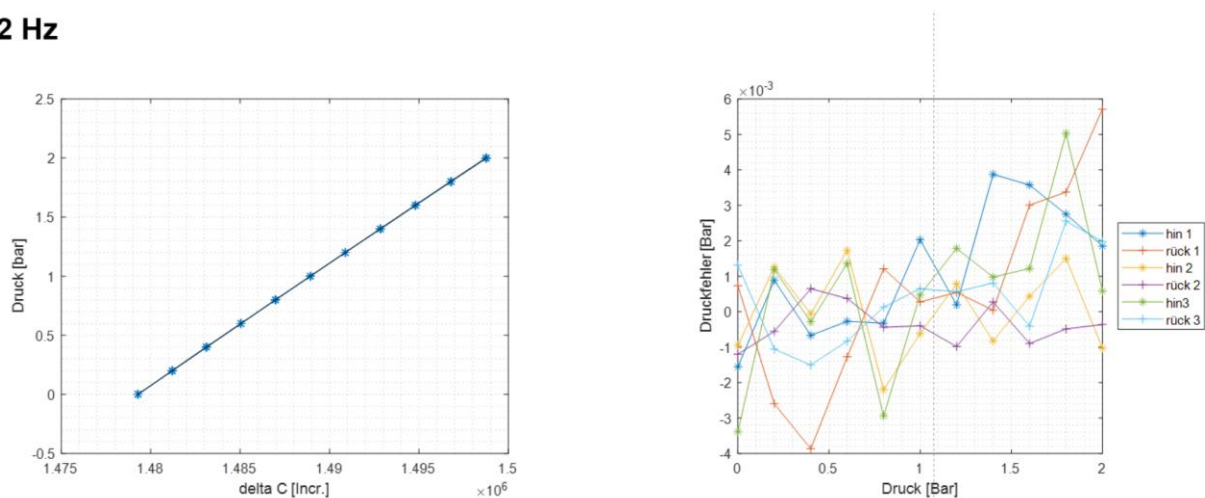


Abbildung 96: Charakterisierung bei 12Hz Datenrate

**781 Hz**

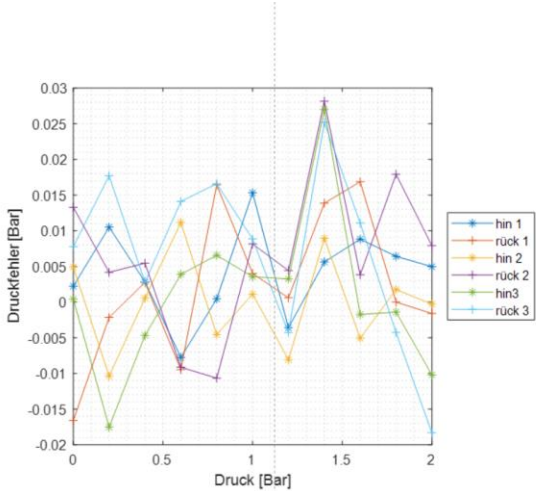
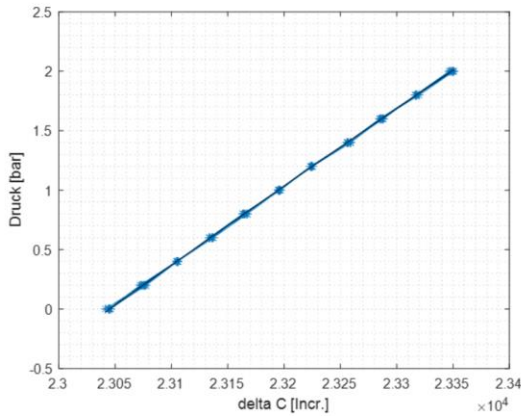


Abbildung 97: Charakterisierung bei 781Hz Datenrate

**1560 Hz**

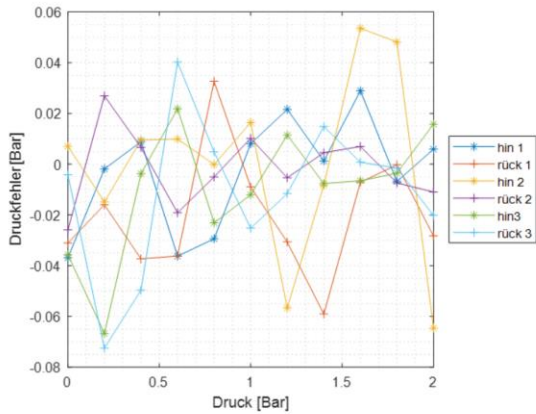
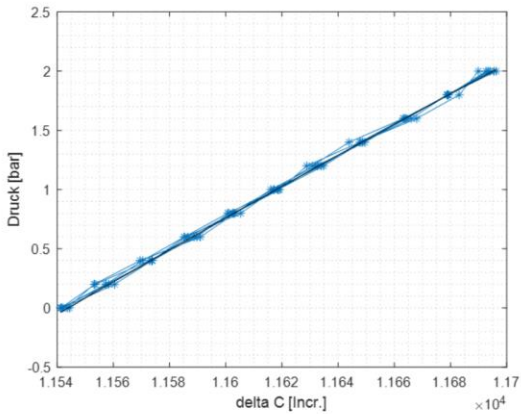


Abbildung 98: Charakterisierung bei 1560 Hz Datenrate

Die Charakterisierungen zeigen den zu erwartenden Einfluss der höheren Datenrate auf die Auflösung und Nichtwiederholbarkeit in der Sensorkennlinie.

**Demonstratoren mit Messbereich bis 10 Bar**

Mit den Sensoren aus AP10 wurden für das PA Mitglied Kyocera Automotive ein Demo Kit für eigene Charakterisierungen bereitgestellt. Dabei konnten die Sensoren ohne weitere Anpassungen verwendet werden.

## 2.11 AP11: Aufbau + Charakterisierung der optimierten Drucksensoren

**Einzelergebnis:** Aufgebaute Sensoren, Charakterisierungsergebnisse

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

**Beschreibung:**

**HS-VS**

### AP11.1: Reaktives Fügen

Die Charakterisierung der optimierten Fügeverbindung erfolgte durch Anfertigung von Querschliffen und anschließender mikroskopische Untersuchung. Die erzielten Festigkeiten der Fügeverbindung wurden analog zu den Druckversuchen, die Hermetizität analog zu den Dichtigkeitsversuchen in AP9 ermittelt. Für die Versuche wurden 55 Edelstahl Membranen mit RMS der Firma Indium Corp. (neu) auf Leiterplatten gefügt. Davon wurden 10 Proben für den Aufbau der Drucksensor-Demonstratoren zu HS-S gesendet.

### Druckfestigkeit der Fügeverbindung

Tabelle 2-18: Eingesetzte Probenvariante für die Druckfestigkeitsversuche

Variante	IWS	Indium Corp. ältere Folie	IWS	Indium Corp. ältere Folie	Indium Corp. neue Folie
PCB	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H
Membran	CuSn8	CuSn8	1.4435	1.4435	1.4435
Druckfestigkeit	-	-	-	-	25

Wie aus Tabelle 2-18 ersichtlich wurden mit 25 Proben Druckversuche durchgeführt um eine bessere Aussage über die Festigkeiten der Fügeverbindungen zu erhalten. Ergebnisse sind in Abbildung 99 dargestellt.

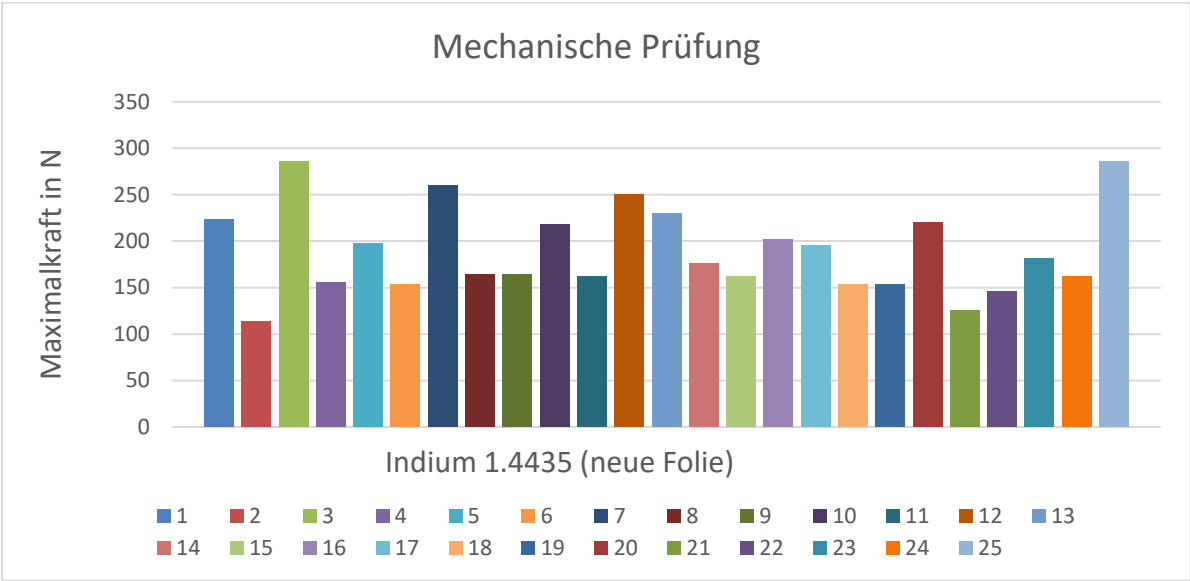


Abbildung 99: Ergebnisse der mechanischen Prüfung (25 Proben reaktiv gefügt)

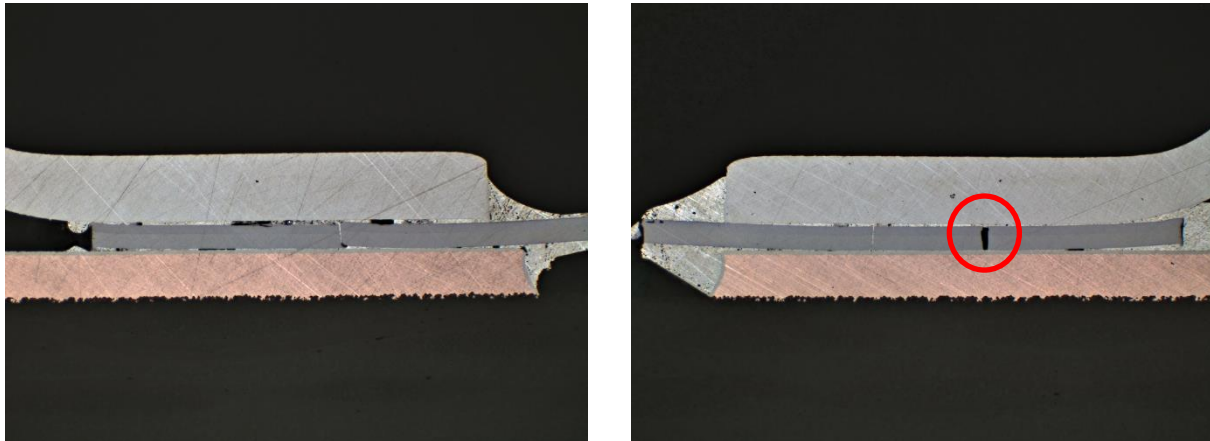
Die Proben mit der neu beschafften RMS-Folie von Indium Corp. weisen, wie in AP9 beschrieben, deutlich höhere Festigkeiten als die zuvor mit den älteren RMS-Folien gefügten Proben auf. Die Versuche wurden mit denselben Parametern durchgeführt wie die Versuche mit den gealterten RMS-Folien. Somit ist dies nicht auf den Prozess an sich zurückzuführen. Eine mögliche Ursache für die geringeren Festigkeiten könnte die Alterung der RMS-Folie sein. Durch Diffusionsprozesse der einzelnen Ni/Al-Schichten untereinander könnten diese Schichten einem Alterungsprozess unterliegen und würden somit auch reaktionsträger werden.

**Hermetizität**

Tabelle 2-19: Eingesetzte Probenvariante für die Dichtigkeitsversuche

Variante	IWS	Indium Corp. ältere Folie	IWS	Indium Corp. ältere Folie	Indium Corp. neue Folie
PCB	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H	HELP H
Membran	CuSn8	CuSn8	1.4435	1.4435	1.4435
Hermetizität	-	-	-	-	20

Wie aus Tabelle 2-19 ersichtlich, wurden mit 20 Proben Dichtigkeitsversuche durchgeführt. Bei allen Proben verlief der Test negativ.



**Abbildung 100: Querschliff einer Probe nach dem Dichtigkeitsversuch**

Wie in AP9 schon beschrieben, liegen Ursachen der Undichtigkeiten wahrscheinlich im Schwindungsprozess der RMS während der Reaktion. (Abbildung 100).

### AP11.2: TLP-Bonden

Tabelle 2-20 zeigt sämtliche Varianten der mittels TLP-Bonden hergestellten Sensoraufbauten, sowie die durchgeführten Analysen.

**Tabelle 2-20: Varianten der Sensoraufbauten, sowie die durchgeführten Analysen. Die Anzahl der jeweils eingesetzten Proben ist in Klammern angegeben.**

Variante	1.1	3.2	5.2	7.1
PCB	HELP H 5,7 µm Sn	HELP H 11 µm Sn	HELP H 12 µm Ag 6 µm Sn	HELP H 10 µm Ag 10 µm Sn
Membran	CuSn8	CuSn8	CuSn8	CuSn8
Anzahl gefügter Proben	12	12	12	12
Mechanische Prüfung bei RT	✓ (2)	✓ (2)	✓ (2)	✓ (2)
Mechanische Prüfung bei 250 °C	✓ (4)	✓ (4)	✓ (4)	✓ (4)
Schliffbild		✓ (1)	✓ (2)	
REM/EDX		✓ (1)	✓ (2)	

**Schliffproben, REM-Aufnahmen und EDX-Analysen**

Um den Einfluss des Silbers in der Fügezone näher zu untersuchen, wurden von gefügten Bauteilen mit Silber (Variante 5.2) und ohne Silber (Variante 3.2) Querschliffe angefertigt und analysiert (Abbildung 101 und Abbildung 102).

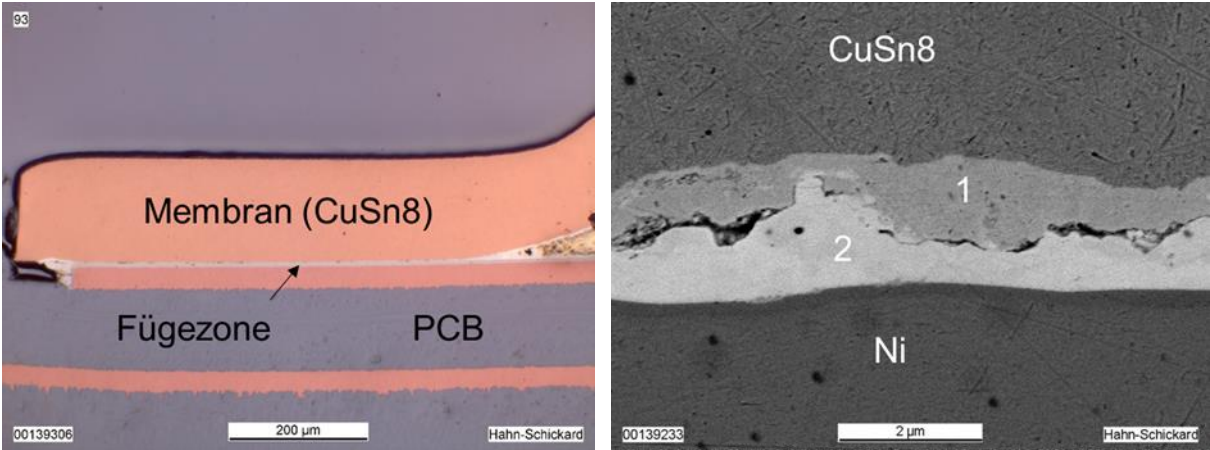


Abbildung 101: Querschliff einer Fügeverbindung der Variante 3.2. Links: Mikroskopaufnahme, rechts: Fügezone (REM-Aufnahme mit Materialkontrast). Die Zonen 1 und 2 wurden mittels EDX näher untersucht.

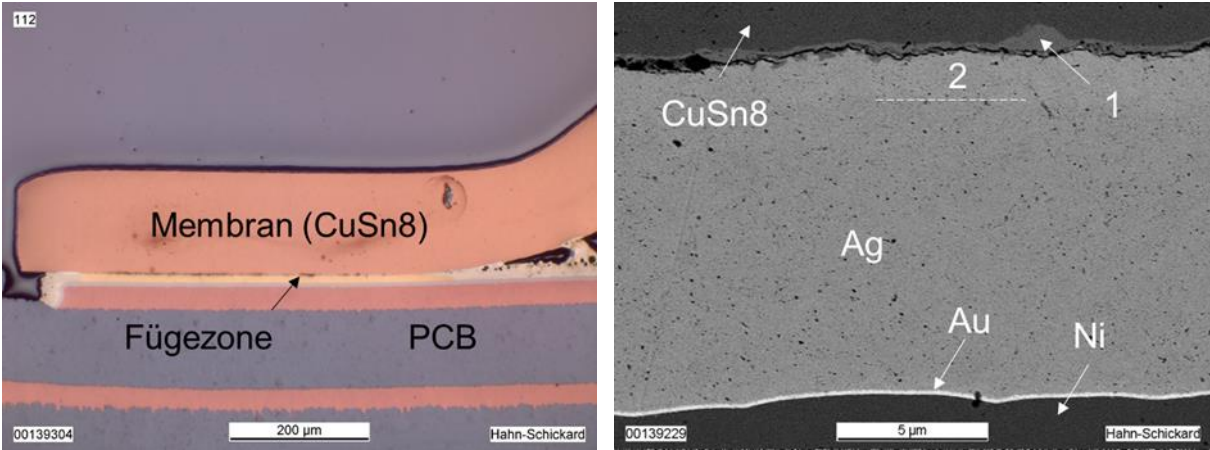


Abbildung 102: Querschliff einer Fügeverbindung der Variante 5.2. Links: Mikroskopaufnahme, rechts: Fügezone (REM-Aufnahme mit Materialkontrast). Die Zonen 1 und 2 wurden mittels EDX näher untersucht.

	Variante 3.2	Variante 5.2
Zone 1	71,7% Cu + 17,8% Sn + 0,5% Au	73,5% Cu + 18,1% Sn

Zone 2	28,0% Cu + 39,4% Sn + 1,6% Au + 22,4% Ni	78,4%Ag + 16,9% Sn
--------	--	--------------------

Ein Vergleich der beiden untersuchten Varianten ergibt, dass sich im Gegensatz zur Variante 5.2 bei der Variante 3.2 die dünne Au-Schicht im Sn gelöst hat. Die Bestimmung der atomaren Zusammensetzung der beiden Zonen 1 und 2 mittels EDX ergibt:

**Zone 1:** Offenbar ist bei beiden Varianten Sn in die CuSn8-Membran diffundiert und hat dort in einem schmalen Bereich den Sn-Anteil von 8 auf etwa 18% erhöht. Ob sich dort die hochschmelzende Phase Cu<sub>3</sub>Sn gebildet hat, müsste man durch eine Phasenanalyse absichern, was im Rahmen des Vorhabens nicht mehr durchgeführt werden konnte.

**Zone 2:** Bei Variante 3.2 finden sich neben den Bestandteilen Cu und Sn noch große Anteile von Ni und Au, die von der Oberfläche der PCB stammen. Bei der Variante 5.2 hingegen hat sich offenbar eine Ag-Sn-Phase mit hohem Ag-Anteil gebildet, während Cu nicht gefunden wird.

Bei beiden Varianten hat sich zwischen den beiden Zonen 1 und 2 ein Spalt gebildet, der offensichtlich die Festigkeit der Fügeverbindung vermindert und die Trennstelle bei den durchgeführten Druckversuchen bildet.

### Festigkeit der Fügeverbindung

Die quantitative Festigkeit der Fügeverbindung wurde analog zu den Druckversuchen der reaktiv gefügten Membranen an der Zugprüfmaschine (Zwick Roell Z010) durchgeführt. Hierzu wurde eine eigenkonstruierte Haltevorrichtung mit integrierter Heizung gefertigt, in welche die Leiterplatte inklusive Membran eingelegt und mit demselben Stempel orthogonal zur Fügefläche druckbelastet werden kann.

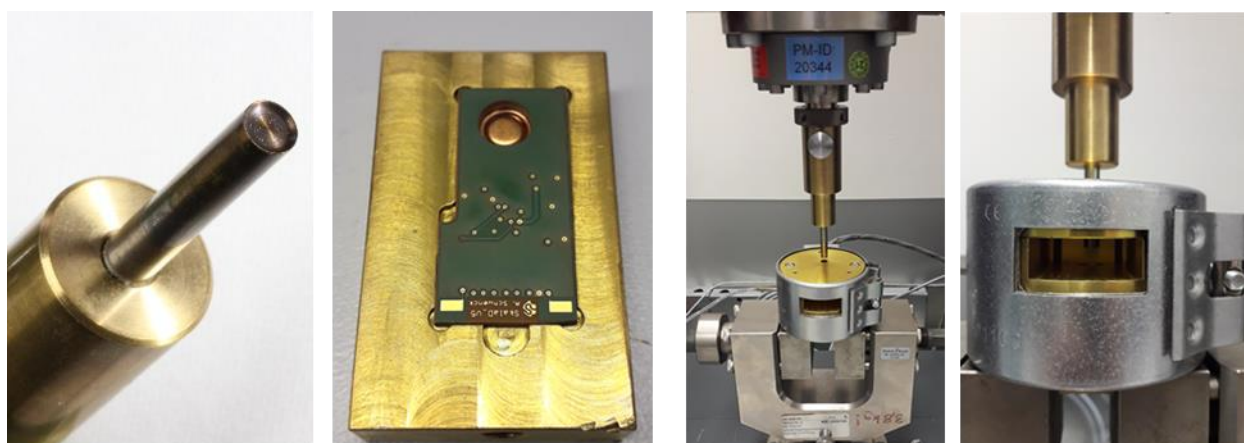


Abbildung 103: Vorrichtung zum Abdrücken der Membranen von der Leiterplatte im beheizten Zustand.

Mit der in Abbildung 103 gezeigten Vorrichtung wurden TLP-gebundene Membranen sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 250 °C vertikal von der Leiterplatte abgehoben, und die maximale Druckkraft wurde aufgezeichnet (Abbildung 104). Während bei Raumtemperatur bei allen

untersuchten Schichtvarianten moderate Festigkeiten erzielt werden konnten, wiesen bei 250°C nur die Fügeverbindungen der Variante 1 (5,7 µm Sn) eine belastbare Festigkeit auf. Das deutet darauf hin, dass sich nur bei dieser Variante höherschmelzende Legierungen in der Fügezone gebildet haben, bei den anderen Varianten jedoch noch reine Sn-Verbindungen vorhanden sind.

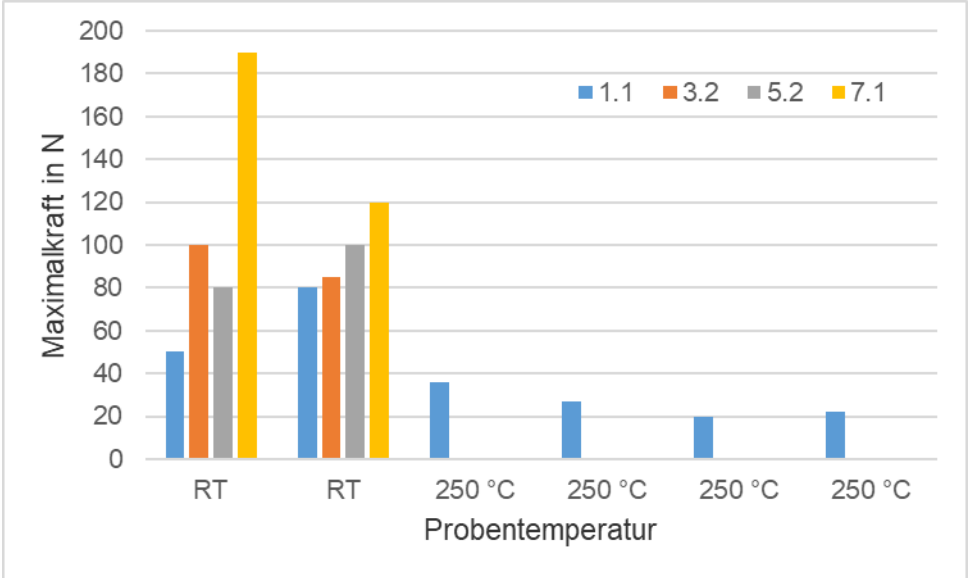


Abbildung 104: Ergebnisse der mechanischen Prüfung.

**HS-S:**

**TLP Bonden**

Fügeverfahren	Schichtsystem auf dem PCB	Membran	Beschichtung der Membran	Anzahl Sensoren
TLP Bonden	5,7 µm Sn	CuSn8	x	5
TLP Bonden	11 µm Sn	CuSn8	x	5
TLP Bonden	12 µm Sn + 6 µm Ag	CuSn8	x	9
TLP Bonden	12 µm Sn + 10 µm Ag	CuSn8	x	4

Abbildung 105: Untersuchte Sensorvarianten TLP Bonden



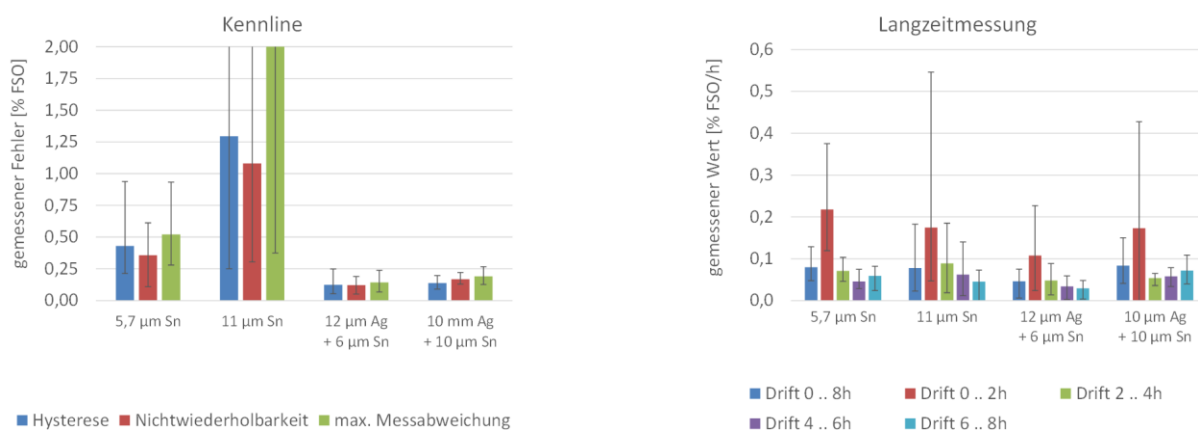


Abbildung 106: Charakterisierungsergebnisse TLP Bonden

Bei der Kennlinienmessung sind Schichtsysteme mit Silber sind in allen Kennwerten besser als Schichtsysteme ohne Silberanteil. Für die weiteren Untersuchungen wurde das Schichtsystem 12µm Sn + 6µm Ag ausgewählt.

### Silbersintern

Fügeverfahren	Sinterpaste	Membran	Beschichtung der Membran	Anzahl Sensoren
Sintern	Nanojoin Nanopartikel	CuSn8	CuTi / Au	9
Sintern	Heraeus Mikropartikel	CuSn8	CuTi / Au	1

Abbildung 107: Untersuchte Varianten Silbersintern

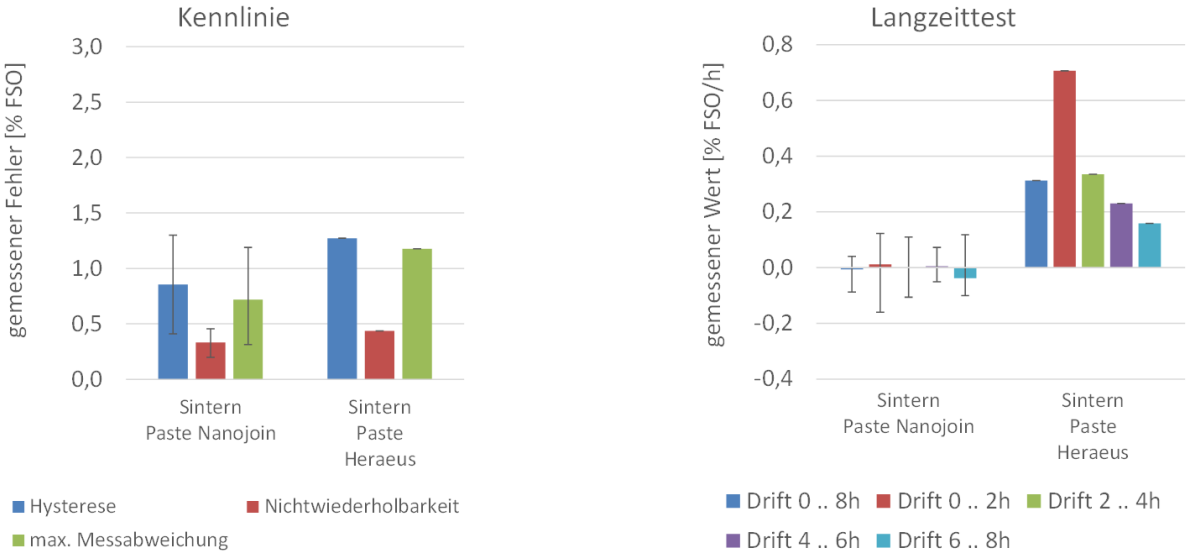


Abbildung 108: Charakterisierungsergebnisse Silbersintern

Aufgrund des deutlich besseren Langzeitverhaltens wurde für die weiteren Untersuchungen die Sinterpaste mit Nanopartikeln der Firma Nanojoin verwendet.

**Schweißen**

Fügeverfahren	Membran	Beschichtung der Membran	Anzahl Sensoren
Benchmarkschweißen	1.4435	x	5
Spaltschweißen	1.4435	x	5
Stufenschweißen	1.4435	x	9

Abbildung 109: Untersuchte Varianten Schweißen

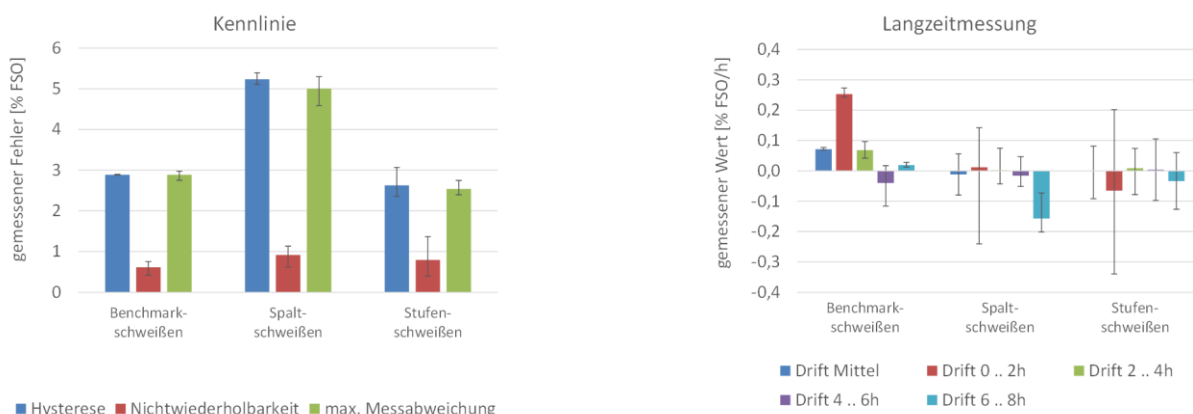


Abbildung 110: Charakterisierungsergebnisse Schweißen

Da beim Stufenschweißen keine Langzeitdrift messbar ist und die Kennlinie besser als beim Spaltschweißen ist wurde diese Variante für die weiteren Versuche ausgewählt.

### Vergleich der AVT Verfahren aus AP7

Die Sensoren mit den ausgewählten Varianten der Fügeverfahren wurden im nächsten Schritt verglichen.

Fügeverfahren	Variante	Membran	Beschichtung der Membran	Anzahl Sensoren
Reaktives Fügen		1.4435	Ni / Au	10
TLP Bonden	Schichtsystem aus dem PCB: 12 µm Sn + 6 µm Ag	CuSn8	x	9
Sintern	Paste mit Nanopartikeln (Nanojoin)	CuSn8	CuTi / Au	9
Schweißen	Stufenschweißen	1.4435	x	6

Abbildung 111: Fügeverfahren und Prozessparameter für den Vergleich

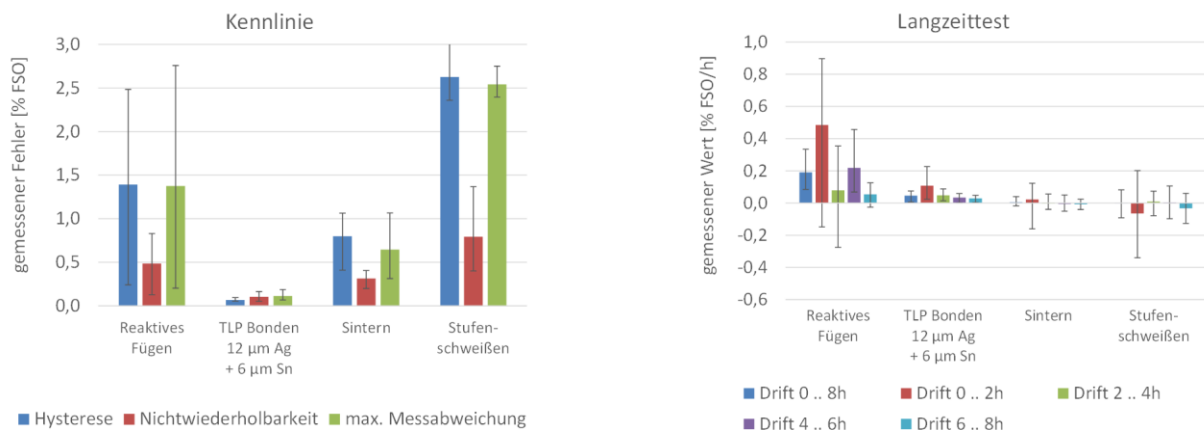


Abbildung 112: Ergebnis Vergleich

Der Vergleich zeigt Vor- und Nachteile für alle Fügeverfahren. TLP gebondete Sensoren haben die beste Kennlinie, jedoch einen kleinen Langzeitdrift. Dieser sollte jedoch für die meisten Anwendungen nicht relevant sein. Gesinterte und geschweißte Sensoren sind nahezu drifffrei, weisen aber höhere Abweichungen bei der Kennlinienmessung als die TLP gebondeten Sensoren auf.

### Charakterisierung der Sensoren mit galvanofoming Membran

Mit den in AP6 am fem hergestellten Membranen wurden mittels Weichlöten mit SAC Lot und SMD Bestückung Drucksensoren hergestellt und in den Gehäusen aus AP8

Herstellungsverfahren Membran	Variante	Material	Beschichtung der Membran	Anzahl Sensoren
Tiefziehen	x	CuSn8 gewalzt	x	14
<u>Galvanoforming</u>	3D gedruckte DLP Substrate 500nm PVD-CU	CuSn10 galvanisch	x	8
<u>Galvanoforming</u>	Thermogeformte COP Substrate 500nm PVD-CU	CuSn10 galvanisch	x	7

Abbildung 113: Untersuchte Sensoren

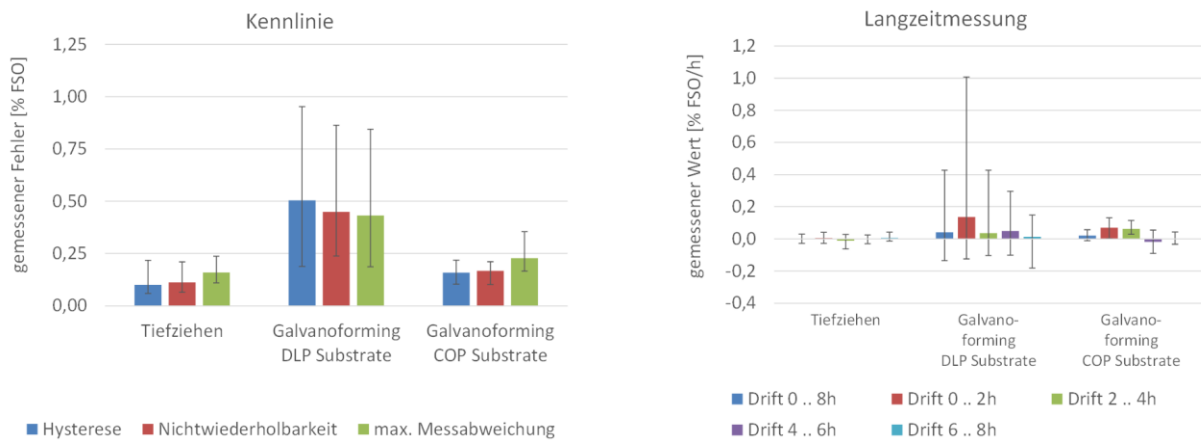


Abbildung 114: Charakterisierungsergebnisse

## 2.12 AP12: Dokumentation und Verbreitung der Ergebnisse

### Einzelergebnis: Dokumentation

Das erreichte Ergebnis entspricht dem Ziel

### Beschreibung:

### Inhalte fem, HS-VS und HS-S gemeinsam:

Die Ergebnisse des Projektes wurden dokumentiert und anwendergerecht ausgearbeitet. Der Abschlussbericht wurde angefertigt.



Fem:

	Soll/ist		
Mitarbeiter:	2018	2019	2020
WM	9/9	9/9	4,5/4,5
Übriges Personal	5,4/6	6/6	2,4/3,0

## 4 **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Bei Antragsstellung wurde mit den Fügeverfahren reaktives Fügen, Widerstandsschweißen und Laserlöten mit hochschmelzenden Loten geplant. Die Verfahren reaktives Fügen und Widerstandsschweißen wurden wie geplant durchgeführt. Anstelle des Laserlöten wurden die Verfahren TLP Bonden und Silbersintern untersucht. Diese Verfahren wurden aufgrund Anregungen durch den Projektausschuss und durch neue Erkenntnisse aus anderen Projekten aufgenommen.

Die Substratherstellung erfolgte entgegen dem Antrag statt im MJM- Verfahren mittels Thermoformig, mit welchem sehr gute Ergebnisse erzielt wurden. Das generative Herstellungsverfahren DLP-Prozess wurde wie geplant durchgeführt. Hier ergab sich aufgrund der im prozessbedingten stufenförmigen Substratkanten eine für die Galvanik ungünstige starke Haftung. Dadurch konnten die galvanisch hergestellten Membranen schlecht abgelöst werden. Im Thermoforming Prozess sind die Kanten sehr glatt, das Ablösen der Membranen von den Substrate gelang erwartungsgemäß wesentlich besser.

Ansonsten wurden die Arbeiten wie geplant durchgeführt. Alle durchgeführten Arbeiten waren zur Erfüllung des Projektzieles notwendig. Dies zeigt sich am großen Interesse der Industrie an Demonstratoren für eigene Tests.



## 5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Nach Abschluss des Projektes stehen neben dem Drucksensor-Demokit, zum Evaluieren der Performance des medienbeständigen Drucksensors in realen Anwendungen, auch die einzelnen technologischen Schritte zur Verfügung. Diese Schritte umfassen neben der Fragestellung wie ein kapazitiver Sensor grundsätzlich ausgelegt werden kann auch die Schritte:

- Wahl einer geeigneten Ausleseelektronik für kapazitive Sensoren
- AVT Technologien Löten, reaktives Fügen, TLP Bonden, Schweißen, Silbersintern für die Sensormembran
- Herstellungstechnologien Tiefziehen und Galvanoforming für die Membran
- Membranauslegung für Drucksensoren allgemein
- Aufbau kapazitiver Sensoren mittels SMD-Bestückung auf Leiterplatte
- Gehäusetechnologien Duroplast-Spritzguss für große Stückzahlen bzw. Edelstahl oder Alugehäuse für kleinere Stückzahlen
- Programmierung der Ausleseelektroniken
- Kompensation und Kalibration von Sensoren

Der Zugriff auf diese Einzelschritte ermöglicht es KMU über die Anwendung des im Projekt entstandenen Drucksensors hinaus das erarbeitete Wissen anzuwenden.

Aufgrund der einfachen Aufbau- und Verbindungstechnik des medienbeständigen Drucksensors mittels klassischer SMD-Bestückung auf Leiterplatte, die bei vielen KMU entweder vorhanden ist oder bei externen Dienstleistern eingekauft werden kann, sind KMU nun in der Lage anwendungsspezifische Anwendungen der Druckerfassung wirtschaftlich auch bei kleinen Stückzahlen zu adressieren. Darüber hinaus lässt sich das Wissen wie ein kapazitiver Drucksensor auf Leiterplatte ausgelegt wird auch auf andere Sensoranwendungen übertragen. Dies wiederum versetzt KMU in die Lage neue Sensoranwendungen auf Basis kapazitiver Messtechnik oder Leiterplattenbasierter Sensoren zu erschließen.

Die Elektronikverkapselung mittels Duroplast-Spritzguss ist über die Anwendung des Drucksensors hinaus eine weitere neue Möglichkeit für KMU kosteneffiziente Gehäusetechniken für elektronische Baugruppen und Komponenten in harschen Umgebungsbedingungen zu realisieren. Der Zugriff auf Spritzgussanlagen ist durch viele KMU im Bereich Lohnfertigung/Spritzguss gegeben.

Die gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse des medienbeständigen Drucksensors wie z.B. die neuartigen Kompensationsmechanismen steigern die Kompetenz von Hahn-Schickard im Bereich der kapazitiven Sensoren. Dadurch können insbesondere KMU unterstützt werden um eigene Produkte entwickeln und in hoher Qualität aufbauen zu können. Weiterhin kann Hahn-Schickard auch bei der Auslegung und Herstellung von Funktionsmustern und Demonstratoren unterstützen, wodurch die Position von KMU weiter gestärkt wird.

Um mit einem Messprinzip in möglichst vielen Anwendungsfeldern erfolgreich zu sein, ist die Skalierbarkeit des Sensors eine Grundvoraussetzung. Ebenso wichtig ist die flexible Adaptierbarkeit der Sensorzelle in unterschiedlichste Aufbauten und Messumgebungen.

Ziel des Projekts SkalaD war es, die kapazitiven, leiterplatten-basierten Drucksensoren aus den Grundlagen zu einer skalierbaren Sensorfamilie für den Druckbereich von 100 mbar bis über 10 bar zu erweitern.

Hierzu wurden im Projekt SkalaD folgende technologische Neuheiten untersucht:

- Einsatz von galvanogeformten Federwerkstoffen zur schnellen und flexiblen Verfügbarkeit unterschiedlichster und hochpräziser Membrangeometrien.
- Implementierung kriechfester Fügeverfahren für die Sensormembran zur Verbesserung der Langzeitstabilität bei hohen Einsatzdrücken.

Das Interesse der Industrie spiegelt das große Potential des entwickelten Sensors aber auch der kapazitiven Sensorik im Allgemeinen wieder. Es wurden 4 Demonstratoren in anwendungsnahem Umfeld durch die Firmen Moosbach & Kanne, Bosch, Festo und Kyocera Automotive untersucht. Darüber hinaus steht Hahn-Schickard in zahlreichen Gesprächen mit Kunden, die sich die Expertise im Bereich kapazitiver Sensoren zunutze machen wollen.

## 6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft der schon durchgeführten sowie nach Projektende durchzuführenden Transfermaßnahmen

Tabelle 21: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme / Ziel	Ort	2018			2019			2020		
Information der PA-Unternehmen	Beratungsgespräche, PA-Treffen	■			■			■		
Beratung von Unternehmen	Austausch und Beratung	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Vorträge	Mitgliederversammlungen fem			■			■			
	Mitgliederversammlungen HS				■			■		
	ZVO-Oberflächentage					■				
Veröffentlichungen	Fachzeitschriften									■
	Vorträge und Poster									■
Demonstrator	HS und fem									■
Publikation im Internet	Homepages HS und fem		■			■			■	
Übernahme der Ergebnisse	in die akademische Lehre Uni Stuttgart									■
Personaltransfer	HS und fem	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabelle 22: Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Zeitraum	Maßnahme	Ziel / Bemerkung
2021	Jahresbericht Hahn-Schickard	Vorstellung der Projektergebnisse mit dem Ziel der Information eines möglichst großen Nutzer- und Anwenderkreises
2021	Hahn-Schickard Institutspräsentation	Übernahme der neuesten Projektergebnisse in die Institutspräsentation von Hahn-Schickard, die durchschnittlich 4-6 mal monatlich bei interessierten Partnern aus der Industrie und der Forschung gezeigt wird
2021	Akademische Lehre Hahn-Schickard und IZFM	Übernahme von Projektergebnissen in die akademische Lehre im Bereich der Mikrosystemtechnik / Sensorik

2021	Publikation in Fachzeitschriften, z.B. PLUS, ...	Vorstellung der Projektergebnisse mit dem Ziel der Information eines möglichst großen Nutzer- und Anwenderkreises
2021	Messen: Sensor und Test (virtuell) Hannover Messe (virtuell)	Präsentation von Demonstratoren auf Messen von Hahn-Schickard mit dem Ziel der Information eines möglichst großen Nutzer- und Anwenderkreises
ab 2021	Internetseite <a href="http://www.hahn-schickard.de">www.hahn-schickard.de</a>	Darstellung des gewonnenen Know-Hows im Bereich der kapazitiven Drucksensorik mit dem Ziel der Information eines möglichst großen Nutzer- und Anwenderkreises
2021	Mitgliederversammlung HSG	Vorstellung von Projektergebnissen an Firmen außerhalb des PBA
ab 2021	Wissenschaftliche Konferenz, z.B. Mikrosystemtechnik-Kongress, 4M conference	Präsentation von Projektergebnissen vor einem breiten Fachpublikum aus Wirtschaft und Wissenschaft
2021	Übernahme der Technologie in das Portfolio der PRONTO Plattform des Spitzencluster MicroTEC Südwest	Transfer der Ergebnisse an interessierte KMUs

## 6.1 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Es konnten bereits erste Umsetzungen in die betriebliche Praxis erreicht werden. Die Serienproduktion eines aus dem Drucksensor abgeleiteten haptischen Sensors für ein innovatives HMI im Lenkrad des Elektroautos Volkswagen ID3 läuft bereits.

Durch die Bereitstellung von Sample Kits zur Evaluierung kann der Transfer in die Industrie beschleunigt werden. Für das KMU Moosbach & Kanne wurde ein solches Sample Kit für einen Einsatz in Chemikaliertanks aufgebaut. Hier stellt die medienbeständige Wandlermembran aus Edelstahl eine Voraussetzung für den Einsatz dar. Gegenüber der bisherigen Lösung der Erfassung mittels mehrerer Schwimmschalter kann der Füllstand nun wesentlich höher aufgelöst und durch ein einzelnes Sensorelement erfasst werden. Hier ist eine zukünftige Kleinserienfertigung denkbar.

Weitere Sample Kits zur Evaluierung konnten den Firmen Festo, Kyocera Automotive und Bosch zur Verfügung gestellt werden. Dies zeigt auch hier ein Interesse an einer Serienumsetzung.

Neben den Anwendern der Drucksensoren erfolgt der Technologietransfer entlang ganzen Wertschöpfungskette durch die Mitglieder des Projektausschusses. Die Firma Binder Elektronik kann Erweiterungen der Sensorelektronik mit unterschiedlichen Schnittstellen für Industrie 4.0 Anwendungen entwickeln. Für die Firma Nanojoin ist der Drucksensor eine innovative Anwendung der Pasten fürs drucklose Sintern. Die Firma Schweizer Elektronik berät bei der Auslegung und liefert die Leiterplatten. Als Berater und Multiplikator stellt das Ingenieurbüro Bingel die Drucksensortechnologie einem größeren Kundenkreis vor.

## **6.2 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen**

Die hier beschriebenen Ergebnisse konnten während der Projektlaufzeit genutzt werden, um diese bei Konferenzen und Workshops zu präsentieren. Es konnten mehrere Vorträge gehalten werden:

- Dr. R. Freudenberger: fem Mitgliederversammlung 2018
- H. Willing: fem Mitgliederversammlung 2019
- K. Johnson: ZVO Oberflächentage 2019, Berlin
- E. Pflug: 27. NDVak 2021

Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden bislang folgende Publikationen geschrieben, welche in referierten Journalen bereits veröffentlicht, angenommen bzw. eingereicht wurden:

- Johnson et al.: Mechanische Eigenschaften von galvanogeformten CuSn10-Folien, Galvanotechnik (2021) [erscheint im April 2021]
- A. Schwenck et al.: PCB Based Pressure Sensor with Metal Membrane, MPDI Sensors, [Einreichung im Juli 2021]

Eine Zusammenfassung der Projektergebnisse erfolgte in diesen Medien:

- fem – Jahresbericht 2018, Jahresbericht 2019, Jahresbericht 2020
- Homepage des fem [www.fem-online.de](http://www.fem-online.de)
- Homepage von Hahn-Schickard [www.hahn-schickard.de](http://www.hahn-schickard.de)
- Bewerbung um den Otto von Guericke Preis der AiF 2021

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] "Anleitung der Elektrolyt Miralloy 3849." [Online]. Available: <https://ep.unicore.com/de/>.
- [2] "Anleitung der Elektrolyt Cu 830." [Online]. Available: <https://ep.unicore.com/de/>.
- [3] K. Sato, Tetsuro; Asai, Tsutomu; Iwakiri, "Resin-coated composite foil, production and use thereof," 6652962, 2003.
- [4] V. für das F. für E. und M. e. V.- FEM, "Entwicklung eines neuen Verfahrens für die kostengünstige Fertigung von Bipolarplatten mit Hilfe galvanogeformter Spritzgusswerkzeuge," Schwäbsich Gmünd, 2010.
- [5] G. Abadias *et al.*, "Review Article: Stress in thin films and coatings: Current status, challenges, and prospects," *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 36, no. 2, p. 020801, 2018.
- [6] M. Saitou, "Internal stress in nickel thin films electrodeposited by a rectangular current pulse technique," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 10, no. 7, pp. 5639–5649, 2015.
- [7] D. A. Skoog and J. J. Leary, *Instrumentelle Analytik*, 4th ed., vol. 18, no. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [8] A. J. Garratt-Reed and D. C. Bell, *Energy-Dispersive X-Ray Analysis in the Electron Microscope*. Garland Science, 2003.
- [9] W. Grimm, "Eine neue glimmentladungslampe für die optische emissionsspektralanalyse," *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 23, no. 7, pp. 443–454, Jun. 1968.
- [10] Deutsches Kupferinstitut, "Kupfer-Zinn- Knetlegierungen (Zinnbronzen )," 2004.
- [11] Deutsches Kupferinstitut, "CuSn10-C Werkstoffdatenblatt."
- [12] Deutsches Kupferinstitut, "CuSn8 Werkstoffdatenblatt," 2005.
- [13] Deutsches Kupferinstitut, "Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zinn-Zinn- Gusslegierungen (Zinnbronzen)," 2004.
- [14] Metalle Schmidt, "Kupfer Datenblatt." [Online]. Available: <https://metalprice.metalleschmidt.de/de>.
- [15] P. S. G. Merseburg, "Instrumentierte Härteprüfung- Methode Kenngrößen," 2019. [Online]. Available: [https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Instrumentierte\\_Härteprüfung\\_-\\_Methode\\_Kenngrößen](https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Instrumentierte_Härteprüfung_-_Methode_Kenngrößen). [Accessed: 18-Nov-2019].
- [16] K. Prof. Dr. Wegener, "Kriechen, Wärmebehandlung," 2016.
- [17] S. Fürtauer, D. Li, D. Cupid, and H. Flandorfer, "The Cu–Sn phase diagram, Part I: New experimental results," *Intermetallics*, vol. 34, pp. 142–147, Mar. 2013.
- [18] T. Watanabe, *Microstructure Control Theory of Plated Film and Data Base of Plated Film Microstructure*. 2004.
- [19] Edelstahlwerke Deutsche, "Acidur 4571 - Werkstoffdatenblatt X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571," 2015.