

Sachbericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt

„**A**dditive **F**ertigung als Alternative zur Herstellung von 3D-MID LDS **K**omponenten für
Prototypen und wirtschaftliche Kleinserien (**AFeKt**)“

Inhalt

| | |
|--|----|
| Ziel des Vorhabens..... | 3 |
| FuE-Problem | 3 |
| Einordnung des Vorhabens in das Gesamtprojekt..... | 5 |
| Kurzübersicht der Ergebnisse der Arbeitspakete..... | 6 |
| AP1 Konzeption und Recherche..... | 7 |
| AP2 Druckparameter Evaluierung..... | 13 |
| AP3 Temperaturmessung..... | 15 |
| AP4 Temperierung | 28 |
| AP5 Einbettung von aktiven Strukturen | 36 |
| AP6 Füllstandsermittlung, Medienanalyse | 38 |
| AP7 Ultraschall-Anregung: Konzipierung des EMUS (elektromagnetischer Ultraschallwandler) | 44 |
| AP8 Ultraschall-Anregung: Herstellung und Erprobung des EMUS | 51 |
| AP9 Kontaktlose Energieübertragung | 58 |
| AP10 Demonstrator | 70 |

Ziel des Vorhabens

FuE-Problem

Kunststoffe aller Art, wie Polycarbonat (PC), Polyvinylchlorid (PVC) oder Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) finden in den unterschiedlichsten Industriebereichen als einfache Verpackungsmaterialien, Baustoffe oder Schaltungsträger ihre Anwendung. Dabei kommen diese hauptsächlich als passive und nicht smarte/intelligente Elemente zum Einsatz. Neuartige additive Fertigungsverfahren wie die Kombination aus 3D-Druck mittels „Fused Deposition Modeling“-Technologie, kurz FDM, und der Laser-Direktstrukturierung, kurz LDS, können zukünftig simple Kunststoffelemente in smarte Funktionseinheiten überführen, die neben ihrer eigentlichen Funktion als Trägerelement zusätzliche Anwendungsfunktionen ermöglichen. Dazu enthalten die Kunststoffe noch Zusatzbestandteile, wie Farbpartikel, Glasfasern oder laseraktivierbare Spezialadditive.

Aktuell werden diese laseraktivierbaren Spezialkunststoffe aus Granulaten mittels Spritzguss (injection molding) in eine dreidimensionale Form überführt oder nicht aktivierbare Kunststoffe mit einem Spezialadditivlack (LPKF Protopaint) lackiert, um diese für den Laser-Direktstrukturierungs-Prozess nutzbar zu machen. Das sogenannte LDS-Verfahren ermöglicht erst den Aufbau von elektrifizierten Funktionselementen auf dem Kunststoff, also die Integration von Schaltungsstrukturen, Aktuatoren und Sensoren.

Die beschriebenen beiden Herstellungsverfahren, Spritzguss und Lackierung, ermöglichen die Herstellung von komplexen elektrischen 3D-Schaltungsträgern. Dazu werden die zuvor präparierten Kunststoffteile in einer Kombination aus Laser-Prozess und anschließender außenstromloser Galvanik (chemische Abscheidung) veredelt und mit einer elektrisch leitenden Metallschicht partiell beschichtet. Abbildung 1 veranschaulicht diesen Prozess.

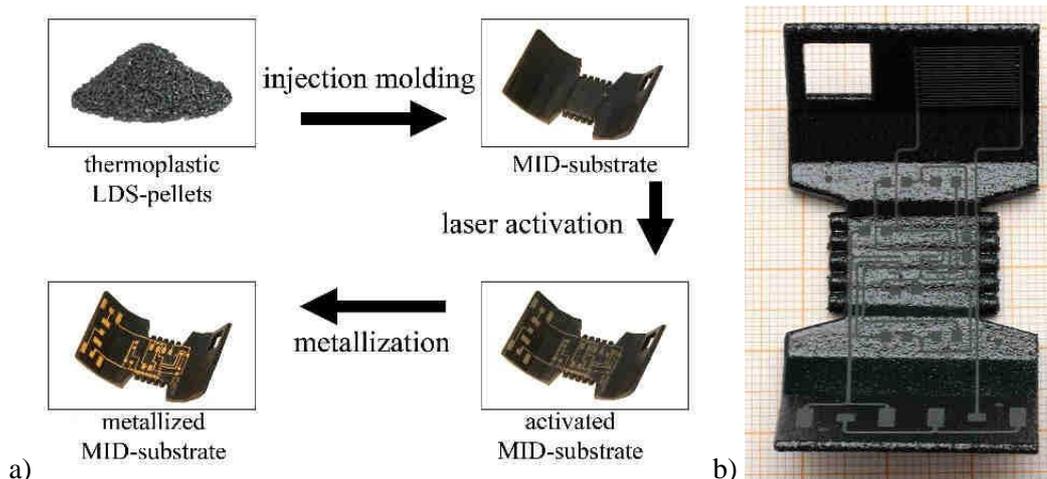


Abbildung 1: Herstellung dreidimensionaler elektrischer Schaltungsträger aus Kunststoff-Pellets: a) LDS-Spritzguss-Prozess [1]; b) Gedruckter Träger mit Protolack lackiert und per Laser aktiviert

Spritzguss und Lackierung bergen jedoch unterschiedliche Nachteile und begrenzen den Einsatz der LDS-Technologie. Diese damit verbundenen Herausforderungen für die Forschung und Entwicklung neuartiger Verfahren sind:

- Die Kosten: Die Herstellung der notwendigen Spritzgusswerkzeuge ist in hohem Maße Kosten verursachend (> 5 T€, ca. 30T€ - 60T€ bei engeren Toleranzen und komplexeren Geometrien (Schieberelemente)) und zeitintensiv. Sie lohnt sich wirtschaftlich nur bei einem bereits validierten Design sowie einer großen Stückzahl an Bauteilen (>> 10.000), bei einem Kostenpunkt pro Kunststoffteil zumeist kleiner 10 Cent.
- Die Applikationsanwendung: Die o.g. 2-Komponenten Speziallackierung von LPKF (Protopaint) ermöglicht zwar die Anwendung der LDS-Technik auf nichtaktivierbaren Kunststoffen, ist jedoch aufgrund des Applikationsprozesses (sprühen) schwierig zu handhaben. Neben der teils schlechten Haftung auf den zu verwendenden Kunststoffteilen wird zur Applikation eine sehr reine Umgebung und ein zusätzliches Abluftsystem benötigt, da die im Lack enthaltenen Lösemittel giftig für den Menschen sind. Zugleich ist der Prozess mit 75 € Preis pro Sprühdose sehr kostenintensiv. Auch führen geometrische Facetten, wie z.B. Kavitäten oder konkave Ecken, zu Lackansammlungen und somit zu einer inhomogenen Beschichtung. Der zu verwendende 2-Komponenten-Ansatz ist nach jedem Anbruch nur eine begrenzte Zeit nutzbar und verringert so die weitere Ausbeute bzw. erhöht die Fabrikationskosten.

Heute ist es nun möglich, diese Spezialadditive ebenfalls in Kunststoffe wie ABS, PC und Polyetheretherketon (PEEK) zu integrieren und in eine 3D-Druck-fähige Filamentform zu überführen. Erste Produkte sind am Markt verfügbar. Die 3D-gedruckten (statt bisher spritzgegossenen) Strukturen werden wie zuvor beschrieben an den zu aktivierenden Bereiche, z.B. Leiterstrukturen, Laser-belichtet und das Additiv somit aktiviert. Durch die nachfolgende chemische Abscheidung des gewünschten Metalls bilden sich die Zielstrukturen aus. Dieses neuartige Fertigungsverfahren in Kombination von 3D-Druck und Laser-Direktstrukturierung (folgend: **AMID-LDS** (Additive Manufactured Interconnect Device-Laser Direct Structuring)) umgeht die oben aufgeführten Nachteile in der Fertigung funktionaler Kunststoffelemente und kann neue Freiheitsgrade in der kostengünstigen und zugleich seriennahen Fertigung von Prototypen und Kleinserien etablieren. Die Hersteller von LDS-Polymeren haben diesen Trend auch als sinnvolle Erweiterung der aktuell bestehenden Verfahren identifiziert und arbeiten zusammen mit Herstellern von additiven Fertigungsmaschinen (z.B. Apium Additive Technologies GmbH) ständig daran, weitere Materialien von dem Spritzgussprozess in die Filament-basierte additive Fertigung zu überführen. Hierzu sind allerdings Änderungen an der Grundrezeptur der Materialien notwendig, weshalb sich die Erfahrungen, die mit den Materialien auf der Basis von spritzgegossenen Grundkörpern gesammelt wurden, nur bedingt für Prozessierung von gedruckten Grundkörpern anwenden lassen. Hinzu kommen technologiespezifische Abweichungen, wie eine fehlende Spritzhaut sowie die prinzipbedingte geschichtete Struktur der Grundkörper.

- Von einer Marktreife kann bei dieser Technologie noch nicht ausgegangen werden. Daher haben sich beide Partner im beantragten Vorhaben mit den grundlegenden fertigungsspezifischen Fragestellungen des **AMID-LDS** Verfahrens im Allgemeinen und mit jeweils relevanten Zielanwendungen (vgl. 0) im Speziellen auseinandergesetzt, um zur Marktreife zu gelangen.

Einordnung des Vorhabens in das Gesamtprojekt

Die TEPROSA GmbH strebte mit Unterstützung der Universität Magdeburg die Etablierung einer leistungsfähigen Prozessplattform für die Integration von elektrischen und mechanischen Funktionselementen in dreidimensionalen Systemen mittels **AMID-LDS** Verfahren an. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf eine wirkungsvolle Weiterentwicklung der oben schon genannten, aktuell mangelhaften Prototypenverfahren für die 3D-MID-LDS Technologie gelegt. Darüber hinaus sollten die entwickelten Verfahren so weit validiert werden, dass sie die Anforderungen für den Einsatz in Serienanwendungen erfüllen und somit für niedrige und mittlere Stückzahlen bei der Herstellung des Grundkörpers eine Alternative zu dem mit hohen Initialkosten verbundenen Spritzgießen von Kunststoff darstellt. Größere Anzahl an Freiheitsgrade in der additiven Fertigung sollten genutzt werden, um den Funktionsumfang der hergestellten Systeme über das aktuell mögliche Maß zu erweitern. Neue Aspekte waren dabei:

- Reduzierung von Gewicht und Material durch die additive Fertigung der Grundkörper und des dadurch vereinfachten Umgangs mit Hinterschnitten
- Etablierung einer Mehrlagenverdrahtung durch einen rekursiven additiven Fertigungsablauf aus den Schritten
 - Polymer drucken ←
 - Laserstrukturieren + Via bohren
 - Metallisierung
- Einbetten von elektronischen Funktionselementen (Energiespeicher, Elektronikkomponenten, Sensor- und Aktorelemente)
- Verwendung von weiteren Funktionsmaterialien (Mehrmaterialsystem)
- Hermetisch abgeschlossene Systeme durch Überdrucken (Drahtlose Energie- und Datenübertragung)

Hierzu sollten die bei der TEPROSA GmbH vorliegenden fundierten Erfahrungen in der Herstellung von MID/LDS-Baugruppen hinsichtlich der oben genannten neuen Möglichkeiten gemäß dem Arbeitsplan des Projektes erweitert und im Zusammenspiel mit den systemischen Anforderungen der Applikationen des Projektpartners OvGU optimiert werden.

Die OvGU zeichnete für den 3D-Druck und die anwendungsbezogene Parametrierung des Druckprozesses verantwortlich. Im Hinblick auf die Realisierung der verschiedenen Sensor- und Aktuatoranwendungen werden an der Universität dementsprechende Funktionsträger designt und gedruckt. TEPROSA sollte die für die anschließende Laseraktivierung, Metallisierung und Nachbehandlung notwendigen technologischen Verfahren entwickeln und anwenden. Dabei stellten insbesondere Mehrlagensysteme und die hybride Einbettung von Funktionselementen eine Herausforderung dar. Die OvGU wiederum führte an den gefertigten

Strukturen Versuchsreihen durch, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit in der jeweiligen Anwendung zu bewerten.

Arbeitspakete der OVGU

Tabelle 1: Bearbeitungsstand der Arbeitspakete der OVGU

| AP | Kurztitel | Zeitraum (geplant) | Zeitraum ¹ (angepasst) |
|----|--|-----------------------|--------------------------------------|
| 1 | Konzeption und Recherche | 01/20-02/20 | 05/20-06/20 |
| 2 | Druckparameter Evaluierung | 02/20-05/20 | 06/20-09/20 |
| 3 | Temperaturmessung | 04/20-07/20 | 08/20-11/20 |
| 4 | Temperierung | 05/20-08/20 | 09/20-12/20 |
| 5 | Einbettung von aktiven Strukturen | 08/20-12/20 | 12/20-04/21 |
| 6 | Füllstandsermittlung, Medienanalyse | 09/20-02/21 | 01/21-06/21 |
| 7 | Ultraschall-Anregung: Konzipierung des EMUS | 01/21-04/21 | 05/21-08/21 |
| 8 | Ultraschall-Anregung: Herstellung und Erprobung des EMUS | 03/21-08/21 | 08/21-12/21 |
| 9 | Kontaktlose Energieübertragung | 07/21-10/21 | 11/21-02/22 |
| 10 | Demonstrator | 09/21-12/21 | 01/22-04/22 |
| 11 | Systembewertung und Ausblick | 11/21-12/21 | 03/22-04/22 |

¹Aufgrund des um vier Monate verspäteten Projektstarts des Lehrstuhls Messtechnik haben sich die Arbeitspakete zeitlich verschoben, sodass eventuell eine Verlängerung des Projektes erfolgen muss. Zukünftige Arbeitspakete konnten bereits bearbeitet werden, wenn Teilarbeiten für das Arbeitspaket erfolgt waren.

AP1 Konzeption und Recherche

Markt-, Literatur-, Material-, Prozessrecherchen

Das Fused Deposition Modeling (FDM) ist eine 3D-Drucktechnologie, bei der Teile horizontal und vertikal gedruckt werden, während sich die Extrusionsdüse über die Bauplattform bewegt.

Die Technologie ermöglicht die Verwendung verschiedener thermoplastischer Materialien, die sich je nach Anwendungsbereich auch in ihren Eigenschaften unterscheiden. Einige Thermoplaste sind leitfähig. Die folgenden Materialien sind die am häufigsten verwendeten:

- **Protoplant - Proto-Pasta PLA-basiertes leitfähiges Kohlenstoff-Filament**
- **MULTI3D - Elektrisch leitfähiges Filament**
- **Black Magic 3D - leitfähiges PLA-Filament auf Graphenbasis.**

Durch Nutzung von Metallzusätzen im Filament können elektrischen Schaltkreisen und Leiterbahnen strukturiert werden. Dabei müssen die Qualität des Filaments und seine mechanischen und physikalischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Nachstehend sind die Eigenschaften der am häufigsten verwendeten leitfähigen Filamente aufgeführt (Tabelle 2)

Tabelle 2: Eigenschaften ausgewählter leitfähiger Filamente

| Filament | Besteht aus | Durchschnittlicher Widerstand (Ω cm) |
|-----------------|--|--|
| Electrifi | proprietärer Metall-Polymer-Verbundstoff, der hauptsächlich aus einem biologisch abbaubaren Polyester und Kupfer besteht | 0,0061 |
| Black Magic 3D | PLA-Basis, verbessertes Graphen für hervorragende Leitfähigkeit | 0,6 |
| Proto-pasta PLA | Mischung aus Nature-works 4043 PLA, einem Dispergiermittel und leitfähigem Ruß | 30 |

Filamente besitzen spezielle Eigenschaften beim 3D-Druck, deshalb ist es zwingend erforderlich, die vom Hersteller angegebenen technischen Daten, zu beachten. Natürlich ist es auch möglich, bei experimentellen Aufbauten die Parameter selbständig anzupassen und die geeignetsten Parameter auszuwählen. Die folgenden Druckparameter werden zur Herstellung von 3D-gedruckten Bauteilen verwendet (Tabelle 3):

Tabelle 3: Druckparameter zur Herstellung von 3D-gedruckten Bauteilen

| Filament | Drucktemperatur [$^{\circ}$ C] | Druckgeschwindigkeit [mm/s] | Düsengröße [mm] | Substrate |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------|--|
| Electrifi: | | | | PC, PLA, ABS, polystyrene, nylon, PET, PVC |
| - 1,75 mm | 140 – 160 | 15 – 45 | 0,8 | |
| - 2,85 mm | 130 – 150 | 10 – 30 | 0,5 | |
| Black Magic 3D | 195 - 200 | 35 | 0,5 | PLA, ABS |
| Proto-pasta PLA | 215 - 230 | 20 - 40 | 0,4 0,8 | PLA, nylon |

Um leitendes Material für ein bestimmtes Anwendungsfeld einzusparen, kann ein Grundmaterial und eine doppelte Extrusion verwendet werden (Verwendung von zwei Materialien beim Druck gleichzeitig). Für diesen Anwendungsfall ist das Grundmaterial im ersten Extruder und das leitende Material im zweiten Extruder eingelegt. Bei der Verwendung

der Doppel-Extrusion müssen die Druckeinstellungen für beide Filamente berücksichtigt werden. Folgende Parameter sind signifikant: die Drucktemperatur, die Druckgeschwindigkeit, die Infilldichte, das Infill-Muster, die Kühlung und das Schnittmodell.

Die Kombination verschiedener Materialiendrucktemperaturen wirkt sich auf die Bindung von zwei Filamenten aus. Daher sollte es ungefähr der gleiche Temperaturwert sein, um das Abschälen und Biegen des Materials während des Druckens zu vermeiden.

Die Düsengröße ist ebenfalls entscheidend. Je größer der Durchmesser ist, desto leichter kann das Material hindurch laufen, was aufgrund der hohen Drucktemperatur des leitenden Filaments (variiert zwischen 250 und 280 ° C) wichtig ist. Auch Verunreinigungen und Verstopfungen der Düse können somit vorgebeugt werden. Die Düse sollte aus einem speziellen Metall bestehen, das einerseits den hohen Temperaturen standhalten kann und andererseits nicht von abrasiven Filamentpartikeln beschädigt wird. Die Druckgeschwindigkeit wird entsprechend den Standards gewählt, damit es zu keiner Verstopfung kommt.

Bei der Arbeit mit leitfähigem Filament muss während des direkten Drucks besondere Aufmerksamkeit auf seine Lagerung und Umgebungsbedingungen gelegt werden, da das Material sehr empfindlich auf Feuchtigkeit und Staub reagiert. Vor dem Drucken muss das Filament getrocknet und in eine Trockenbox gelagert werden, welche ein konstantes Niveau der Luftfeuchtigkeit aufrechterhält (ungefähr 10%). Dadurch kann das Filament längere Zeit verwednet werden und ändert seine Eigenschaften nicht.

Leitendes Filament und seine Vorteile:

- Fähigkeit, Elektroden verschiedener Geometrien zu erzeugen
- breiter Anwendungsbereich
- Niedriges Gewicht für spezielle Anwendungsbereiche
- Möglichkeit der Durchführung eines zusätzlichen Galvanisierungsprozesses (Kupfer) zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit, der Verringerung der Oberflächenrauigkeit durch Zugabe von organischen Zusätzen, die Verbesserung der thermischen Stabilität, keine Lithographie erforderlich.

Nachteile:

- nicht so leitfähig wie Metalle,
- Oberflächenrauheit,
- begrenzte Mindestschichtdicke,
- recht teuer im Vergleich zu Standard-ABS- oder PLA-Filamenten,
- spröder als Standard-Kunststoff-Filament, zusätzliche Lagerbedingungen erforderlich,
- empfindlich gegenüber hoher Luftfeuchtigkeit,
- Haftung mit anderen Materialien (begrenzte Menge an Filament für das Substrat),
- Leckage bei geklebten Teilen,
- nicht flexibel, weniger bedruckbare Materialien mit verbesserter Dehnungsfähigkeit.

Leitfähige Thermoplaste können die Kosten im Allgemeinen erheblich senken, sie ermöglichen es auch, den Herstellungsprozess zu beschleunigen, und 3D-Strukturen können z. B. nur einmal verwendet werden. Die Anwendungen für leitfähige Thermoplaste können unterschiedlich sein:

- Medizinische Geräte
- Flexible und tragbare Elektronik
- LED-Stromversorgung und Niederspannungsschaltungen
- Berührungssensoren, kapazitive Sensoren
- Telekommunikation (EMI/RF-Abschirmung, RF-Antennen, RF-Filter und andere kundenspezifische RF-Komponenten)
- Luft- und Raumfahrt
- Kraftfahrzeuge

Quellen:

1. 3D-printed supercapacitor-powered electrochemiluminescent protein immunoarray, *Biosens. Bioelectron.*, 2016, 77, 188–193, doi.org/10.1016/j.bios.2015.09.017.
2. 3D-Printed Biosensor Arrays for Medical Diagnostics, *Micromachines* 2018, 9, 394; doi:10.3390/mi9080394.
3. 3D Printing Technologies for Flexible Tactile Sensors Toward wearable Electronics and Electronic Skin, *Polymers* **2018**, 10, 629; doi:10.3390/polym10060629.
4. 3D printed stretchable capacitive sensors for highly sensitive tactile and electrochemical sensing, *IOP Publishing Nanotechnology* 29 (2018), doi.org/10.1088/1361-6528/aaafa5.
5. PLA conductive filament for 3D printed smart sensing applications, *Rapid Prototyping Journal*, ISSN: 1355-2546, doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0150.
6. Embedded sensing: integrating sensors in 3-D printed structures, *J. Sens. Sens. Syst.*, 7, 169–181, 2018 doi.org/10.5194/jsss-7-169-2018.
7. Fabrication of highly conductive graphene flexible circuits by 3D printing, *Synthetic Metals* 217 (2016) 79–86, dx.doi.org/10.1016/j.synthmet.2016.03.014.
8. 3D printable conductive materials for the fabrication of electrochemical sensors a mini review, *Electrochemistry Communications*, [Volume 96](#), November 2018, Pages 27-31, doi:10.1016/j.elecom.2018.09.006.
9. Applications of conducting polymer composites to electrochemical sensors: a review, *Applied Materials Today* 9 (2017) 419–433, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmt.2017.09.001>.
10. A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors, doi:10.1371/journal.pone.0049365.
11. Design and development of a flexible strain sensor for textile structures based on a conductive polymer composite, *Sensors* **2007**, 7, 473-492.
12. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament, *Additive Manufacturing* 18 (2017) 156–163, doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.002.
13. Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors, *Applied Materials Today* 9 (2017) 167–175, doi.org/10.1016/j.apmt.2017.07.001.
14. Three-Dimensional Printing of a Complete Lithium Ion Battery with Fused filament Fabrication, *ACS Appl. Energy Mater.* 2018, 1, 5268–5279, DOI: 10.1021/acsaem.8b00885.
15. Computational microwave imaging using 3D printed conductive polymer frequency-diverse metasurface antennas, *IET Microw. Antennas Propag.*, 2017, Vol. 11 Iss. 14, pp. 1962-1969, doi: 10.1049/iet-map.2017.0104.
16. 3D Conductive Polymer Printed Metasurface Antenna for Fresnel Focusing, *MDPI*

Designs **2019**, 3, 46; doi:10.3390/designs3030046.

17. Parametric study of 3D additive printing parameters using conductive filaments on microwave topologies, IEEE Access, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2932912](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932912).

18. Microwave metamaterials made by fused deposition 3D printing of a highly conductive copper-based filament, Applied Physics Letters 110, 181903 (2017), [dx.doi.org/10.1063/1.4982718](https://doi.org/10.1063/1.4982718).

19. Microwave metamaterials made by fused deposition 3D printing of a highly conductive copper-based filament, Appl. Phys. Lett. **110**, 181903 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4982718>.

20. One-step electrodeposition of copper on conductive 3D printed objects, Additive Manufacturing 27 (2019) 318–326, doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.016.

21. Selective electroplating for 3D-printed electronics, *Adv. Mater. Technol.* 2019, 4, 1900126, DOI: 10.1002/admt.201900126.

22. Advantages of Fused deposition modelling for making electrically conductive plastic patterns, 2010 International Conference on Manufacturing Automation, DOI 10.1109/ICMA.2010.36.

Die Kombination der beiden Technologien (FDM und LDS) ermöglicht es, nur ein Filament (Xantar LDS 3764) zu verwenden, auf dem die entworfenen zukünftigen elektrischen Schaltungen, bestimmte Anschlusspunkte für den Einbau zusätzlicher elektronischer Komponenten mit dem Laser ausgebrannt werden.

Das Polycarbonatmaterial Xantar LDS 3764 enthält Additive, die durch die Laserstrukturierung aktiviert werden können. Der Laserstrahl „brennt“ Bereiche aus vorgegebenen CAD-Dateien aus und erzeugt eine mikrorauhe Struktur (Muster). Auf diese Weise werden die elektrischen Leiterbahnen auf die vom Laser markierten Bereiche aufgebracht, andere Bereiche des Grundkörpers bleiben unverändert (nicht aktiviert).

Dieser Vorgang löst eine chemische Reaktion aus, bei der die nachlaufenden Metallpartikel die Keime für die spätere Metallisierung bilden. Zusätzlich zur Aktivierung erzeugt der Laser eine mikro-aufgeraute Oberfläche, in der sich das Kupfer während der Metallisierung fest verankert. Die Metallisierung der Bauteile (stromlose Beschichtung) erfolgt in stromlosen Kupferbädern. Die gewünschte Dicke der Kupferschicht kann durch Veränderung der Einwirkzeit in den Bädern beeinflusst werden. Das Kupfer kann mit einer Nickelschicht und einer dünnen Goldschicht überzogen werden, um beste Lötseigenschaften zu gewährleisten. Der Schritt der stromlosen Beschichtung liefert auch eine Rückmeldung über die Laserintensität. Je nach Intensität der Laserquelle kann der Beschichtungsvorgang sofort beginnen oder unterbrochen werden.

Die wichtigsten Druckparameter für das Xantar LDS 3764 Filament:

- Drucktemperatur 260-280 °C
- Druckbetttemperatur 105-110 °C
- Durchflussmenge 95-100%
- Druckgeschwindigkeit 50-70 mm/s
- Höhe der gedruckten Schicht von 0,1-0,4 mm
- Druckdüse 0,4 mm (es ist nicht möglich, eine 0,25 mm Düse zu verwenden, um Verstopfungen zu vermeiden)
- Verwendung einer selbstklebenden Folie, damit das Material besser auf der Heizglasplatte (Druckbett) haftet und sich das Modell nach dem Druck besser abziehen lässt

Auch bei der Laserstrukturierung ist es notwendig, darauf zu achten:

- Auswahl der Parameter des Lasers auf der Grundlage der bereits ermittelten Parameter je nach verwendetem Material: Frequenz, Geschwindigkeit und Wertschraffur (Abbildung 2)
- Schneiden des Modells (mit Schraffur)
- Erstellen eines Halters bei 2D/3D-Modellen
- Oberfläche reinigen und Laseraktivierung durchführen.

Der nächste Schritt nach der Laseraktivierung ist die Vorbereitung der Proben für die stromlose Verkupferung (Abbildung 3), die Folgendes umfasst:

Auswahl der Parameter, um die erforderliche Kupferschichtdicke zu erreichen

- Reinigung der hergestellten Modelle
- Vorbereitung der Lösung für das Eintauchen des Modells in das Kupferbad
- Reinigung der Modelle nach einem Kupferbad
- Überprüfung der resultierenden Kupferschicht

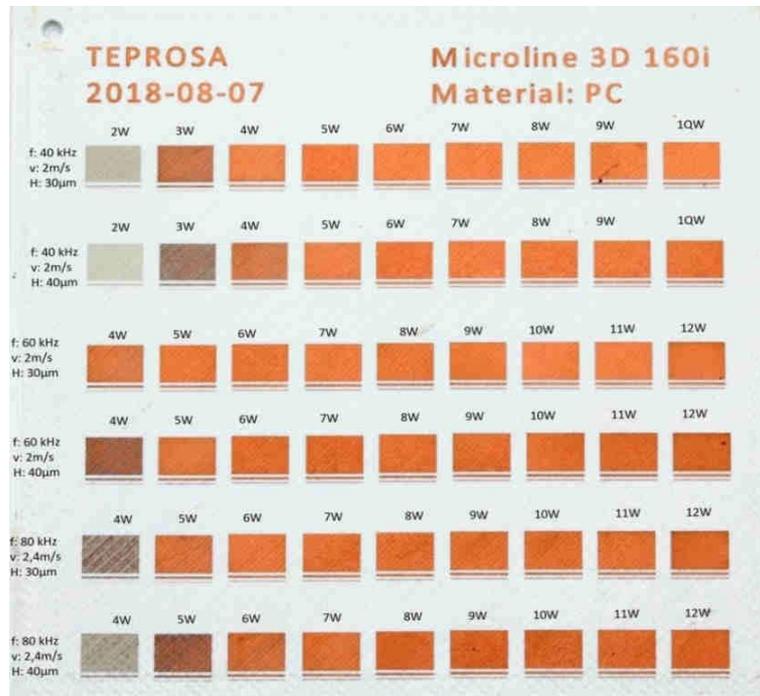


Abbildung 2: Ermittelte Parameter für den Laserbetrieb (Teprosa GmbH)

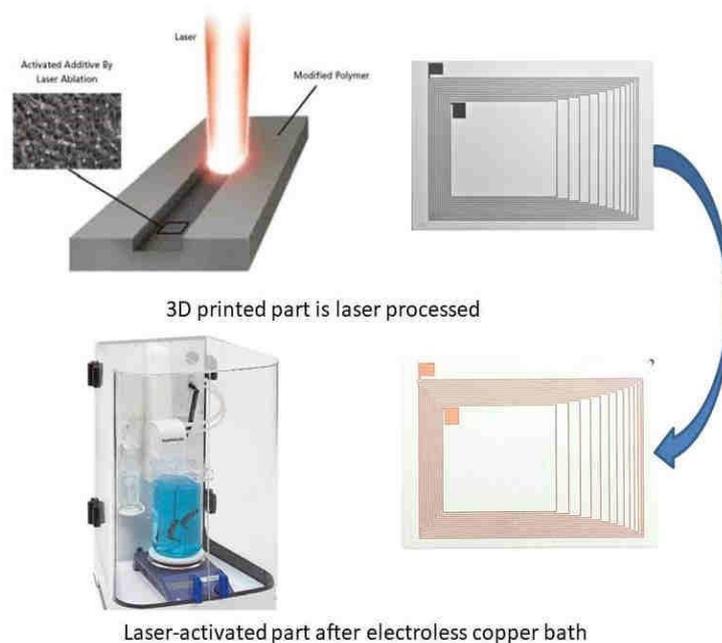


Abbildung 3: Schematische Darstellung: von der Laseraktivierung bis zur Kupferschicht

AP2 Druckparameter Evaluierung

Die fertigungstechnische Grundlage zur additiven Fertigung von Zielstrukturen durch Nutzung verschiedener passiver Filamente (z.B. ABS, PLA) oder dem aktiven (Laser-aktivbaren) Filament wurde erarbeitet. Dazu erfolgten grundsätzliche Tests:

- Aufdrucken von Laser-aktivierbarem Filament (LDS-Filament) auf passive Standardfilamente, die als Trägerstruktur (im Folgenden „Matrix“) dienen und Optimierung von Druckparametern, u.a.:
 - Düsen- und Heizbett Temperatur
 - Art und Dauer der Luftkühlung
 - „Massendurchsatz“ des Filaments, Fahr- und Druckgeschwindigkeit des Druckerkopfs
 - Schichthöhe
 - Solidität des zu druckenden Objekts (sog. „infill“)
- Aufdrucken von LDS-Filament auf planare einlagige (2D) Matrixstrukturen mit geringer geometrischer Komplexität
- Aufdrucken von LDS-Filament auf 3D Strukturen mit geringer geometrischer Komplexität:
 - Offene Kanalstrukturen: im Matrixmaterial geformte schmale (mm), gestreckte Vertiefung
 - Geschlossene Kanalstrukturen: mittels Stütz-Filament im Matrixmaterial eingebettete quadratische Hohlstrukturen mit geringerem Durchmesser (mm)
- Methode zur Erzeugung von CAD Daten für alle Laser-Aktivierungsprozesse im Vorhaben

Für die Entwicklung und Umsetzung der Arbeiten wurde das Material Xantar LDS 3764 von MEP verwendet. Dieses war in verschiedenen Farbtönen verfügbar, weiß und grau. Ein signifikanter Unterschied konnte weder im Druck- noch Metallisierungsbild festgestellt werden.

Als Drucker kamen sowohl der Ultimaker 3 sowie der Ultimaker 3 Extended mit den Düsen AA 0,25, AA 0,4 und AA 0,8 des Lehrstuhls Messtechnik zum Einsatz.

Die Druckversuche teilten sich bisher in zwei Ebenen (Level) auf:

- Level 1 - Druck in einer Ebene
- Level 2 - Überdrucken von Level 1

Die evaluierten Druckparameter für Level 1 sind:

- Düse: 0,4 AA
- Drucktemperatur [°C]: 280
- Plattentemperatur [°C]: 105
- Druckgeschwindigkeit [mm/s]: 50
- Materialfluss [%]: 95
- Schichtdicke [mm]: 0,1
- Düsendurchmesser [mm]: 0,4

- Drucker: Ultimaker 3, Ultimaker 3 Extended
- Adhäsionshilfe: Prittstift, Adhäsionsfolie

Die Druckparameter für Level 2 konnten noch nicht abschließend optimiert werden. Noch offene Aspekte sind:

1. X-, Y- und Theta-Alignment zwischen Druckebenen noch nicht zuverlässig:
 - a. Gedruckter Rahmen lässt zwar ein Alignment zu, doch die Bauteilgrößen- ungenauigkeit lässt bisher ein Alignment von schlechter als +0,5 mm in x- und y-Richtung zu
 - b. Theta-Alignment konnte nicht abschließend genau optimiert werden
2. Z-Alignment zur idealen Haftung zwischen Level 1 und 2
 - a. Z-Off-Set funktioniert nicht zuverlässig
 - b. Anpassung im G-Code oder mit Cura-App zeigten keine zuverlässigen Ergebnisse
3. Im Druck von Level 2 kommt es zu einem thermischen Verzug von Level 1
 - a. Unterschiedliche Haftvermittler wurden getestet
 - b. Aktive und nichtaktive Heizung von build plate
 - c. Vakuumplatte zum Halten von Level 1 zeigte ein zu kleines Vakuum mit der vorhandenen Vakuumpumpe

Als **Ergebnis** wurde festgestellt, dass das beste Material für die Matrix ein PC ist, da er die gleichen Druckparameter aufweist (Druckgeschwindigkeit, Drucktemperatur und Erwärmung der Platte). Während zum Beispiel die Drucktemperatur für PLA 195 bis 205 °C beträgt, für ABS 210 bis 250 °C, für PC 270-280 °C.

AP3 Temperaturmessung

Die Metallisierung auf dem Matrixmaterial in Form einfacher Leiterbahnen erfolgt nach Abstimmung mit AP2, AP3 (TEPROSA). Dazu wurden folgende Untersuchungen vor bzw. nach der Metallisierung durchgeführt:

- Konfektionierung des Grundwiderstands R_0 bei Bezugstemperatur (z.B. 0°C , 20°C) durch geom. Dimensionierung der Leiterbahn
- Einfluss der Kanal-Wandstärke zum Sensor (Wärmeleitfähigkeit, Empfindlichkeit) und Untersuchung des dynamischen Verhaltens (Ansprechzeit), Ableitung einer erforderlichen/minimalen Wandstärke
- Bestimmung der Temperatur-Koeffizienten (α , bei Nichtlinearität β über größeren T-Bereich)
- Stabilität im Langzeittest
- Materialbeständigkeitstests bei anderen Flüssigkeiten als Wasser (z.B. Alkohol, Öl)
- mechanische Belastung: Einfluss auf Sensorelement
- Untersuchung des Einflusses durch temperierte Umgebung und Optionen zur Vermeidung (Konstruktionsseitig, durch Referenzmessung)

Für die Herstellung der ersten Modelle der Temperatursensoren wurde Xantar LDS 3764 Filament für den 3D-Druck verwendet. Für den weiteren LDS-Prozess, der von der TEPROSA durchgeführt wurde, wurden Modelle von Mäandern in AutoCAD erstellt.

Für den 3D-Druck von Platten ausgewählte Parameter:

Layer height – 0.02 mm;

- Füllichte: 100%
- Drucktemperatur: 280°C
- Bauplatte: 105°C
- Druckgeschwindigkeit: 50 mm/s
- Durchfluss: 95%

Für die Laseraktivierung ausgewählte Parameter:

- Hatch: $30\mu\text{m}$
- $P=7\text{ W}$
- $F=40\text{ kHz}$
- $V=2\text{ m/s}$

Die einfachste Art, Temperaturänderungen zu messen, ist die Widerstandsmessung. Bei einer Temperaturerhöhung oder -senkung ändert sich der elektrische Widerstand, da der Widerstand eines Materials von einer Temperaturänderung abhängt.

Der Widerstand des Metalls (in der Praxis häufig verwendet) ist:

$$R = \rho L/A \tag{1}$$

mit

ρ – spezif. Widerstand,
 L – Länge,
 A - Querschnittsfläche.

Wenn der Temperaturkoeffizient α selbst nicht zu stark von der Temperatur abhängt, ist eine lineare Annäherung sinnvoll:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T-T_0)] \quad (2)$$

mit

R -Widerstand bei Temperatur T [Ω]

R_0 -Widerstand bei der Bezugstemperatur T_0 [Ω], in der Regel 20 °C

α - Temperaturkoeffizient des Widerstands für das Leitermaterial

T - Temperatur des Leiters

T_0 - Referenztemperatur, bei der α für das Leitermaterial angegeben ist

Für die Herstellung der Platten wurde zunächst eine Konstruktion und theoretische Berechnung des zu erwartenden Widerstandes für verschiedene Mäanderlängen durchgeführt (Tabelle 4 und Tabelle 5). Dazu wurden zwei Längen von 75 und 150 mm berechnet.

Alle Proben werden in 3 Gruppen eingeteilt: Gruppe A, B und C, die sich in der Breite von 200, 300 und 400 μm und der Dicke der Kupferschicht von 5, 10 und 15 μm unterscheiden.

Tabelle 4: Berechnung des Widerstands für eine Länge von 75 mm und eine Breitenänderung von 200 auf 400 μm

| Gruppe | Platte | Länge [mm] | Breite [μm] | Dicke [μm] | Widerstand [Ω] |
|--------|--------|---------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| A | 1 | 75 | 200 | 5 | 1,275 |
| | 2 | | | 10 | 0,6375 |
| | 3 | | | 15 | 0,425 |
| B | 1 | | 300 | 5 | 0,85 |
| | 2 | | | 10 | 0,425 |
| | 3 | | | 15 | 0,283 |
| C | 1 | | 400 | 5 | 0,637 |
| | 2 | | | 10 | 0,318 |
| | 3 | | | 15 | 0,215 |

Tabelle 5: Berechnung des Widerstands bei einer Länge von 150 mm und einer Änderung der Breite von 200 auf 400 μm

| Gruppe | Platte | Länge [mm] | Breite [μm] | Dicke [μm] | Widerstand [Ω] |
|--------|--------|------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| A | 1 | 150 | 200 | 5 | 2,55 |
| | 2 | | | 10 | 1,275 |
| | 3 | | | 15 | 0,85 |
| B | 1 | | 300 | 5 | 1,7 |
| | 2 | | | 10 | 0,85 |
| | 3 | | | 15 | 0,56 |
| C | 1 | | 400 | 5 | 1,275 |
| | 2 | | | 10 | 0,6375 |
| | 3 | | | 15 | 0,425 |

Für die Prüfung wurden die Proben mit dem geringsten Widerstand verwendet, Gruppen B und C mit einer Länge von 75 mm.

Es wurden Platten mit zusätzlichem Boden mit jeweils 6 Mäandern hergestellt. Die Dicke der Kupferschicht nach der Metallisierung betrug 5 μm , 10 μm und 15 μm . Nachstehend sind die Parameter der Mäander aufgeführt (Abbildung 4, Abbildung 5, Tabelle 6):

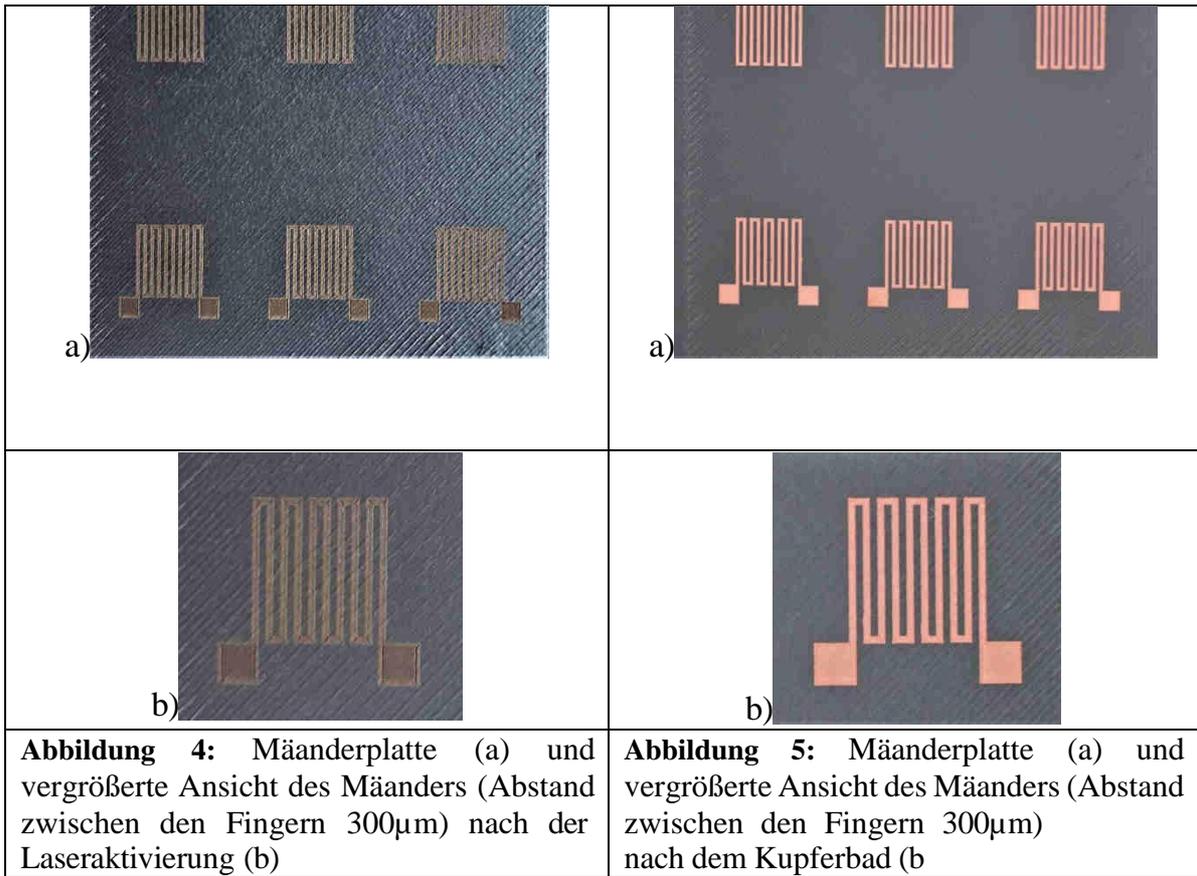
Tabelle 6: Parameter der Mäander

| Platte | Länge [mm] | Breite [μm] | Abstand [μm] | Dicke [μm] |
|--------|------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | 75 | 300 | 300 | 5 |
| 2 | | | | 10 |
| 3 | | | | 15 |

Der theoretisch erwartete Widerstand wurde zuvor berechnet und dann mit dem tatsächlich erreichten Widerstand verglichen (Tabelle 7):

Tabelle 7: Vergleich zwischen theoretisch erwartetem Widerstand und tatsächlich erreichtem Widerstand

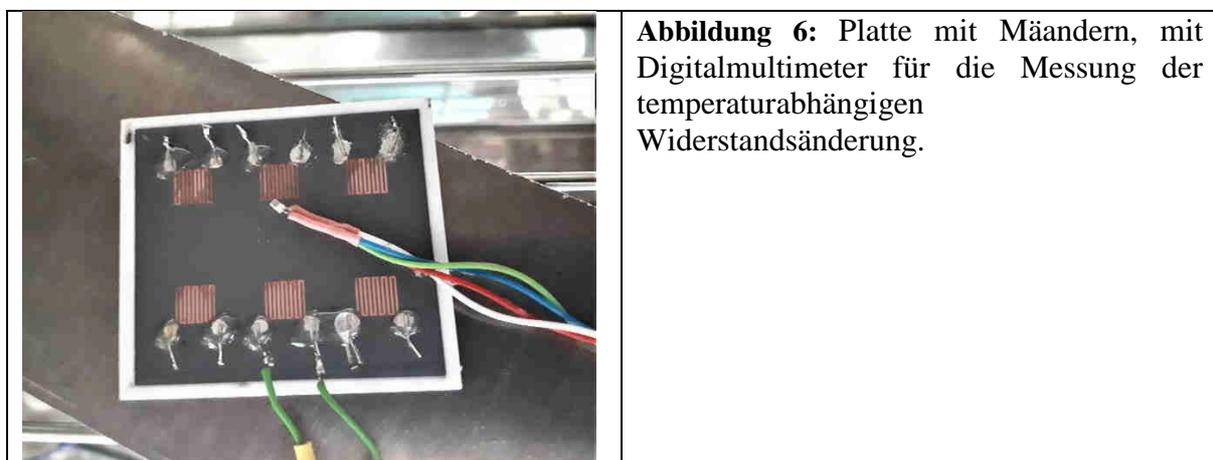
| Platte | Widerstand [Ω] | | | | | | |
|--------|-------------------------|----------|------|------|------|------|------|
| | Berechnet | Gemessen | | | | | |
| 1 | 0,85 | 1,26 | 1,26 | 1,26 | 1,26 | 1,26 | 1,26 |
| 2 | 0,425 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 3 | 0,283 | 0,4 | 0,38 | 0,4 | 0,37 | 0,4 | 0,4 |



Die Dicke der 3D-gedruckten Platte beträgt 1 mm (dunkelgraue Farbe). Zusätzlich wurde die LDS-Polycarbonatplatte auf ein herkömmliches Polycarbonat-Substrat (weiße Farbe) gedruckt, das der Platte ausreichend Stabilität verleiht, um zu verhindern, dass sich die Platte während der Temperaturänderungsexperimente verbiegt oder verformt (Abbildung 7).

Zur Durchführung der Experimente wurden die Drähte nacheinander an die Kontakte der einzelnen Mäander gelötet. Eines der Probleme ist das Löteten von Drähten an das sehr kleine Kupferareal. Unter Zuhilfenahme von Spezialkleber konnte der Vorgang optimiert werden. Alle Mäander auf den Platten hatten keine Isolierschicht und standen daher in direktem Kontakt mit der Luft, die gekühlt oder erwärmt wurde.

Messaufbau vorbereitet für Messungen an hergestellten Proben (Abbildung 6).



Die Temperaturmessungen wurden in einer Temperaturbox im Bereich von -10 °C bis +60 °C

durchgeführt. Während der Versuche zeigten die Mäander keine Reproduzierbarkeit der Messungen; es wurden starke Sprünge oder Abfälle des Widerstands beobachtet. Da der Widerstand unter 1 Ohm oder nahe daran lag, wurden weiterführend Mäander mit einem Widerstand von mindestens 10 Ohm verwendet.

Um einen höheren Mäanderwiderstand zu erreichen, wurden die folgenden Platten mit Hilfe von AutoCAD entworfen und auf einem 3D-Drucker Ultimaker 3 Extended hergestellt: auf einer Platte befinden sich 3 identische Mäander, um ihre Eigenschaften zu vergleichen. Die Dicke der Kupferschicht für jeden Mäander beträgt $5\ \mu\text{m}$. Die Fingerbreite (W) beträgt $240\ \mu\text{m}$, der Abstand (S) zwischen den Fingern $300\ \mu\text{m}$ (Abbildung 7, Abbildung 8).

Eine Platte enthält Mäander mit einer Länge von $750\ \text{mm}$ (**TMM_L750_w240_s300 μm**) und die andere $800\ \text{mm}$ (**TMM_L800mm_w240_s300 μm**). Die Platten sind aus weißem Xantar LDS 3764 Filament gefertigt.

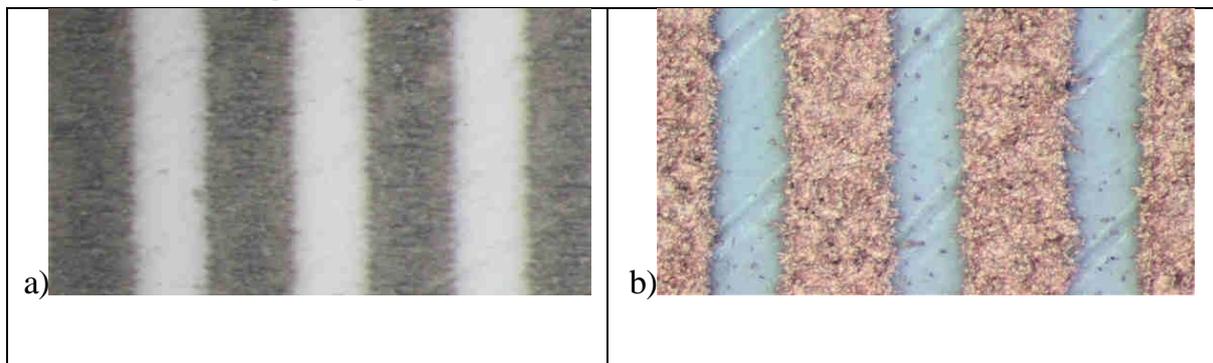


Abbildung 8: Mikroskopische Ansicht des Fingers: laseraktiviert (a) und verkupfert (b)

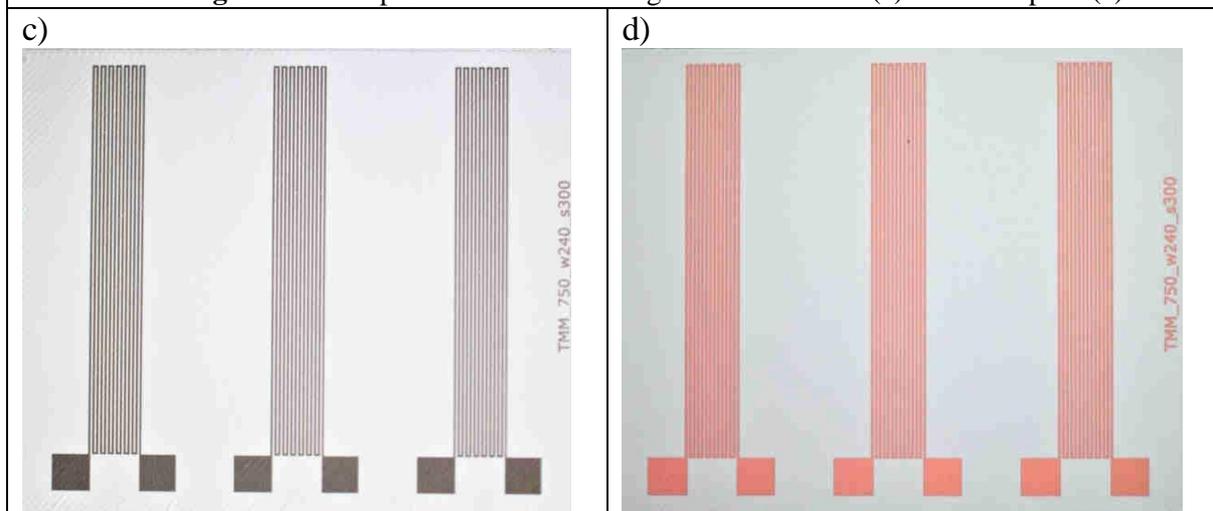


Abbildung 9: 750 mm lange Mäander: laseraktiviert (links) und verkupfert (rechts)

Bei einer Linienbreite von $240\ \mu\text{m}$ ergibt sich regelmäßig ein Problem mit der gleichmäßigen Verteilung der Kupferschicht nach der Laseraktivierung. Während der chemischen Reaktion ist die Bildung der Kupferschicht nicht gleichmäßig oder völlig flach, wie z. B. beim Sputterprozess. Je dünner die Linienbreite ist, desto häufiger können daher Punkte oder Streifen von dunkler Farbe auftreten, auf denen sich eine Kupferschicht von weniger als (erwarteten) $5\ \mu\text{m}$ bildet, was im Falle eines Mäanders entsprechend zu Kontaktverlusten führt. Je rauer die Oberfläche des Blechs vor der Laseraktivierung ist, desto schlechter kann auch die Qualität der Kupferschichtbildung sein. Denn Mikrorisse oder Hohlräume stören die Ausbildung einer durchgehenden Linie, was wiederum zu Kontaktverlusten führen kann.

Daten über die Messung des erhaltenen Widerstands nach dem chemischen Prozess der Kupferschichtbildung (Tabelle 8):

Tabelle 8: Widerstand nach dem chemischen Prozess der Kupferschichtbildung

| Platte | Widerstand [Ω] | | |
|--------|-------------------------|-------------|------|
| | TMM_750_w240_s300 | | |
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Laserfehler | | |
| 2 | 16,2 | 16,15 | 15,8 |
| 3 | 20,4 | 21 | 18,4 |
| | TMM_800_w240_s300 | | |
| 1 | 17 | 20,67 | 21,2 |
| 2 | 17,2 | Laserfehler | 17,8 |
| 3 | 19,9 | 19,9 | 20,4 |

Für die neuen Messungen wurde ein Plattenhalter angefertigt, der mit Stiften versehen ist, die den Kontakt mit der 5 μ m-Kupferschicht ohne Löten herstellen (Abbildung 9).

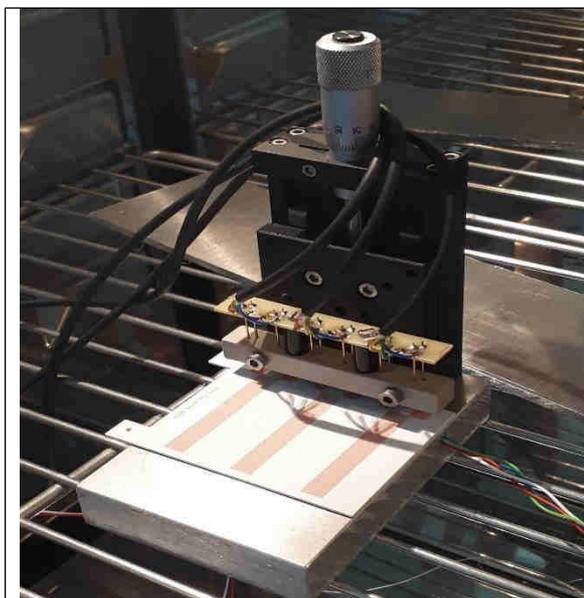


Abbildung 9: Messaufbau: Platte mit Mäandern, die durch Kontaktstifte verbunden sind. Die gesamte Installation befindet sich im Inneren der Temperaturbox, die über ein externes Einstellungsfeld verfügt

Die Temperaturmessungen wurden erneut in einer Temperaturbox im Bereich von -10 °C bis +60 °C durchgeführt.

Nach der Theorie beträgt der Temperaturkoeffizient für Kupfer 0,004041 Ω /K. Die erhaltenen Daten weichen geringfügig von den theoretischen Werten ab. Der Grund dafür kann z. B. die ungleichmäßige Bildung einer Kupferschicht während des Metallisierungsprozesses sein, die sich direkt auf den Widerstandswert auswirkt. Die Bildung von Mikrorissen oder Punkten, die für das Auge unsichtbar sind, ist auch während der Laseraktivierung und der Metallisierung möglich. Anfänglich hatten Mäander desselben Designs in fertiger Form einen leicht unterschiedlichen Widerstandswert, was ebenfalls auf eine schlechte Reproduzierbarkeit der 5 μ m-Kupferschicht hinweist. Um einen höheren Widerstandswert bei einer Schichthöhe von 5 μ m zu erreichen, muss die Größe des Mäanders selbst deutlich zunehmen. Um einen höheren Widerstandswert bei einer Schichthöhe von 5 μ m zu erreichen, nimmt die Größe des Mäanders

selbst deutlich zu, was für bestimmte Anwendungen nachteilig sein kann, da eine Miniatur-Sensorplattform z. B. in der Medizin vorteilhafter wäre.

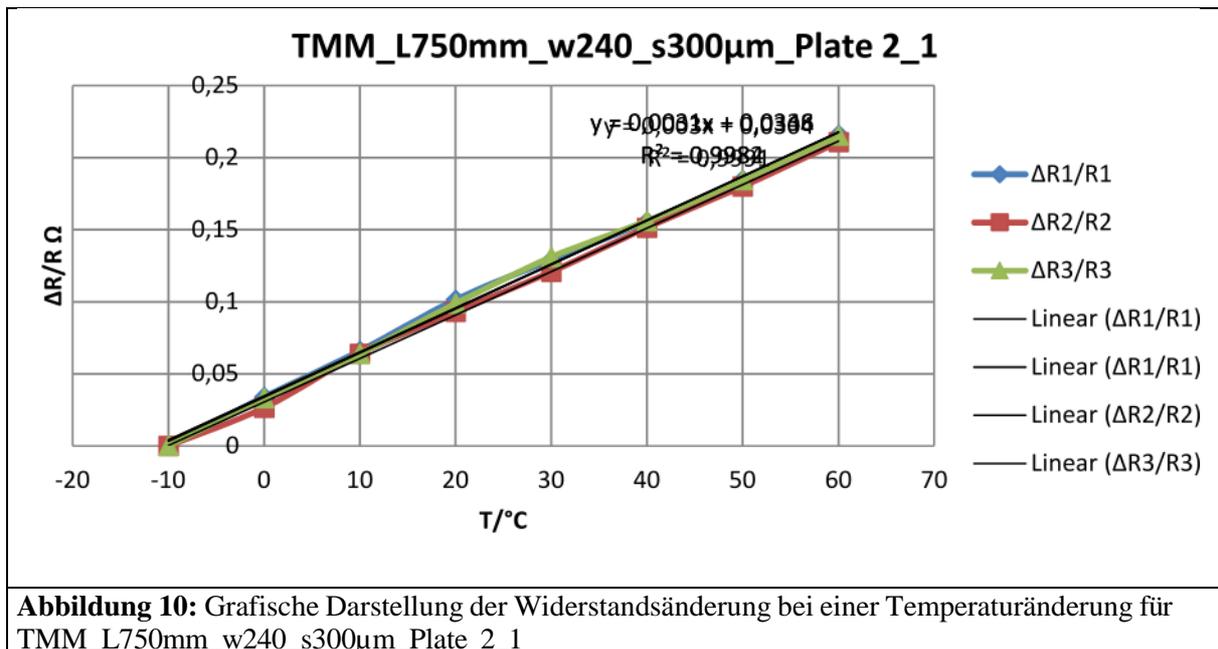
Nachstehend ein Beispiel für Messdaten (Mäanderlänge 750 mm Länge (Tabelle 9, Abbildung 10))

Tabelle 9: TMM_L750mm_w240_s300µm_Plate 2_1

| T/°C | R1/Ω | ΔR1/Ω | R2/Ω | ΔR2/Ω | R3/Ω | ΔR3/Ω | ΔR1/R1 | ΔR2/R2 | ΔR3/R3 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|------------|------------|
| -10 | 13,9 | 0 | 14,34 | 0 | 14,33 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 14,39 | 0,49 | 14,73 | 0,39 | 14,82 | 0,49 | 0,03405142 | 0,02647658 | 0,03306343 |
| 10 | 14,88 | 0,98 | 15,32 | 0,98 | 15,31 | 0,98 | 0,06586022 | 0,06396867 | 0,06401045 |
| 20 | 15,47 | 1,57 | 15,81 | 1,47 | 15,9 | 1,57 | 0,10148675 | 0,09297913 | 0,09874214 |
| 30 | 15,96 | 2,06 | 16,31 | 1,97 | 16,49 | 2,16 | 0,12907268 | 0,12078479 | 0,13098848 |
| 40 | 16,46 | 2,56 | 16,9 | 2,56 | 16,98 | 2,65 | 0,15552855 | 0,15147929 | 0,15606596 |
| 50 | 17,05 | 3,15 | 17,49 | 3,15 | 17,57 | 3,24 | 0,18475073 | 0,18010292 | 0,18440524 |
| 60 | 17,73 | 3,83 | 18,17 | 3,83 | 18,26 | 3,93 | 0,21601805 | 0,21078701 | 0,21522453 |

Koeffizient α , berechnet aus den empfangenen Daten für TMM_L750mm_w240_s300µm_Plate 2_1:

| α | R1 | R2 | R3 |
|----------|------------|------------|------------|
| | 0,00459233 | 0,00445142 | 0,00457083 |



Zusammenfassung

Die Messungen der Mäander wurden unter Bedingungen eines allmählichen Temperaturanstiegs auf +60 °C durchgeführt, da der Untergrund, auf dem sie sich befanden, ein Thermoplast (Polycarbonat) ist, der seine eigenen Erwärmungsgrenzen hat. Bei einem weiteren Temperaturanstieg (über 60 °C) kann sich das Polycarbonat verformen, verbiegen oder schmelzen, was auch zu einer Verformung des Mäanders selbst führt.

Die Abhängigkeit des Messwiderstandes von der Temperatur konnte festgestellt und quantifiziert werden. Erwartungsgemäß verhält sich galvanisiertes Kupfer nicht wie ein homogenes, bspw. gesputtertes Material und zeigt daher Abweichungen von theoretischen Literaturwerten. Prinzipiell kann aber festgehalten werden, dass sich die gewählte Methode der Metallisierung in Grenzen zur Temperaturmessung eignet.

Die 5 µm dicke Kupferschicht ist sehr empfindlich gegenüber Kratzern und kann während des Lötvorgangs leicht beschädigt werden. Der Versuch, einen Stiftkontakt zu verwenden, führt ebenfalls nicht zu einem positiven Ergebnis, da die Kontaktfläche vernachlässigbar klein ist und sich bei unvorsichtiger Handhabung oder plötzlichem Verschieben des Stifts ein Kratzer bildet oder ein Teil des Kontakts verloren gehen kann. Es ist auch zu beachten, dass Kupfer sehr empfindlich auf Wasser an der Oberfläche und auf Feuchtigkeit im Allgemeinen reagiert. Bei den Versuchen wurde jedes der Mäander nacheinander angeschlossen, was bedeutet, dass alle anderen Mäander gleichzeitig gekühlt oder erwärmt wurden, was sich ebenfalls auf die Oberfläche der Kupferschicht und ihre Reaktion auf das Auftreten von Feuchtigkeit auswirkt.

AP4 Temperierung

Aufbauend auf dem erworbenen Know-how aus AP3 und in Abstimmung mit AP2, AP3 (TEPROSA) werden Strukturen zum Beheizen einer Flüssigkeit (Widerstandserwärmung) geschaffen. Zu untersuchen war:

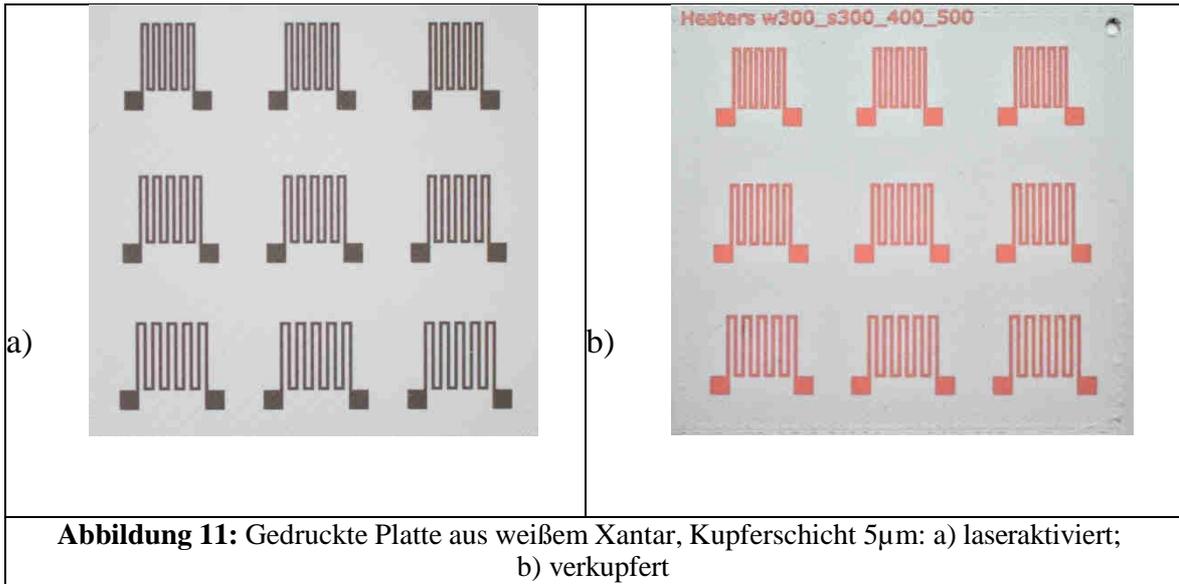
- Optionen zur Dimensionierung elektrischer Leiterbahnen zur Anwendung als Widerstandsheizung
- Bestimmung des spezifischen Widerstands des Heizleiters und der realisierbaren Heizleistung und der realisierbaren Heizleistung (je höher der spez. Widerstand umso höher die Heizleistung bei gegebener Geometrie)

Weiterhin wurde die Wärmeübertragung auf die umgebende Matrix und die Flüssigkeit experimentell geprüft:

- Bestimmung der stoffspezifischen Wärmeleitfähigkeit und spezif. Wärmekapazität passiver Filamente
- Thermische Langzeittests
- Wärmeübertragung bei dynamischer thermischer Belastung (schnelles Aufheizen)
- Grenzbetrachtungen thermischer Belastbarkeit: Schmelztemperatur des Leitmaterials und Grenztemperatur des Matrixmaterials
- Prüfung konstruktionsseitiger Optimierungsmöglichkeiten (gerichtete Wärmeübertragung) durch vollständige Einbettung (vgl. AP5) der Heizleiter

Auf der Grundlage der im AP3 gewonnenen experimentellen Daten wurden für die Herstellung der neuen Messstrukturen folgende Platten angefertigt: 9 Mäander in 3 x 3 Reihen auf jeder Platte. Die Dicke der PC-Platte betrug 1 mm.

Alle Mäander haben die gleiche Fingerbreite von 300 µm, aber unterschiedliche Fingerabstände, nämlich 300 µm, 400 µm und 500 µm. Jeder der Heizer in der ersten Reihe ist 75 mm lang, in der zweiten 76 mm und in der dritten 77 mm. Auf einer der Platten (LDS Xantar filament white (Abbildung 11) beträgt die Dicke der Kupferschicht 5 µm, auf der anderen 10 µm (LDS Xantar Filament Schwarz + Polycarbonat-Basis).



Anschließend wurden Versuche zur Erwärmung und Temperaturänderung durchgeführt und die Wärmeverteilung mit einer Infrarotkamera (Hti-Xintai HT-A1) aufgezeichnet. Mit dem Dreifach-Netzteil HM7042-5 wurden die Heizelemente alle 20 Sekunden mit einem Strom von 0,1 A versorgt. Der maximale Strom betrug 0,5 A. Für jeden Heizer wurden bis zu 10 Messungen durchgeführt. Die von der Infrarotkamera aufgezeichnete Temperaturänderung ist in Abbildung 12 dargestellt.

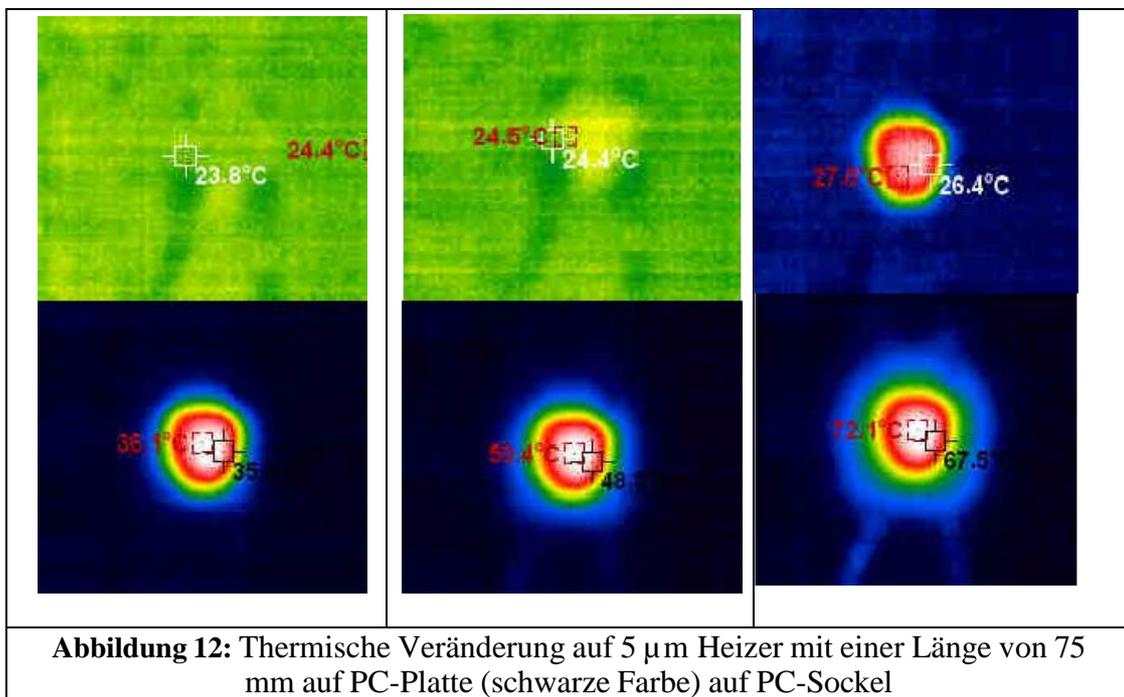


Abbildung 13 visualisiert exemplarisch die erhaltenen Daten.

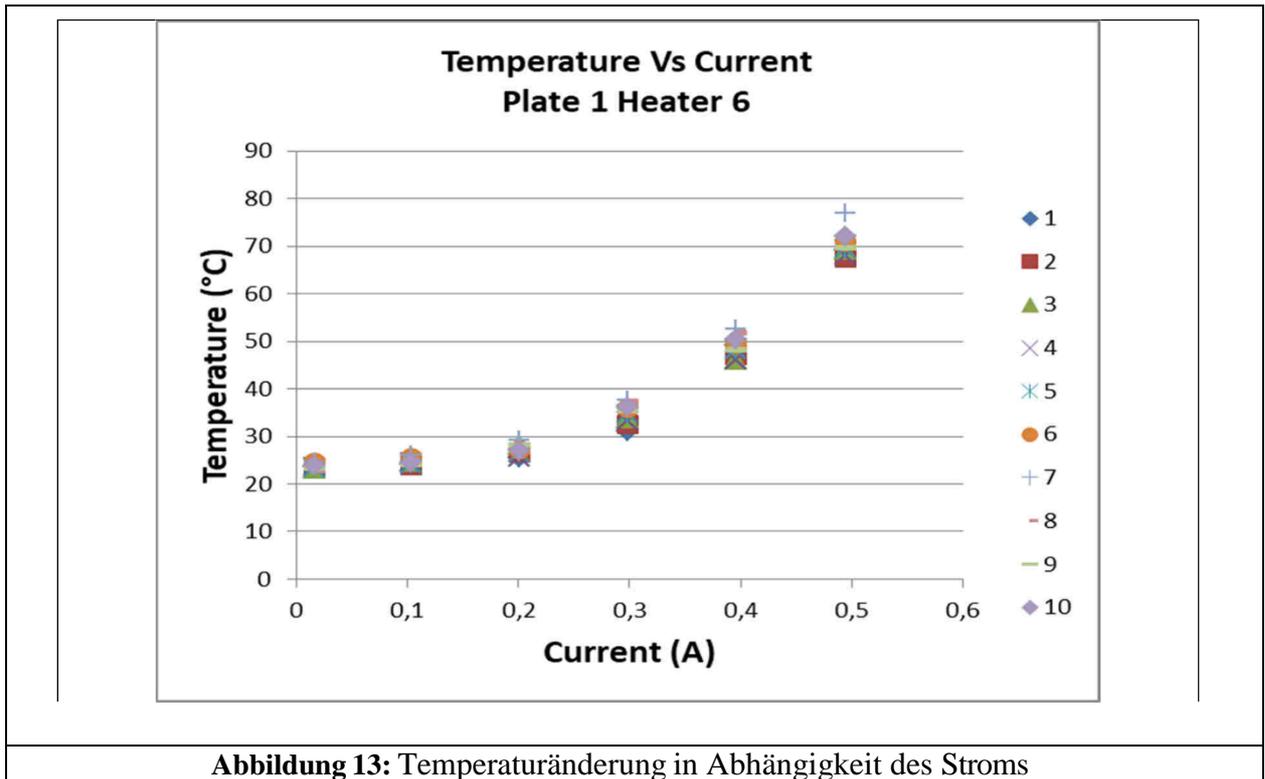


Abbildung 13: Temperaturänderung in Abhängigkeit des Stroms

Die Messungen zeigten, dass eine maximale Erwärmungstemperatur von 72,1°C auf einem 5µm Mäander auf PC-Basis erreicht werden konnte.

Mäanderplatten mit der gleichen Geometrie, aber mit einer Kupferschichtdicke von 10 µm, wurden ebenfalls gemessen. Die Infrarotbilder der Messungen sind in Abbildung 14 dargestellt.

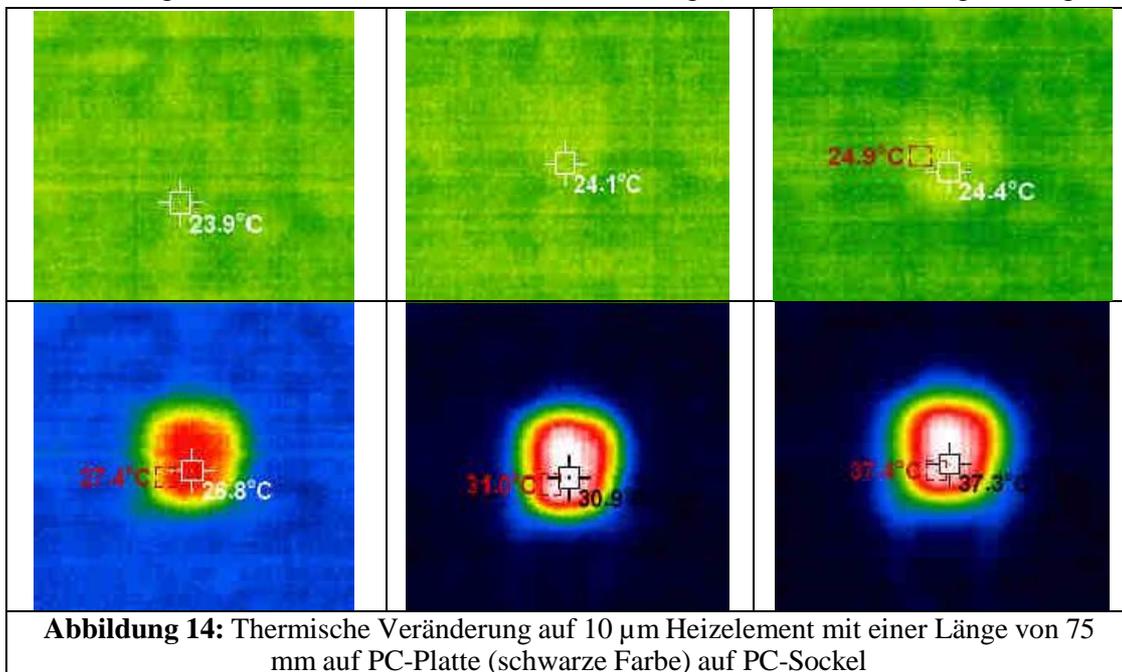


Abbildung 14: Thermische Veränderung auf 10 µm Heizelement mit einer Länge von 75 mm auf PC-Platte (schwarze Farbe) auf PC-Sockel

Abbildung 15 visualisiert exemplarisch die erhaltenen Daten.

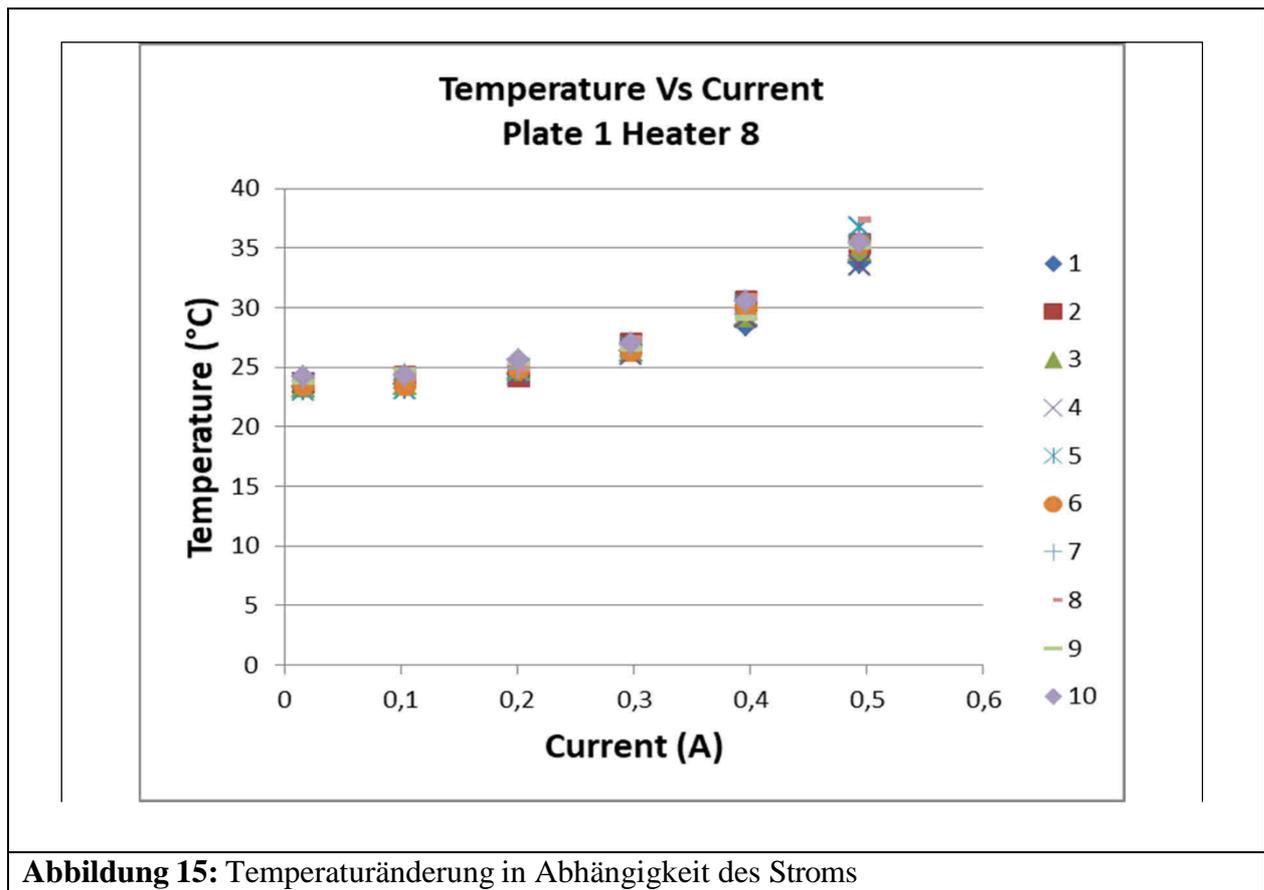


Abbildung 15: Temperaturänderung in Abhängigkeit des Stroms

Eine Änderung der Dicke der Kupferschicht, d.h. eine Erhöhung auf 10 μm , führt aufgrund des reduzierten (halbierten) Widerstands der Leiter zu einer entsprechenden Verringerung der maximalen Temperatur, die der Heizer erreicht, nämlich 37,4°C.

Zusammenfassung

Jeder der Mäander wurde 10 Mal erwärmt und die Messdaten der jeweiligen Heizelemente liegen nahe beieinander, was auf die Reproduzierbarkeit der hergestellten Mäander-Heizungen hinweist. Die folgenden Parameter beeinflussen das Erreichen der maximalen Heiztemperatur der Mäander:

- die Dicke der Kupferschicht,
- das Vorhandensein eines zusätzlichen Substrats oder die Dicke der LDS-Polycarbonatplatte selbst,
- die Größe des Heizelements/ Anfangswiderstand,
- Mäander-Heizzeit bzw. zugeführter Strom.

Es musste festgestellt werden, dass bei jeder Struktur die Kontaktierung zum Anschluss-Draht eine Schwachstelle darstellt. Da die Kupferschicht sehr dünn ist, nämlich 5-10 μm , ist der Lötvorgang recht empfindlich, so dass die Heiztemperatur des LötKolbens und der Druck überwacht werden müssen, um die Kupferschicht nicht zu zerstören oder den Kunststoff zu schmelzen und den Kontakt tatsächlich zu verbrennen.

AP5 Einbettung von aktiven Strukturen

Das AP wurde in enger Zusammenarbeit mit AP5 (TEPROSA) bearbeitet und die fertigungstechnische Grundlage zum Überdrucken metallisierter Areale mit verschiedenen passiven Filamenten eruiert:

- Schaffung konstruktionstechnischer Voraussetzungen zur optimalen Re-Positionierung einer zu bedruckenden Struktur in Druckraum (x-y-Justierhilfen, Arretierungsmaßnahmen)
- Mechanische Charakterisierung (u.a. Zug-/Druckfestigkeit, Delaminationstest)
- Hybride Einbettung von weiteren Bauteilen/Baugruppen, z.B. optische Sender (LED), Lichtleiter, Drucksensor, o.ä. und Test der allgemeinen Funktionalität und Zuverlässigkeit.

Die Ergebnisse flossen unmittelbar in das AP7 (TEPROSA) ein, wo Strategien zur Verdrahtung solcher Mehrlagensysteme entwickelt wurden.

Die FDM-Technologie ermöglicht das Überdrucken einer neuen Schicht auf eine bestehende Kupferschicht oder einen elektrischen Schaltkreis. Dies ist notwendig für:

- die Herstellung von Mehrschichtstrukturen oder komplexen 3D-Modellen
- Vermeidung von Leckagen zwischen den Schichten im Falle von mikrofluidischen Verengungen (Vorhandensein von Kanälen)
- zum Schutz eines elektrischen Schaltkreises
- Einsparung von Material

Um das Überdrucken durchzuführen, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- die Geometrie des Modells und seine Komplexität
- die Kompatibilität eines Filaments mit einem anderen (bei Verwendung verschiedener Filamente für die Basis- und die Folgeschichten), die Bestimmung der richtigen Drucktemperatur sowie des erwarteten Haftungslevels zwischen den Schichten, um Verformungen und das Auftreten von Hohlräumen oder Rissen zu vermeiden
- die Mindestdruckschicht entsprechend den Möglichkeiten der Druckerdüse und der Qualität des Filaments
- es ist notwendig, eine zusätzliche Kalibrierung (Z-Offset) des Druckers vorzunehmen, das so genannte Leveling, und den gcode beim Druck einer neuen Schicht zu ändern.

Die Mindestdicke einer thermoplastischen Schicht kann bis zu 0,2 mm betragen, die Wahl der Dicke hängt von der weiteren Anwendung ab. Auf die von TEPROSA zur Verfügung gestellten Muster (Abbildung 16) wurde eine Schicht von 0,4 mm und 0,6 mm gedruckt.

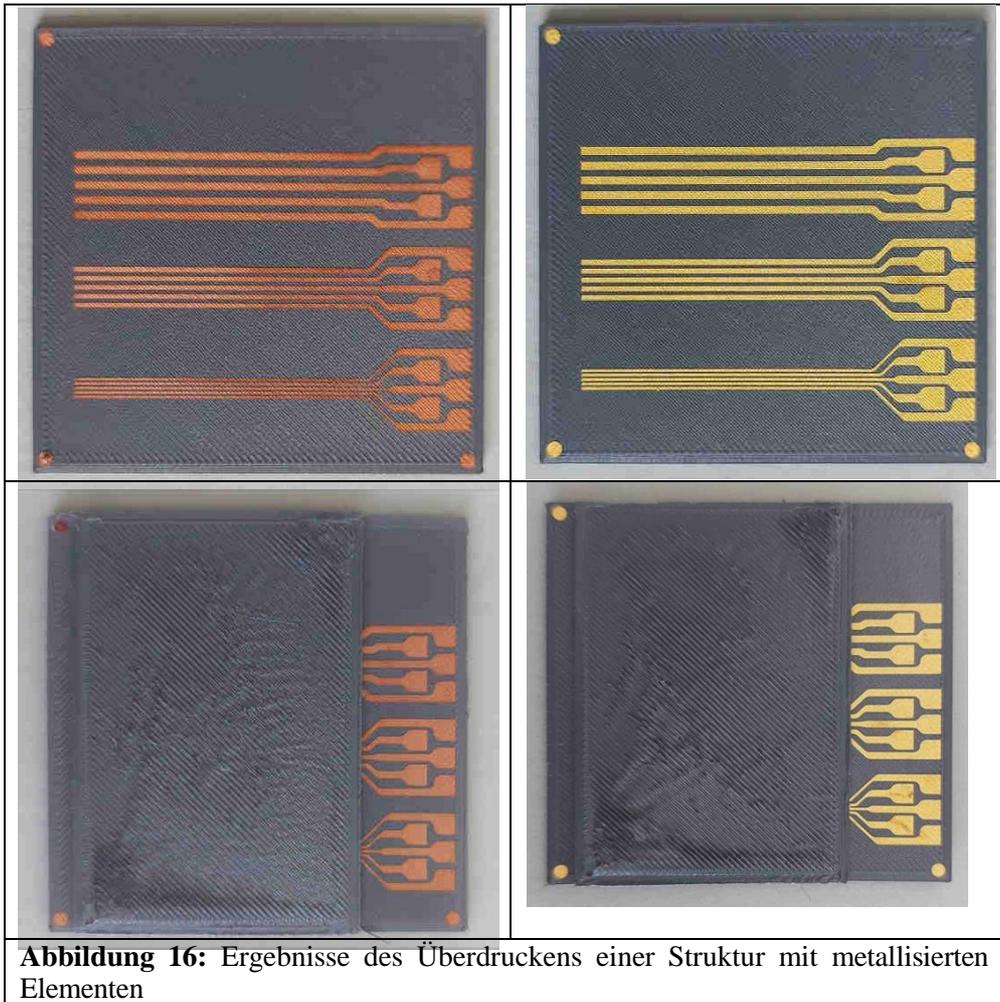


Abbildung 16: Ergebnisse des Überdrucksens einer Struktur mit metallisierten Elementen

Es ist visuell zu erkennen, dass an den Ecken der überdruckten Schicht eine starke Rauheit vorhanden ist, die eine Laseraktivierung und die Bildung einer Metallschicht unmöglich machte. Auch beim Überdrucken der zusätzlichen Deckschicht wurde festgestellt, dass die Haftung zwischen den Schichten nicht ausreichend ist, was zu Hohlräumen oder Lufteinschlüssen führen kann, was bei einigen Anwendungen kritisch und unerwünscht ist.

Zusammenfassung

Eines der Hauptprobleme beim Überdrucken ist die korrekte Positionierung der fertigen Platte mit Metallelementen, ihre feste Fixierung, um ein Verrutschen oder Abscheren beim Überdrucken zu vermeiden. Die Verwendung von Vakuumansaugung der Platte von unten oder die Verwendung von zusätzlichen Rahmen, in die die Originalmodelle eingebaut werden, führten zu einem besseren Ergebnis. Eine wichtige Rolle spielt die fehlende Erwärmung des fertigen Modells, auf das eine neue Kunststoffschicht gedruckt werden muss, was sich direkt auf die Haftung zwischen den Schichten auswirkt.

Flache 2D-Modelle lassen sich leichter überziehen als größere 3D-Modelle mit komplexen Geometrien, insbesondere zylindrische Modelle.

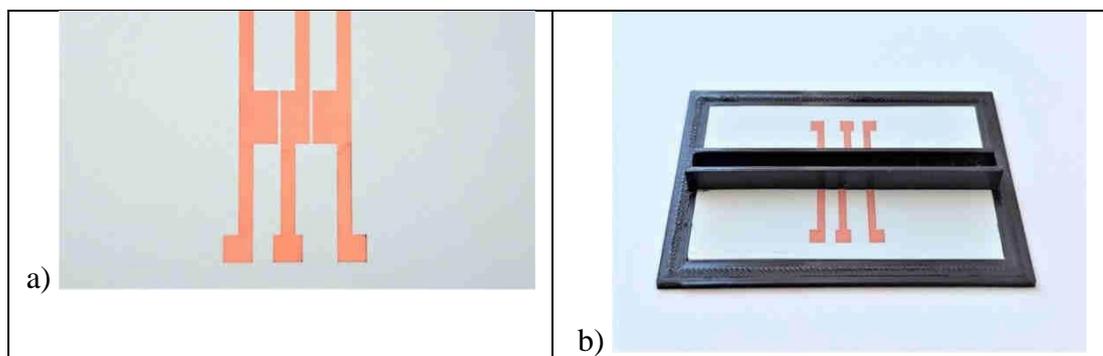
AP6 Füllstandsermittlung, Medienanalyse

Die Grundstruktur des kapazitiven Sensors nach dem klassischen Prinzip eines idealen Plattenkondensators wurde herangezogen. Im Vorfeld dazu dienen theoretische Abschätzungen dazu, eine optimale Designvorgabe zu erarbeiten. In experimentelle Studien an den gefertigten Testträgern wurde die Nutzbarkeit und Leistungsfähigkeit festgestellt.

- Analytische und numerische Berechnungen zur Dimensionierung der Kondensatorplatten und Messstrecke, ggf. einschließlich Abschirm-Maßnahmen (Schutz-Elektrode)
- Ableitung erforderlicher Designvorgaben und CAD-Informationen zur Laseraktivierung für geplante Betriebsmodi: (a) Erkennung der Anwesenheit einer Flüssigkeit, (b) Füllpegelmessung, (c) Unterscheidung verschiedener flüssiger Phasen/Gasblasen
- Experimentelle Versuche und Verifizierung der Betriebsmodi (a)- (c) unter Berücksichtigung einer spektralen Anregung in einer zu definierenden Bandbreite (in Abhängigkeit der erwarteten Messeffekte)

Für die Herstellung von Elektroden zur Durchführung von kapazitiven Messungen wurde die erste Serie von Platten hergestellt. Auf der Platte wurden drei Elektroden entworfen: Gegenelektrode (CE), Referenzelektrode (RE), Arbeitselektrode (WE) (Abbildung 17a). Die Größe der Messfläche jeder Elektrode beträgt 6x4 mm.

Nach der Laseraktivierung und der Bildung der Kupferschicht durch stromloses Abscheiden wurde als nächster Schritt der offene Kanal mit einer Isolierschicht überdruckt (Abbildung 17b). Die innere Größe des Kanals beträgt 63x4x4 mm, die Isolierschicht ist 0,2 mm. Zum Drucken des Kanals über die fertige Platte wurde Polycarbonat (PC)-Filament (schwarz) verwendet. Zunächst wurde ein Halterahmen gedruckt, in den die Platte selbst mit den Elektroden während des Druckvorgangs eingesetzt wurde, und dann wurde eine Elektroden-Isolierschicht auf der Platte gebildet, während die Stelle für den Anschluss an die Drähte offen blieb. Nachdem der Druck des Kanals abgeschlossen war, wurde festgestellt, dass an den Stellen, an denen die Kupferschicht vorhanden war (direkt im Messbereich), keine Haftung zwischen Elektroden und PC bestand (Abbildung 17c). Bei Betrachtung der Isolierschicht (Abbildung 17d) ist ebenfalls zu erkennen, dass keine Haftung zwischen der Kupferschicht und dem PC vorhanden ist.



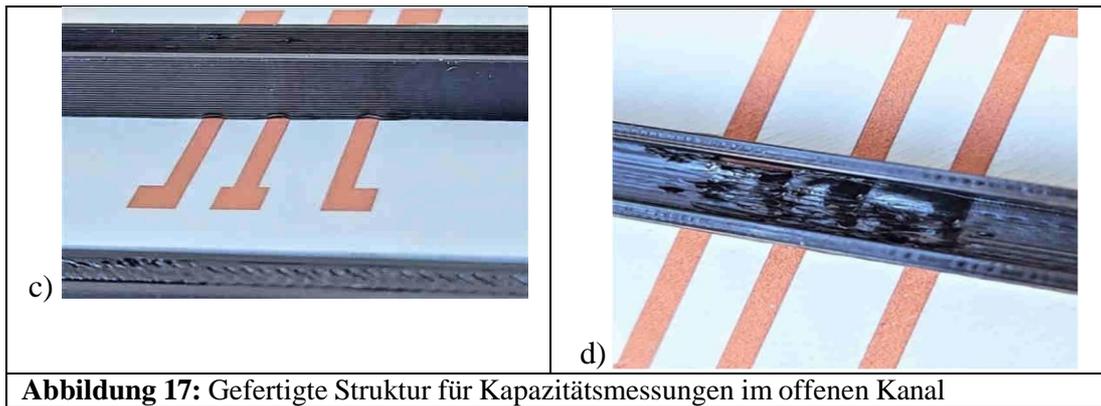


Abbildung 17: Gefertigte Struktur für Kapazitätsmessungen im offenen Kanal

Um festzustellen, wie sich die Elektroden während der Messungen verhalten und um eine bessere Haftung zu erreichen, wurde PDMS-Material (hergestellt im Abformverfahren) verwendet, um einen geschlossenen Kanal mit einer isolierenden Schicht zu bilden (Abbildung 18). Der obere Teil der PDMS- Mikrofluidikstruktur besteht aus zwei Schichten, die abwechselnd auf einer Polycarbonatbasis mit Elektroden angebracht wurden.

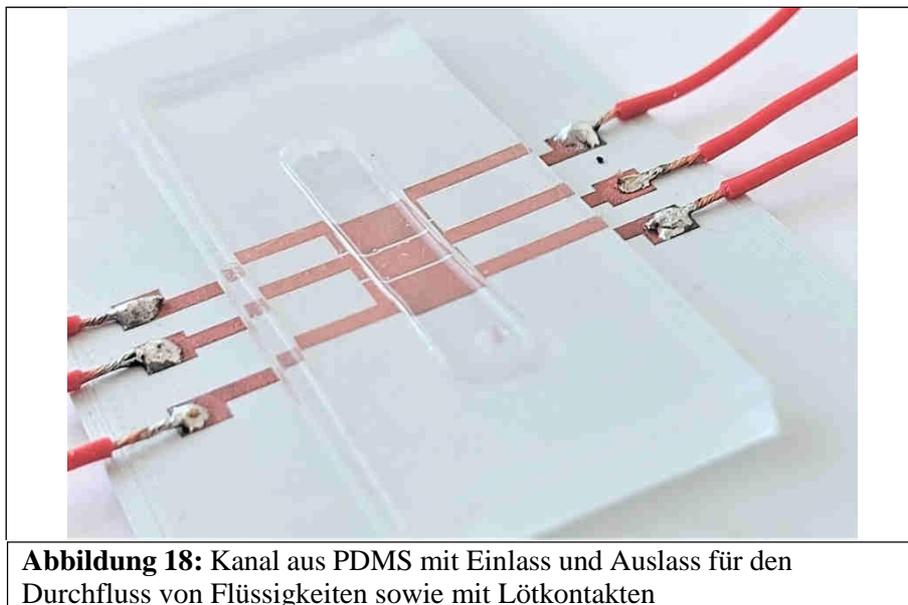


Abbildung 18: Kanal aus PDMS mit Einlass und Auslass für den Durchfluss von Flüssigkeiten sowie mit Lötkontakten

Das Messprinzip basiert auf kapazitiver Abtastung. Die Kapazität wird nach der Formel berechnet:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d,$$

wobei ϵ_0 die absolute Dielektrizitätskonstante,
 ϵ_r die relative Dielektrizitätskonstante des dielektrischen Mediums zwischen den Platten,
 A die Fläche der Platten und
 d der Abstand zwischen den Platten ist.

Zur Durchführung der Experimente wurde die Messplattform an den Agilent 4395A Network/Spectrum/Impedance Analyzer angeschlossen.

Die Messplattform wurde mit einem Stativ und einer Halterung befestigt. Folgende Flüssigkeiten wurden vorbereitet: Propanol, Ethanol, Methanol und auch Wasser. Zuvor wurde die Kapazität der Messzelle in Luft gemessen und betrug 3,2 pF. Nachfolgend sind die erhaltenen Daten aufgeführt (Tabelle 10).

Tabelle 10: Daten der Flüssigkeiten der Messzelle

| Reine Zusammensetzung (100%) | Kapazität [pF] |
|------------------------------|----------------|
| Ethanol | 4,8 |
| Methanol | 5,3 |
| Propanol | 4,5 |
| Wasser | 7,6 |

Nach dem Waschen und Trocknen (Ausblasen mit Luft) des Kanals betrug die Kapazität in Luft 3,2 pF.

Das Hauptproblem bei dieser Messstruktur war das Auftreten von Luftblasen, die regelmäßig auftraten, wenn neue Messflüssigkeiten eingefüllt wurden (Abbildung 19).

Die Delaminierung der PDMS-Isolierschicht durch die Alkohole führte zu Mikrorissen, durch die die Flüssigkeit in die Elektrodenoberfläche eindringen konnte (dunkle Flecken) (Abbildung 20).



Abbildung 19: Vorhandensein von Luftblasen im Kanal während der Messungen

Abbildung 20: Kanalansicht nach den Messungen

Bei der Wiederholung der Messungen stiegen die Werte im Vergleich zur ersten Messung deutlich an (Tabelle 11).

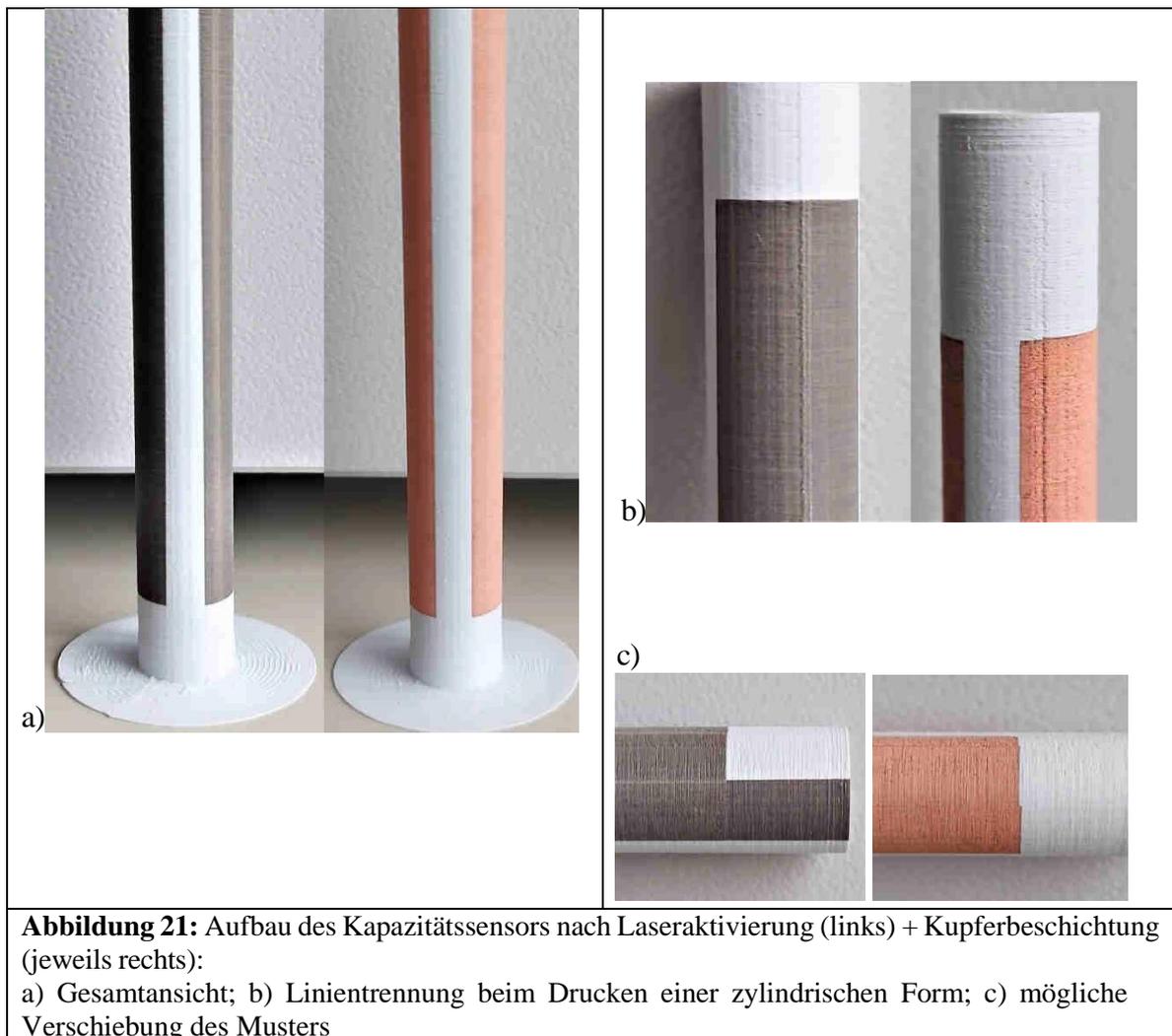
Tabelle 11: Daten der Flüssigkeiten der Messzelle

| Reine Zusammensetzung (100%) | Kapazität [pF] |
|------------------------------|----------------|
| Luft | 19,43 |
| Ethanol | 21,45 |
| Methanol | 22,03 |
| Propanol | 22,64 |
| Wasser | 24,79 |

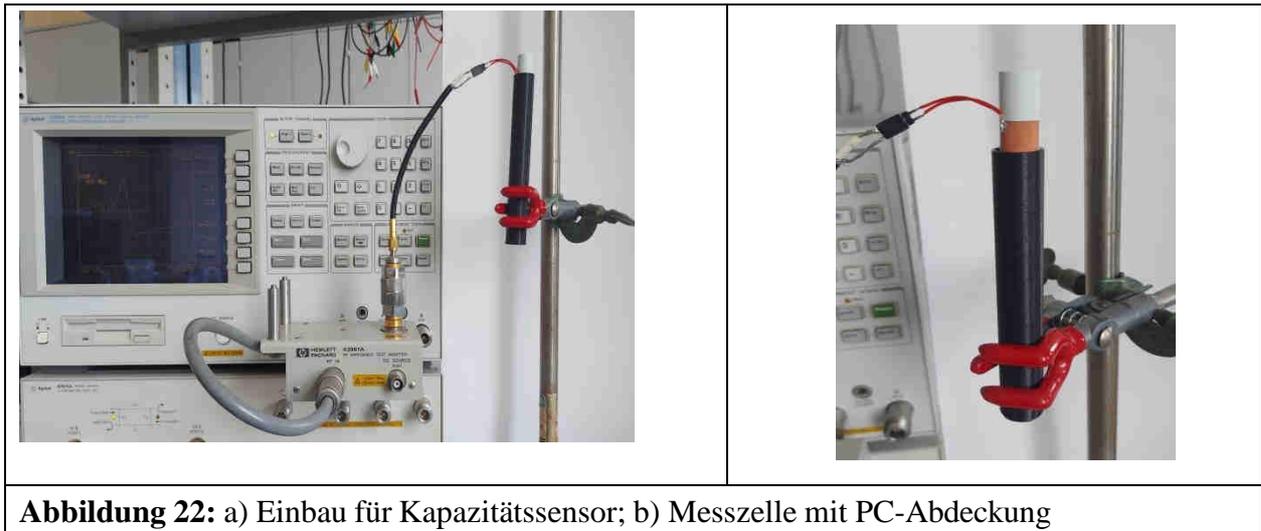
Das nächste Sensormodell für kapazitive Messungen ist ein Übergang von einem 2D-Modell

zu einem 3D-Modell. Außerdem hat das entworfene Modell die Form eines Zylinders und stellt eine Art Herausforderung für den 3D-Druckprozess und die Erzielung einer minimalen Oberflächenrauigkeit dar, auf der anschließend eine Kupferschicht gebildet werden sollte. Außerdem musste für die Laseraktivierung eines solchen 3D-Modells ein spezieller Halter angefertigt werden, mit dem der Zylinder gedreht werden kann, um das erforderliche Muster aus der CAD-Datei aufzubringen und gleichzeitig zu verhindern, dass sich der Laserstrahl überschneidet und somit das Design nicht beeinträchtigt.

Das Rohr hat einen Durchmesser von 12 mm und eine Länge von 120 mm, die Wandstärke beträgt 1 mm (Abbildung 21). Die Länge der einzelnen Elektroden beträgt 90 mm und der Abstand zwischen den Elektroden 5 mm.



Wie in Abbildung 22a dargestellt, wurde der folgende Aufbau für Kapazitätsänderungsmessungen vorbereitet. Abbildung 22b zeigt, wie die Messzelle (weiß) in ein schützendes Polycarbonatgehäuse (schwarz) eingesetzt wird, um äußere Einflüsse zu minimieren und auch die Möglichkeit der Fixierung in der Halterung zu verbessern.



Für die Messungen in einer zylindrischen Messplattform wurden die gleichen Flüssigkeiten wie bei der vorherigen Messplattform verwendet. Das Anschlussschema, das Stativ und die Halterung wurden nicht verändert. Zum Vergleich wurden Messungen mit und ohne Gehäuse im Frequenzbereich von 100 kHz bis 500 MHz durchgeführt. Die gemessenen Flüssigkeiten wurden in den Zylinder gegeben, während sich die Elektroden außerhalb befanden. Der Einfachheit halber befanden sich die Kontakte und Drähte oben auf dem Zylinder, was das Eintauchen in ein Schutzgehäuse nicht störte.

Bevor die vorbereiteten Flüssigkeiten eingefüllt wurden, wurde die Kapazität der Messzelle an der Luft gemessen. Nachfolgend sind die erhaltenen Daten aufgeführt (Tabelle 12).

Tabelle 12: Messergebnisse der Flüssigkeiten der Messzelle

| Reine Zusammensetzung (100%) | Kapazität, pF (ohne Abdeckung) | Kapazität, pF (mit Abdeckung) |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Luft | 8,2 | 22,05 |
| Ethanol | 23,4 | 41,05 |
| Methanol | 25,6 | 45,87 |
| Propanol | 21,9 | 39,4 |
| Wasser | 34,5 | 59,39 |

Nach dem Waschen und Trocknen (Ausblasen mit Luft) des Kanals mit neuer Flüssigkeit schwankte die Kapazität für die Messzelle ohne Abdeckung zwischen 8,3 und 8,9 pF und für die Messzelle mit Abdeckung zwischen 22,05 und 22,17 pF.

Wie aus den Ergebnissen ersichtlich ist, spielt das Vorhandensein oder Fehlen einer Abdeckung bei diesem Messzellentyp eine sehr wichtige Rolle, da die erzielten Werte erheblich voneinander abweichen. Ebenfalls direkt betroffen ist die Länge der Drähte beim Anschluss der Messzelle an den Agilent 4395A Network/Spectrum/Impedance Analyzer. Je kürzer die Drähte sind, desto besser, da sie Störungen in die Messungen einbringen.

Da die oberen Schichten sowohl aus PDMS als auch aus der Isolierschicht bestehen, kommt es bei jedem Waschen und Blasen zu einer Mikrozerstörung der Adhäsion zwischen den Schichten, was zu Delaminierung und Leckage oder zur Vereinheitlichung der Isolierschicht als Ganzes führen kann.

Zusammenfassung

Daraus lässt sich schließen, dass es bei kapazitiven Sensoren sehr wichtig ist, die Frage der Eliminierung äußerer Einflüsse zu berücksichtigen. Die Messzelle muss fixiert und mit zusätzlichen Messgeräten über Drähte verbunden werden, die aber den Messprozess negativ beeinflussen können.

Die Verwendung von verschiedenen Materialien als Isolierschicht, nämlich Xantar 3764 LDS und PDMS, führt zu unterschiedlichen Ergebnissen. Denn die Messung derselben Flüssigkeiten wirkte sich nicht negativ auf das Xantar 3764 LDS aus, während das PDMS abblätterte und so den Kontakt der Flüssigkeit mit der Elektrode ermöglichte.

Ein wichtiger Aspekt bei der Herstellung von Elektroden ist die Qualität der Oberfläche, auf der sie sich befinden. Bei der Herstellung von Elektroden mit der FDM-Technologie weist die Oberfläche eine ziemlich hohe Rauheit auf, was die Herstellung von Elektroden erheblich erschwert.

Die Verwendung einer 3D-Struktur in Form eines Zylinders stellt eine Herausforderung für die Laseraktivierungstechnologie dar, da eine spezielle Halterung erforderlich ist, die die Struktur dreht und das gewünschte Muster nach und nach aufträgt, da eine Verschiebung den Kontakt zerstören kann.

AP7 Ultraschall-Anregung: Konzipierung des EMUS (elektromagnetischer Ultraschallwandler)

In diesem AP wurden die technologischen Grundlagen zur Erzeugung mechanischer Wellen im gedruckten Substrat und daran gekoppelt in einem flüssigen Zielmedium untersucht.

- Erstellung eines 3D-Simulationsmodells (Finite Elemente Modellierung, FEM) unter Einbeziehung aller relevanten physikalischen und geometrischen Parameter bzw. deren Modifikation
- Simulationsstudien zur Magnetfeld-Modellierung
- Simulationsstudien zur Modalanalyse der mechanischen Schwingungen (Eigenmoden) im gedruckten Substrat
- Machbarkeitsanalyse zum elektromagnetischen Anregungsprinzip
- Untersuchung des Einflusses geringer elastischer Steifigkeiten der Materialien
- Ableitung relevanter Magnetfeldstärken und deren praktischer Realisierbarkeit
- Strategien zur Initiierung von Longitudinalwellen in einer Flüssigkeit, Abschätzung erreichbarer Eindringtiefen
- Ableitung einer EMUS-Konfiguration für AP8

Die ersten Tests wurden mit Platten durchgeführt, die auf einem FDM-3D-Drucker mit einem weißen Xantar 3764 LDS-Filament gedruckt wurden. Die Größe der Platte betrug 45 x 65 mm und eine Dicke von 0,6 mm und 1 mm.

Druckparameter:

- Drucktemperatur 270 - 280° C

- Temperatur der Druckplatte 105° C
- Druckgeschwindigkeit 50 mm / s
- Materialfluss 95%
- Schichtdicke 0,1-0,4 mm
- Düsendurchmesser 0,4 mm.

Mit Hilfe des AutoCAD-Programms wurde eine CAD-Datei erstellt, und anschließend wurden die Platten entsprechend dem erstellten Entwurf mit dem Laser aktiviert. Laser-Parameter:

- $P=7W$;
- $F= 40 - 60 \text{ kHz}$;
- $V= 2\text{m/s}$;
- Schlupf $30\mu\text{m}$.

Nach der Laseraktivierung werden die Proben metallisiert, die Zielschicht-Dicke war $5 \mu\text{m}$ Kupfer.

Für den Versuch wurden zwei Magnete direkt in die Halterung eingebaut, so dass es nur möglich war, die Platten der Einfachheit halber neu anzuordnen. Die Halterungen für die Magnete wurden manuell in die Platten geschnitten, da der elektromagnetisch anzuregende Bereich zwischen den Magneten genutzt werden muss (Abbildung 23).

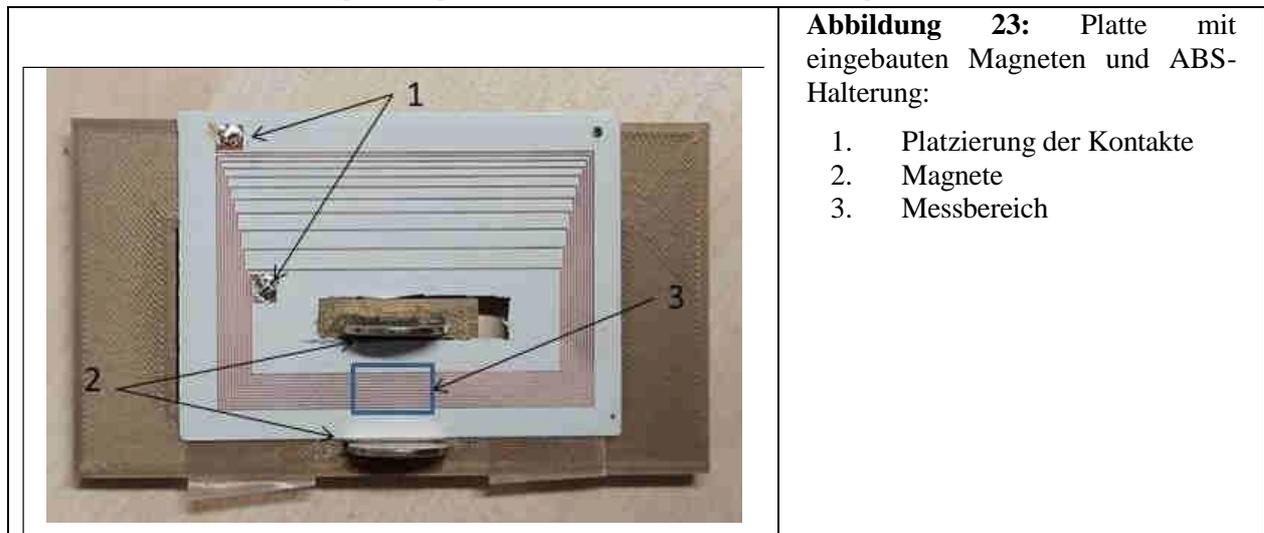
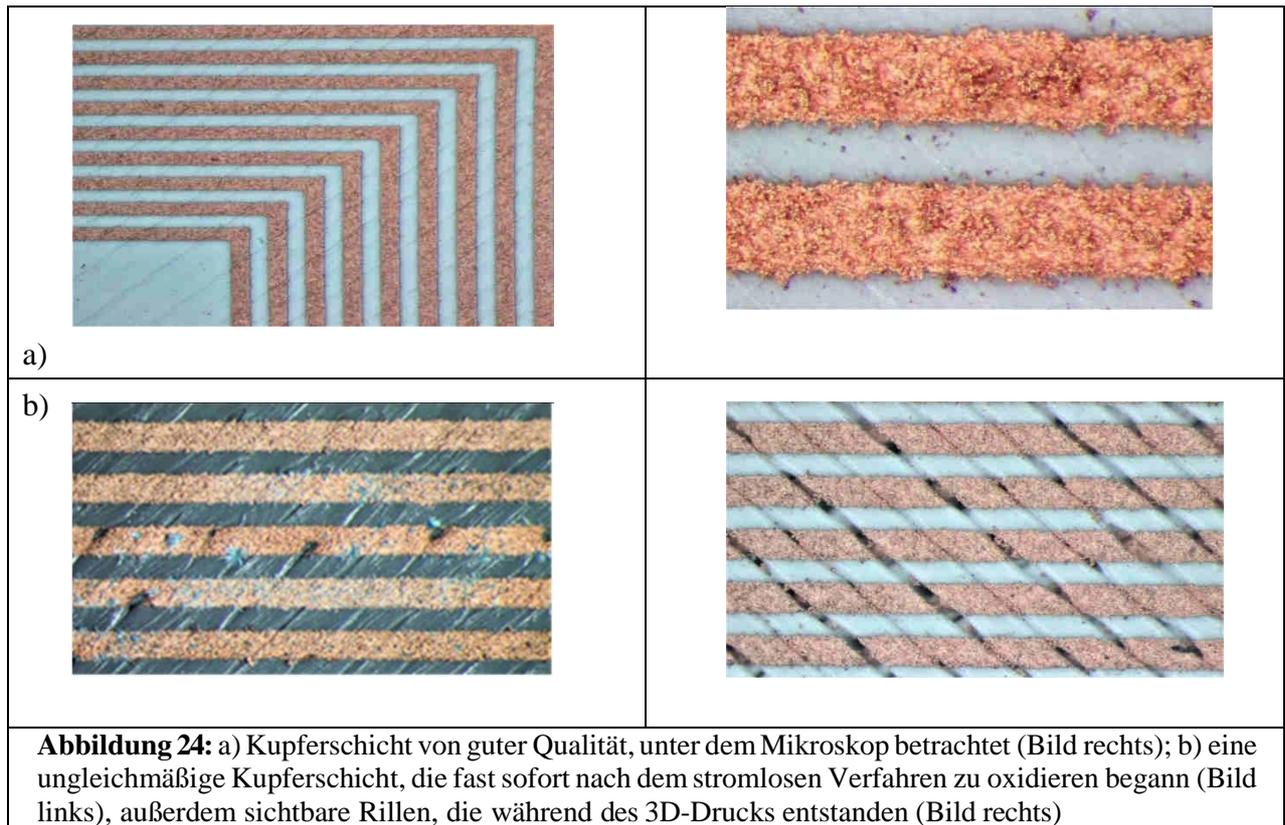


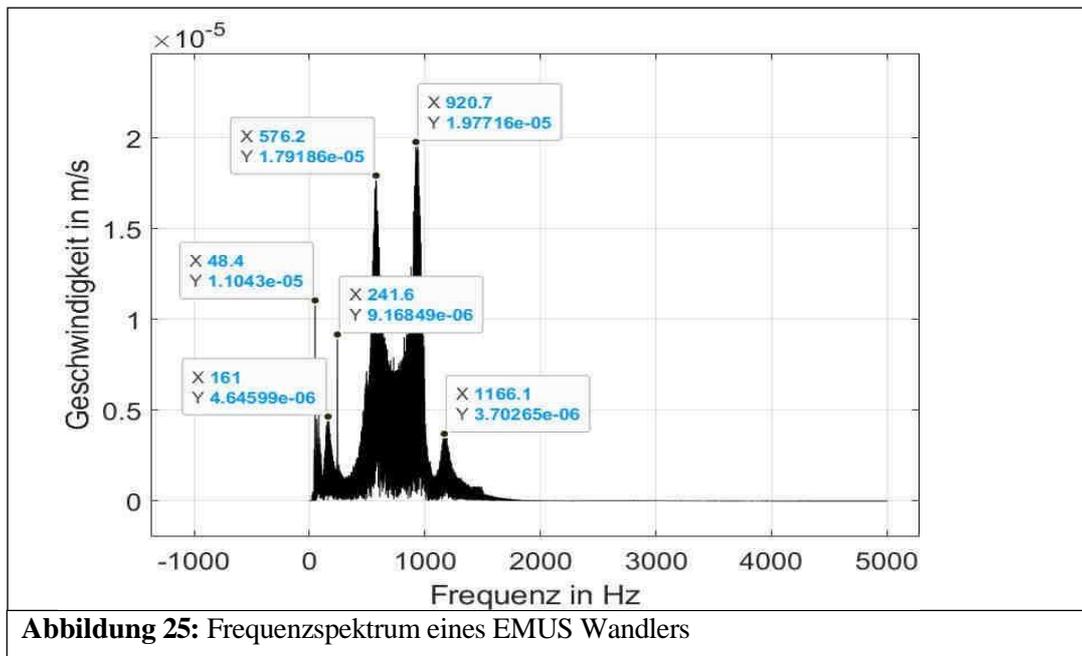
Abbildung 23: Platte mit eingebauten Magneten und ABS-Halterung:

1. Platzierung der Kontakte
2. Magnete
3. Messbereich

Der Fertigungsprozess war nicht optimal, denn nicht immer konnte eine ausreichend hochwertige Kupferschicht erzeugt werden (Abbildung 24). Ein weiterer Faktor könnte der Prozess der Laseraktivierung sein, nämlich die gewählten Parameter des Laserbetriebs, die die weitere Qualität der Platten beeinflussen. Der 3D-Drucker und die Materialverteilung während des Drucks wirken sich in gewissem Maße negativ auf die Qualität der Platten aus, indem sie Vertiefungen oder Risse bilden, die unter dem Mikroskop sichtbar sind, was eine gute Verteilung des Kupfers verhindert und den Kontakt unterbricht.



Die ersten Messungen (Laserdoppler-Vibrometer) wurden im Frequenzbereich von 10 bis 5000 Hz durchgeführt, die Anzahl der Messpunkte betrug 25 und die Messzeit 10 s. Die empfangenen Daten wurden im Matlab- Programm verarbeitet (ein Beispiel ist in Abbildung 25 dargestellt).



Für die nächsten Sensortests wurden verschiedene Plattengeometrien (Abbildung 26) und Methoden zur Verbindung der Drähte gefertigt. Von besonderer Bedeutung war die Konfiguration des Halters mit Magneten, ihre Anzahl, Form und die Kraft, mit der sie auf die Platte einwirken.

Zur Durchführung der Messungen wurden drei Geometrien der Spiralspulen erstellt, die sich durch die Breite der Finger und den Abstand zwischen ihnen unterschieden.

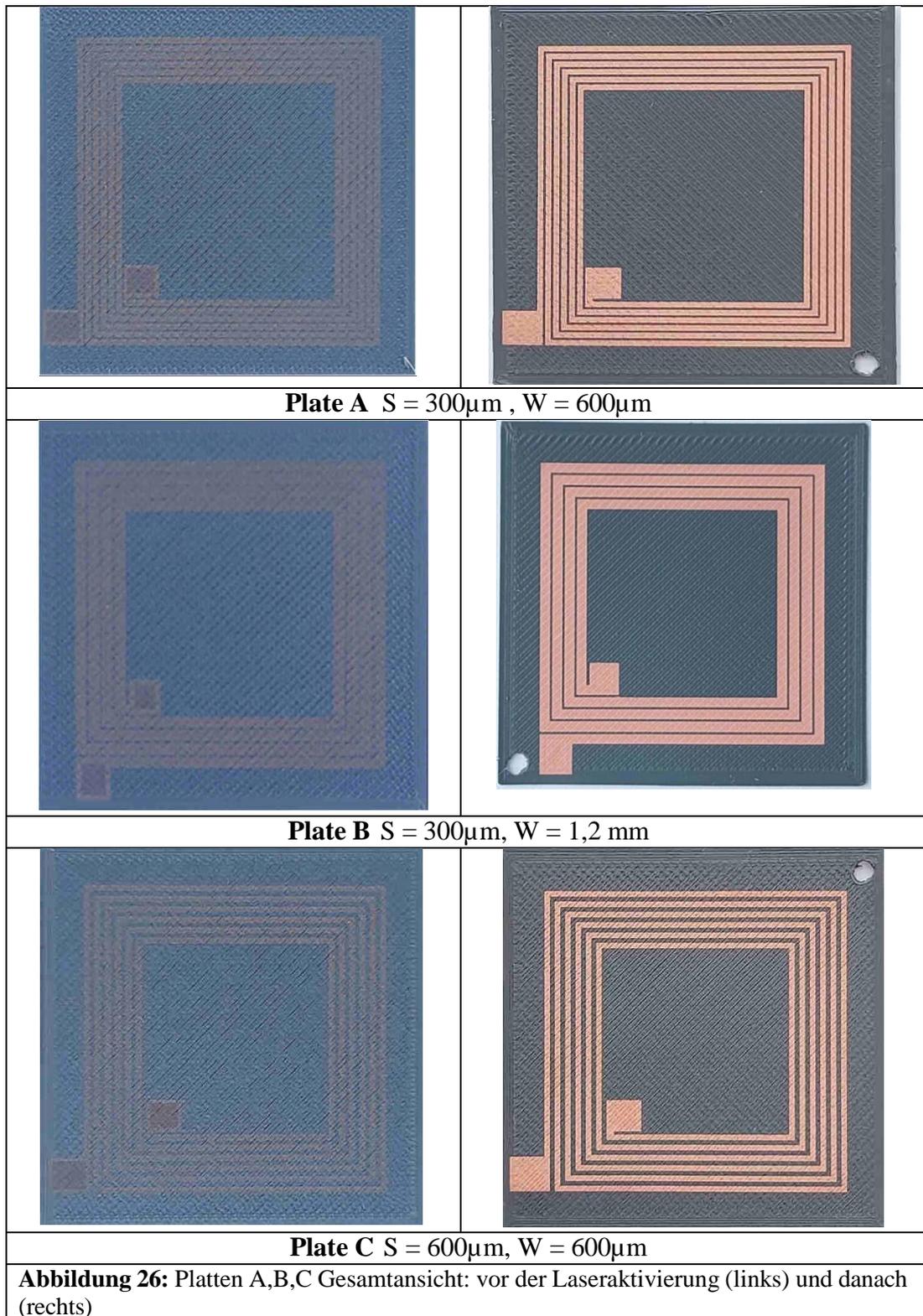


Plate A: Abstand (S) ist $300\ \mu\text{m}$, Breite (W) ist $600\ \mu\text{m}$

Plate B: Abstand (S) ist $300\ \mu\text{m}$, Breite (W) ist $1200\ \mu\text{m}$

Plate C: Abstand (S) ist $600\ \mu\text{m}$, Breite (W) ist $600\ \mu\text{m}$

Die Messungen wurden im Bereich bis zu 5 kHz durchgeführt. Für das Laserscanning-Vibrometer wurde ein 55-Punkte-Netz gewählt. Die Stromstärke betrug 10 V. Es wurden Messungen an Platten mit einer Dicke von 0,4 mm und 0,2 mm durchgeführt, wobei die Druckrichtung berücksichtigt wurde.

Tabelle 13: Messergebnisse des Laserscanning-Vibrometers für verschiedene Spulengeometrien und Druckrichtungen

| Plate | Platten-orientierung | Dicke 0,2 mm | Amplitude | Dicke 0,4 mm | Amplitude |
|----------|----------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------------------|
| Platte A | Links | 240 Hz | 67 $\mu\text{m/s}$ | 668 Hz | 30,06 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 298 Hz | 47,38 $\mu\text{m/s}$ | 741 Hz | 27,1 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 607 Hz | 23,54 $\mu\text{m/s}$ | 1312 Hz | 5,77 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 1846 Hz | 22,73 $\mu\text{m/s}$ | 1511 Hz | 10,59 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 2217 Hz | 20,54 $\mu\text{m/s}$ | | |
| | Rechts | 393 Hz | 187,74 $\mu\text{m/s}$ | 515 Hz | 22,51 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 2805 Hz | 45,7 $\mu\text{m/s}$ | 637 Hz | 14,27 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 3075 Hz | 40,4 $\mu\text{m/s}$ | 717 Hz | 14,95 $\mu\text{m/s}$ |
| | | | | 860 Hz | 22,41 $\mu\text{m/s}$ |
| | | | | 1363 Hz | 9,67 $\mu\text{m/s}$ |
| Platte B | Links | 416 Hz | 59,69 $\mu\text{m/s}$ | 589 Hz | 15,81 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 491 Hz | 33,86 $\mu\text{m/s}$ | 718 Hz | 38,49 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 679 Hz | 22,77 $\mu\text{m/s}$ | 1060 Hz | 9,62 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 2621 Hz | 34,94 $\mu\text{m/s}$ | | |
| | Rechts | 254 Hz | 47,42 $\mu\text{m/s}$ | 544 Hz | 12,98 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 298 Hz | 59,14 $\mu\text{m/s}$ | 748 Hz | 30,18 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 448 Hz | 44,83 $\mu\text{m/s}$ | | |
| | | 2211 Hz | 22,08 $\mu\text{m/s}$ | | |
| | | 2665 Hz | 23,53 $\mu\text{m/s}$ | | |
| | | | | | |
| Platte C | Links | 240 | 64,87 $\mu\text{m/s}$ | 603 Hz | 35,66 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 404 | 68,65 $\mu\text{m/s}$ | 1079 Hz | 16,07 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 964 | 27,05 $\mu\text{m/s}$ | 4276 Hz | 11,14 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 2299 | 38,02 $\mu\text{m/s}$ | 4708 Hz | 11,64 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 2577 | 19,19 $\mu\text{m/s}$ | | |
| | Rechts | 375 | 112,8 $\mu\text{m/s}$ | 558 Hz | 11,35 $\mu\text{m/s}$ |
| | | 487 | 138,1 $\mu\text{m/s}$ | 713 Hz | 38,24 $\mu\text{m/s}$ |

Für die Montage der Platte auf dem Halter wurden entsprechend den Abmessungen quadratische Löcher geschnitten. Die Gesamtansicht zeigt einen Halter mit eingebauten Magneten, auf dem eine Messplatte mit gelöteten Kontakten mit einem doppelseitigen Klebeband befestigt ist (Abbildung 27).

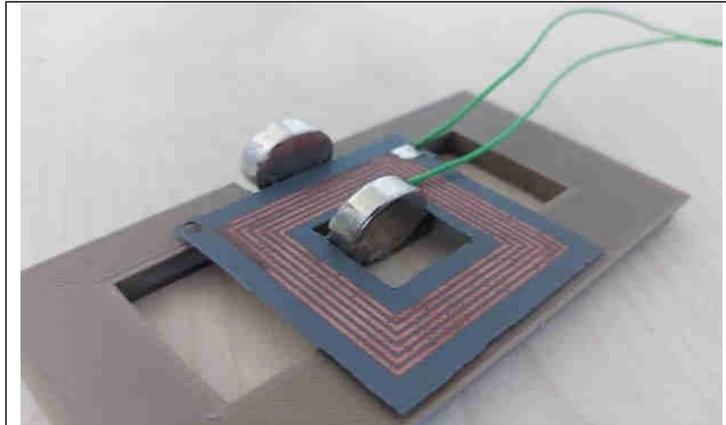


Abbildung 27: angepasstes Design eines EMUS Wandlers, Messplatte mit Kontakten

Zusammenfassung

Auf der Grundlage der gewonnenen Daten konnte eine prinzipielle Machbarkeit gedruckter, elektromagnetisch angeregter Wandler festgestellt werden. Es konnten jedoch keine dominanten Eigenresonanzen identifiziert werden, vielmehr sind die Strukturen durch eine Vielzahl von Schwingungsmodi charakterisiert.

AP8 Ultraschall-Anregung: Herstellung und Erprobung des EMUS

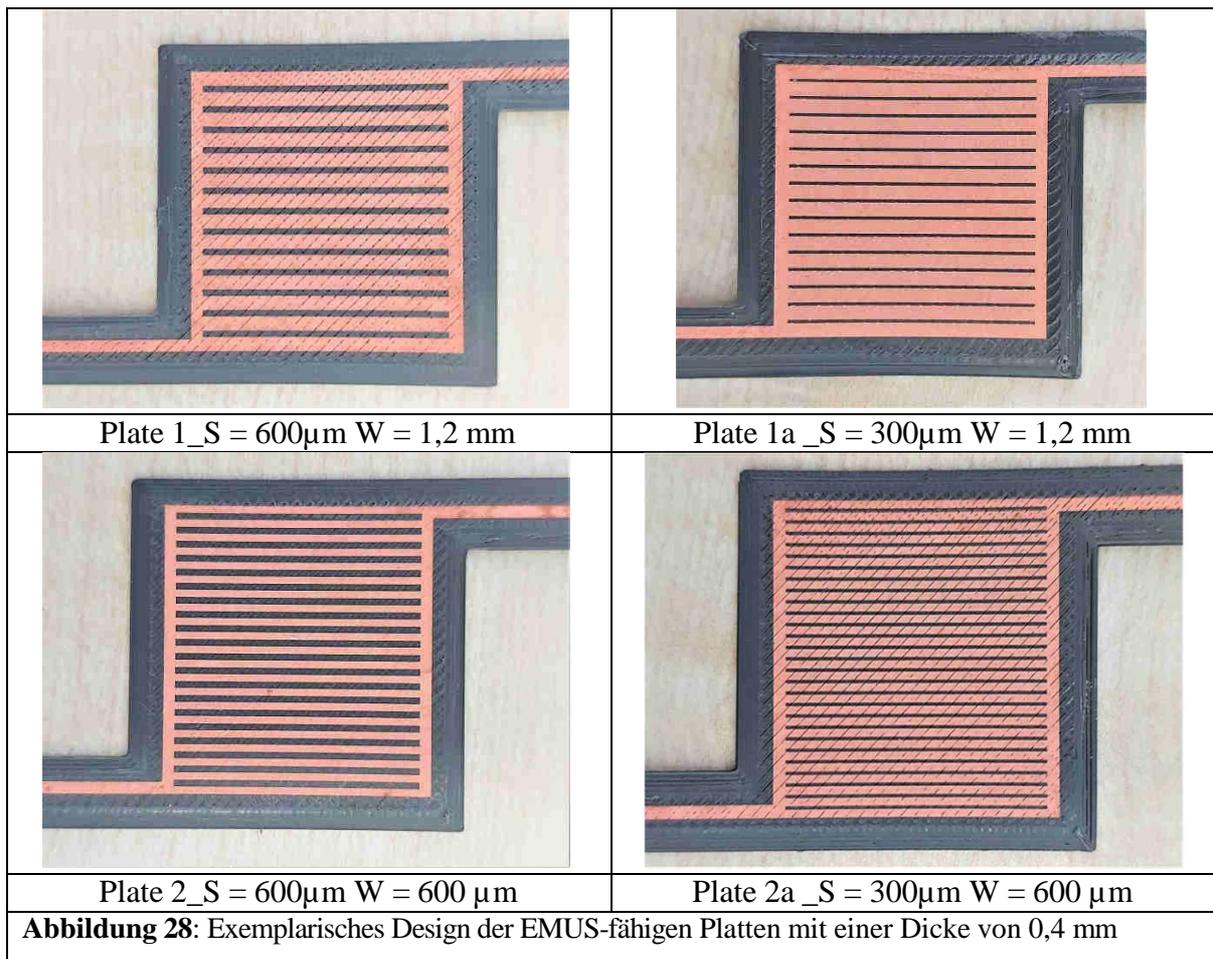
Das Konzept des elektromagnetisch angeregten akustischen Wandlers aus AP7 wurde in der gedruckten Struktur praktisch realisiert.

- Druck einfacher 2D-Teststrukturen, die den geometrischen, frequenzabhängigen und materialspezifischen Randbedingungen der Simulationsergebnisse entsprechen
- Implementierungsstrategien für metallische Strukturen im Kunststoff durch AMID-LDS, d.h. Erregerspule (Geometrie gemäß Simulation AP7) und elektrisch leitfähige Schicht auf passivem Substrat
- Implementierung leistungsfähiger Permanentmagneten/Elektromagneten
- Nachweis schwingfähiger Moden unter Verwendung von Referenzmethoden (z.B. Laservibrometer, Netzwerkanalysator)
- Identifikation von Longitudinalschwingung zur Ausbreitung in Flüssigkeiten und Verifikation anhand experimenteller Untersuchungen

Auf der Grundlage der in AP 7 gewonnenen Daten wurde eine Analyse durchgeführt, um die gedruckten Modelle und auch das Konzept für die Positionierung der Magnete und ihre Abmessungen zu verbessern.

Es wurden verschiedene Plattentypen mit unterschiedlichen Dicken (0,4 mm, 0,2 mm) oder Anschluss pads hergestellt und getestet. Exemplarisch gezeigt sind Platte 1 und Platte 1a (Abb. 28), die parallel verlaufende Finger aufweisen (Breite 1,2 mm) und verschiedene

Fingerabstände ($600\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}$) haben.



Zu bemerken ist, dass bei sehr kleinen Plattenstärken ($0,2\ \text{mm}$) durch Laseraktivierung (optische Fixierung der künftigen Kupferschicht) ein thermisches Verziehen der Platte nicht zu vermeiden war.

Die EMUS Platten wurden bei den Messungen zwischen den Magneten platziert und mit doppelseitigem Klebeband an der Halterung (Zuleitung) befestigt (Abbildung 29). Dadurch scheint die Messplatte "in der Luft zu hängen".

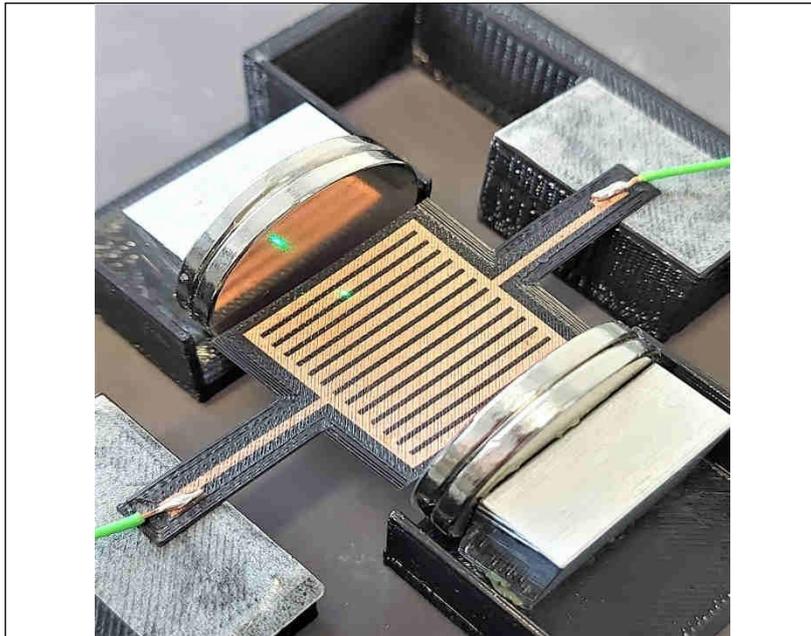


Abbildung 29: experimentelles Setup zur Vermessung eines EMUS Wandlers

Ein wichtiger Punkt ist immer noch das Löten der Drähte an den Kontaktpunkten, da der Draht immer noch schwerer ist als die Platte selbst, was dazu führen kann, dass die Platte nicht schwingt oder die Schwingungsdaten beeinflusst werden.

Die Messungen wurden im Bereich bis zu 5 kHz durchgeführt. Die Auswahl eines Gitters aus einer größeren Anzahl von Punkten sollte ein besseres Ergebnis für die Reaktion der Platte liefern. Daher wurde für den Laservibrometerscan ein 105-Punkte-Gitter gewählt (Abbildung 30). Die Stromstärke betrug 10 V.

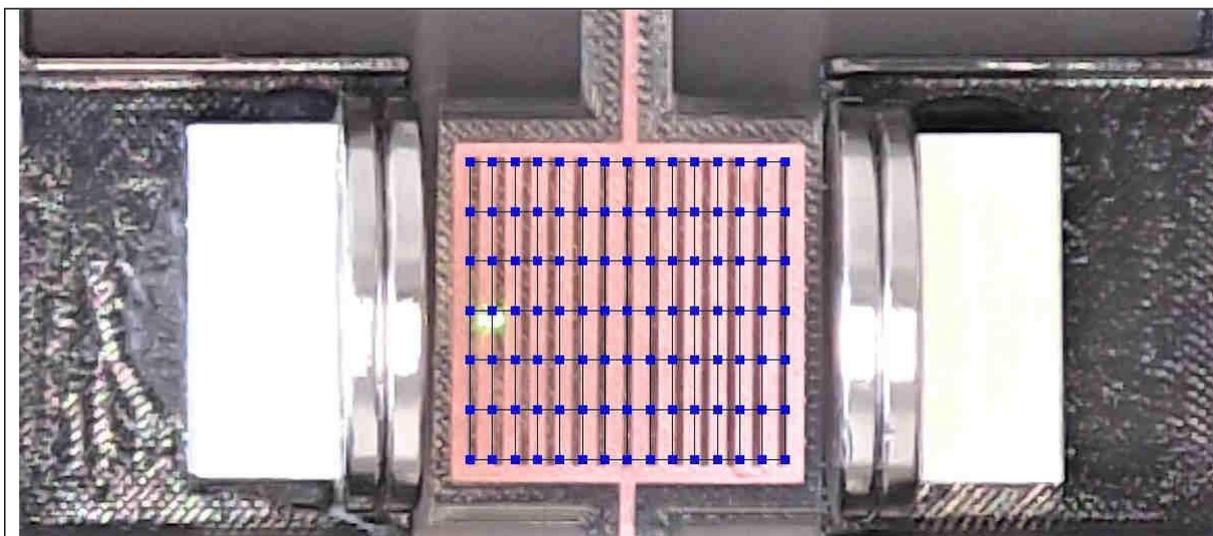


Abbildung 30: Draufsicht - 105 Punktraster auf einem EMUS Wandler am Laservibrometer

Tabelle 14 fasst exemplarisch die am Schwingungsmessplatz erfassten Daten verschiedener Platten zusammen. Es wurden die Frequenzen der stärksten Eigenschwingung dokumentiert.

Tabelle 14: Messergebnisse Laservibrometer

| Platte | Breite (w) | Abstand (s) | Spitzenwert [Hz] |
|---|-------------------|--------------------|-------------------------|
| Plate 1_ th 0,2 mm Seitenkontakt | 1,2 mm | 600µm | 28 |
| | | | 239 |
| | | | 282 |
| Plate 2_ th 0,2 mm Mittelkontakt | 1,2 mm | 600µm | 74 |
| | | | 124 |
| | | | 239 |
| | | | 407 |
| | | | 521 |
| | | | 715 |
| | | | 858 |
| | | | 2197 |
| | | 2952 | |
| Plate 3_ W =300/ 600/1200 µm | 300/600/1200 µm | | 30 |
| | | | 63 |
| | | | 80 |
| | | | 166 |
| | | | 244 |
| | | | 269 |
| | | | 370 |
| Plate 4_ vollständige Abdeckung | | | 35 |

Zusammenfassung

Resonante Elemente wie die vorgestellten EMUS Wandler zu designen und zu fertigen ist eine noch nicht vollständig durchdrungene Herausforderung. Es konnten erste Ansätze demonstriert werden, mit denen resonante mechanische Elemente auf Basis gedruckter Komponenten realisiert wurden.

Verschiedene Modifikationen von EMUS Geometrie, Haltern sowie Kombinationen von Magneten und deren Formen, die in der Arbeit verwendet wurden, zeigten nicht das erwartete Ergebnis und die gewünschte dominante Vibration der Platte. Da der Kunststoff selbst leicht ist und die Kupferschichten nur 5 µm dick waren, hatte der Einfluss der Magnete auf die gewachsene "Metall"-Schicht nicht die antizipierte Wirkung. Die gelöteten Kontakte haben zudem einen mechanischen Einfluss auf die frei liegenden Plattenstrukturen.

Mit der Ausdünnung der Platten (Ziel: bessere Anregung) gehen nachteilige Effekte wie Biegungen und Risse einher. Es wird angenommen, dass das Vorhandensein zusätzlicher Oberflächenrauigkeit ebenfalls zu qualitativ schlechteren Ergebnissen beiträgt, da noch nicht bekannt ist, wie sich die Metallteilchen, die nicht aktiviert werden, verhalten.

AP9 Kontaktlose Energieübertragung

Das Konzept der elektromagnetischen Übertragung von Energie basiert auf sich gegenüberstehende Spiralspulen. Die technologischen Herangehensweisen zur Fertigung dieser Spulen aus AP8 sollen hier fortgeführt Anwendung finden. Im Einzelnen wurde betrachtet:

- Analyse typischen Energiebedarfes von exemplarischen Sensoren/Aktuatoren, Diskussion von Ausführungsvarianten der magnetischen Anordnung, Bauraumbedarf
- Analytische/numerische Bewertung und Optimierung geeigneter Spulenordnungen (primär, sekundär) zur Ermittlung der induktiven Koppelparameter und des elektrischen Übertragungsverhaltens
- Steigerung des Wirkungsgrads durch Übertragung in Resonanzbeschaltung, leistungselektronische Schaltungssimulation
- AMID-LDS der Spulen gemäß Simulation auf passiven Substrat
- Messtechnische Verifikation von Wicklungskonzepten (primär-, sekundärseitig) hinsichtlich maximal übertragbarer Leistung, Erwärmung, Störemission

Ziel des Arbeitspakets war es, die Machbarkeit von miniaturisierten Induktivitäten unter Verwendung der Kombination von FDM-3D-Druck und LDS-Technologie als Basis für eine aktive drahtlose Energieübertragung zu untersuchen, auch um Überdruckmöglichkeiten zu prüfen.

Verschiedene Geometrieconfigurationen wurden verwendet, um das erforderliche Modell zu erhalten, zum Beispiel offen, vergraben, planar und dreidimensional. Untersucht wurden realisierbare Spulenparameter wie Leiterquerschnitt, Windungszahl und Aspektverhältnisse; Eigenschaften der eingesetzten Induktivitäten und deren zulässige Strombelastung sowie deren Vergleich.

Der Versuch mit dem Überdrucken hat gezeigt, dass dies prinzipiell möglich ist und Einfluss auf die Eigenschaften der Spule hat. Nicht nur die Leistungsübertragung ändert sich mit der Charge, sondern auch die Phasenverschiebung.

Induktivitäten

Die Induktivität ist dadurch gekennzeichnet, dass ein von den stromdurchflossenen Leitern aufgebautes zeitlich veränderliches Magnetfeld gemäß dem Induktiongesetz eine Spannung induziert, die nach der Lenzschen Regel der Bewegung der Ladungsträger entgegenwirkt und dadurch ein Spannungsabfall verursacht. Sie ist in der Lage, Energie zu speichern.

$$U = L \frac{di}{dt}$$

Grundlagen der Berechnungen der Induktivität bilden die Spulengeometrie die sich wie folgt auf die Spannung auswirkt:

$$L = \mu_0 * \mu_r * N^2 * \frac{A}{l}$$

Die Gleichung berücksichtigt nur ideale Spulen einer einfach gewickelten Spule mit $l \gg d$ wobei d den wicklungsfreien Innendurchmesser der Spule darstellt. Die Induktion wird sowohl für den Sender als auch für den Empfänger genutzt. Beim Sender bildet sich in Folge eines Stromdurchflusses durch einen Leiter ein Magnetfeld aus, welches eine Spannung an der Empfängerspule induzieren soll. Ziel ist es eine möglichst hohe Induktivität auf einer begrenzten Fläche zu erreichen.

Fertigung der Spulen

Die Versuche zeigten, dass das Drucken und Überdrucken in Xantar machbar sind. Hierfür wurden verschiedene Spulentypen gefertigt (Tabelle 15). Versuch 1 und 2 wurden hierbei getrennt von den restlichen Versuchen als erstes durchgeführt, da hiermit der Prozessverlauf geprüft wird. Die Versuche 3-5 wurden im Anschluss durchgeführt und zeigten einerseits ob der Versuch wiederholbar ist und andererseits ob der die Deckplatte Einfluss auf die Leistungsübertragung hat.

Tabelle 15: Versuchsaufstellung und Zweck

| Nr. | Versuch | Zweck |
|-----|----------------------------|---|
| 1 | Runde Spule | Prinzipielle Machbarkeit |
| 2 | Rechteckspule | Prinzipielle Machbarkeit |
| 3 | Doppelspule (rechteckig) | Potenzielle Steigerung der Leistungsübertragung |
| 4 | Runde Spule (überdruckt) | Leistungsänderung und Wiederholbarkeit |
| 5 | Rechteckspule (überdruckt) | Leistungsänderung und Wiederholbarkeit |

Drucken der Spulenplatten

Die Spulenplatten wurden aus reinem LDS 3764 Xantar im Ultimaker 3 Extended mit den Druckparametern mit Haftvermittler gedruckt (Tabelle 16):

Tabelle 16: Druckparameter

| Druckparameter | LDS 3764 Xantar |
|-----------------------|-----------------|
| Extrusiondüse | 0,4 AA |
| Schichthöhe | 0,2 mm |
| Wandstärke | 1,2 mm |
| Dicke oben/unten | 0.8 |
| Fülldichte | 60% |
| Füllmuster | Dreiecke |
| Drucktemperatur | 285°C |
| Bauplattentemperatur | 105 °C |
| Druckgeschwindigkeit | 50 mm/s |
| Lüftergeschwindigkeit | 0 |

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Druckparameter | LDS 3764 Xantar |
| Adhäsionshilfe | Haftmittler o. Adhäsionsfolie |

Laserstrukturierung und Galvanisierung der Spulen

Abbildungen 31, 32 zeigen die erstellten (gedruckten und galvanisierten) Spulen mit je zwei Ringpads als Markierung für die Bohrungen und zur Kontaktierung.

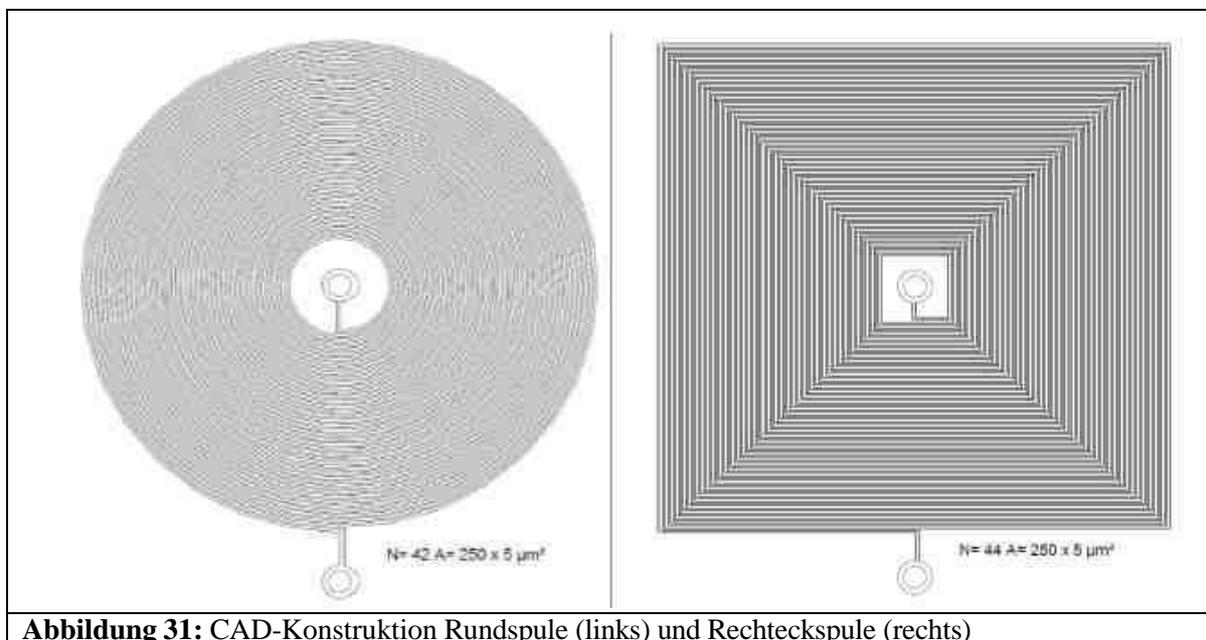


Abbildung 31: CAD-Konstruktion Rundspule (links) und Rechteckspule (rechts)

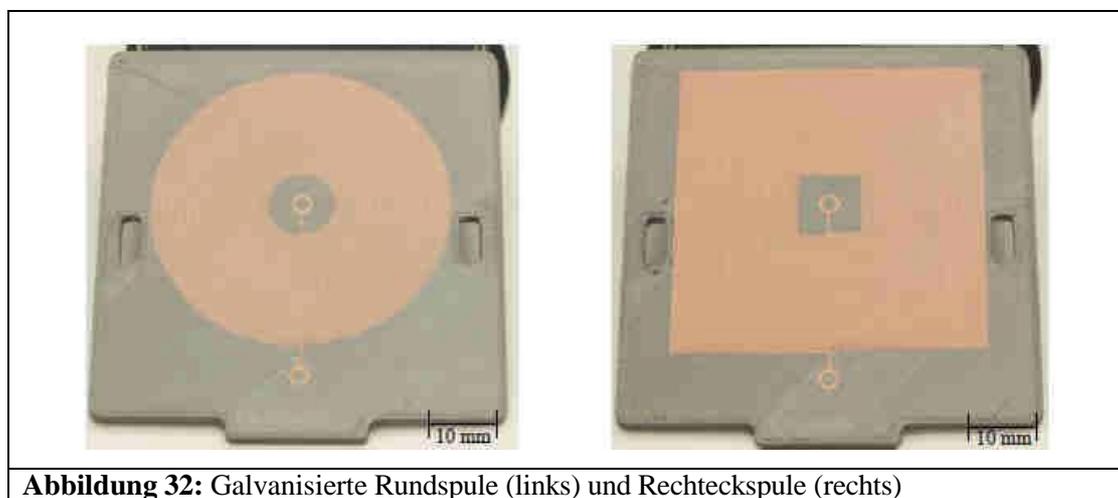


Abbildung 32: Galvanisierte Rundspule (links) und Rechteckspule (rechts)

Die galvanisierten Spulen wurden mittels Multimeter nach Galvanik jeweils Durchgangsgeprüft. Eine einfache optische Prüfung zeigte wenige elektrische Brücken zwischen den Leitern. Hierzu wurde eine mikroskopische Prüfung durchgeführt, um Brücken zu identifizieren und ggf. mechanisch zu beseitigen.

Charakterisierung der Spulen

Die Charakterisierung der Spulen wurde in mehreren Schritten durchgeführt. Zuerst wurden die über das Gleichstrommessverfahren ermittelbaren Widerstandswerte und anschließend die Spulencharakteristiken über ein LCR-Meter ermittelt. Darauf folgte die Ermittlung der

Übertragungsleistung zwischen den Spulen.

Ermittlung der Spule Charakteristiken mit Gleichstrommessverfahren

Das Gleichstrommessverfahren ist wichtig zur Ermittlung Leiterbahnwiderstandes der Spule. Hierzu wurde das Morpilot 17B Digitalmultimeter verwendet. Die Gleichstromwiderstände sind erwartungsgemäß höher als die theoretisch berechneten. Jedoch die zu erwartende Abweichung von 60% sind mit gemessenen Abweichungen mit Werten zwischen 26 bis 46% weitaus höher. Die Ursachen können die größere Leitbahnlänge und die Kontaktierung zwischen den Ebenen sein. Aufgrund der akzeptablen Ergebnisse wird von einer weiteren Optimierung in dieser Arbeit abgesehen.

Messung der Induktivität

Die Induktivität wurden mit dem Agilent 4395 A (Frequenzbereich bis 500 MHz) gemessen. Hier stellte sich ein stabiler Induktivitätswert bei einer Frequenz von 5 MHz ein. Es zeigte sich eine große Abweichung von 60 % zum errechneten Wert. Die Ursachen liegen zum Einem in den abweichenden Füllgrad der Spule durch eine nicht definierbare Kantenstruktur zum Anderem können die Metallionen im Polymer einen Einfluss auf die Induktivität haben. Da eine Optimierung der Induktivität den Rahmen dieses Projekt zeitlich übersteigen wird, wurden die schon gefertigten Spulen hinsichtlich Übertragungsleistung weiter untersucht.

Messung der Leistungsübertragung

Wie in Abbildung 33 dargestellt wurden die Platten in planparalleler Anordnung zueinander aufgestellt und vermessen.

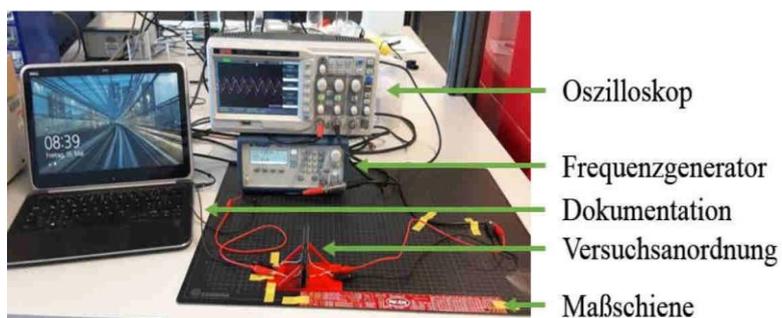
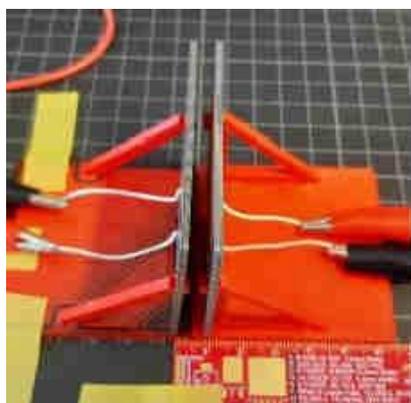


Abbildung 33: links: Anordnung der Spulenplatten zueinander, **rechts:** Versuchsaufbau für quantitative Messungen

Mit den ermittelten Werte wurde auf die Leistung geschlossen. Wie in Abbildung 34 dargestellt, zeigten sich hier schon große Unterschiede hinsichtlich der Leistungsübertragung. Die einfache Rundspule wies die höchste Leistungsübertragung zwischen 8,3% und 47%.

Tabelle 25: Versuchsauswertung

| Nr. | Versuch | $P_{\max th} [W]$ | $P_{\max m} [W]$ | $\Delta P [\%]$ |
|-----|-------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 1 | Runde Spule | 13,6 | 1,14 | 8,3 |

| | | | | |
|-----|----------------------------|------|-------|------|
| 2 | Rechteckspule | 11,5 | 0,174 | 1,5 |
| 2.1 | Doppelspule (rechteckig) | 12,5 | 0,084 | 0,6 |
| 3 | Runde Spule (überdruckt) | 25,6 | 0,206 | 0,8 |
| 4 | Rechteckspule (überdruckt) | 11,0 | 5,21 | 47,3 |
| 5 | Runde Spule | 10,6 | 0,299 | 2,8 |

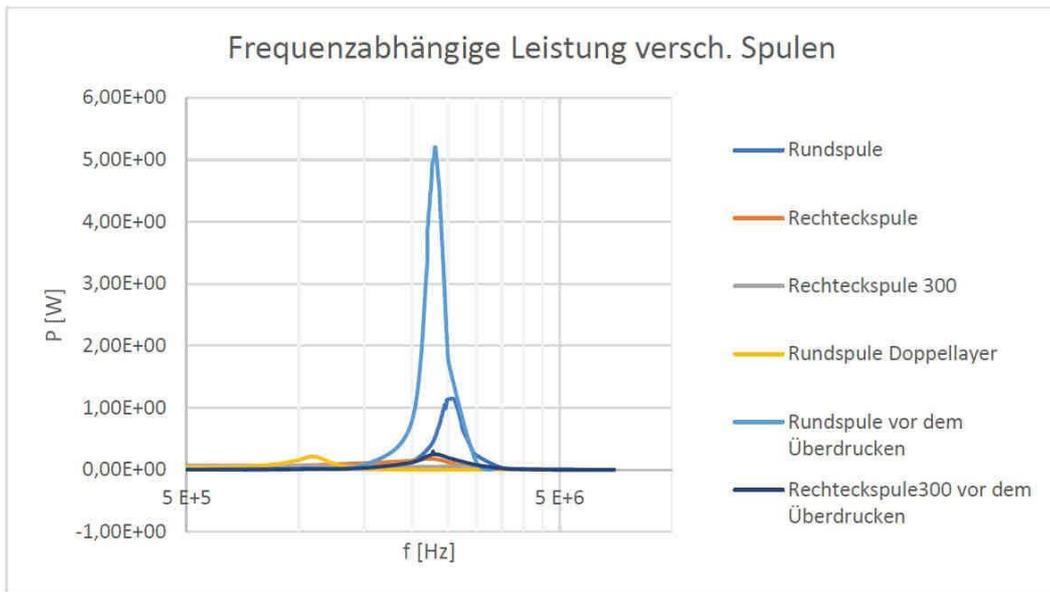


Abbildung 34: Leistung verschiedener Spulenvarianten in Abhängigkeit der Frequenz

Folgende Einflussgrößen verändern die Leistungsübertragung:

- Wärmeentwicklung im Leiter → Widerstandsänderung im Leiter
- Veränderung der Kapazitäten zwischen den Leiterzügen und zwischen den Spulen durch ansteigende elektrische Spannungen
- Unbekannter Einfluss des Materials auf das Magnetfeld
- Magnetische Flussdichte ist in den Spulen nicht homogen.

Eine Berechnung der gesamten Einflussgrößen ist numerisch nicht möglich, dies müsste durch z.B. FEM-Simulation geschehen. Die Abweichung wird trotzdem nicht marginal sein, da die Kupferlage aufgrund der Kornbildung und unregelmäßigen Struktur eine hohe Strukturvarianz aufzeigt. So zeigen sich schon Unterschiede der elektrischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Chargen. Jedoch konnte demonstriert werden, dass mit dem Fertigungsverfahren eine elektrische Leistung übertragen werden. Um Berechnungen und Messungen zu bestätigen, wurde eine Leistungsaufnahme von 0,06 W an einer Leuchtdiode betrieben werden. Die Reichweiten der Leistungsübertragung wurden quantitativ ermittelt und qualitativ bestätigt. Die Reichweitenermittlung wurde mit der Frequenz der Leistungsspitze durchgeführt (Abb. 35).

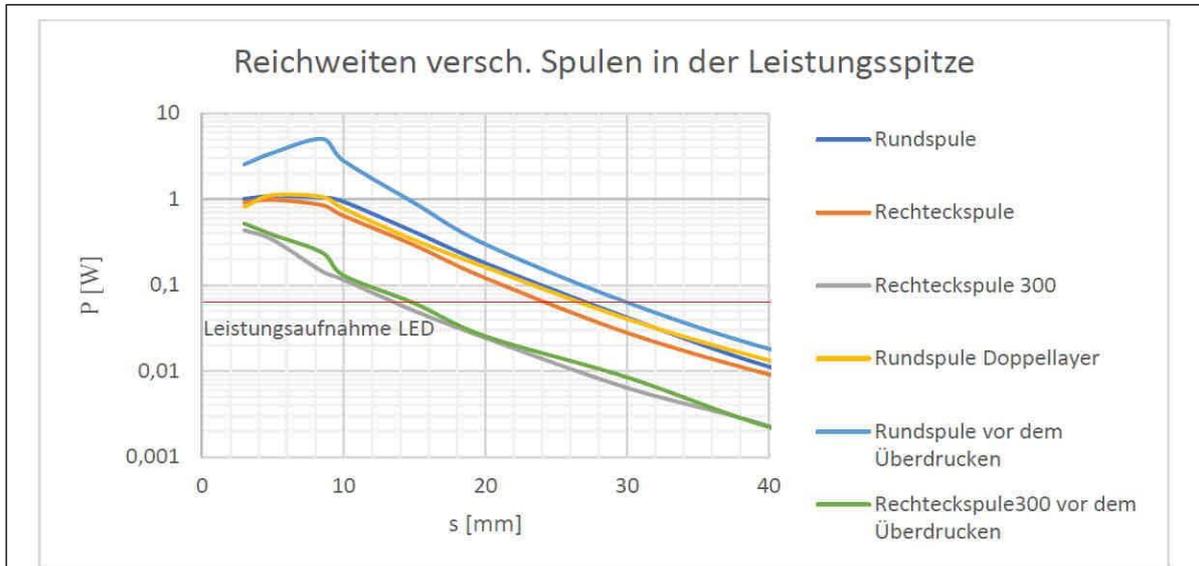


Abbildung 35: Reichweiten unterschiedlichen Spulentypen in der Leistungsspitze

Messung der Leistungsänderung vor und nach dem Überdrucken

Erweiternd wurde geprüft, ob ein Überdrucken prinzipiell möglich ist und ob dies ein Einfluss auf die Charakteristik der Spule hat. Hierzu wurden die Proben vor und nach dem Überdrucken gemessen. Der Überdruck wurde wie in **AP5** beschrieben durchgeführt. Hierzu wurde eine Justier- und Haltvorrichtung gedruckt.

Abbildung 36 zeigt die Leistungsübertragung nach dem Überdrucken, die sich als relativ konstant erwies.

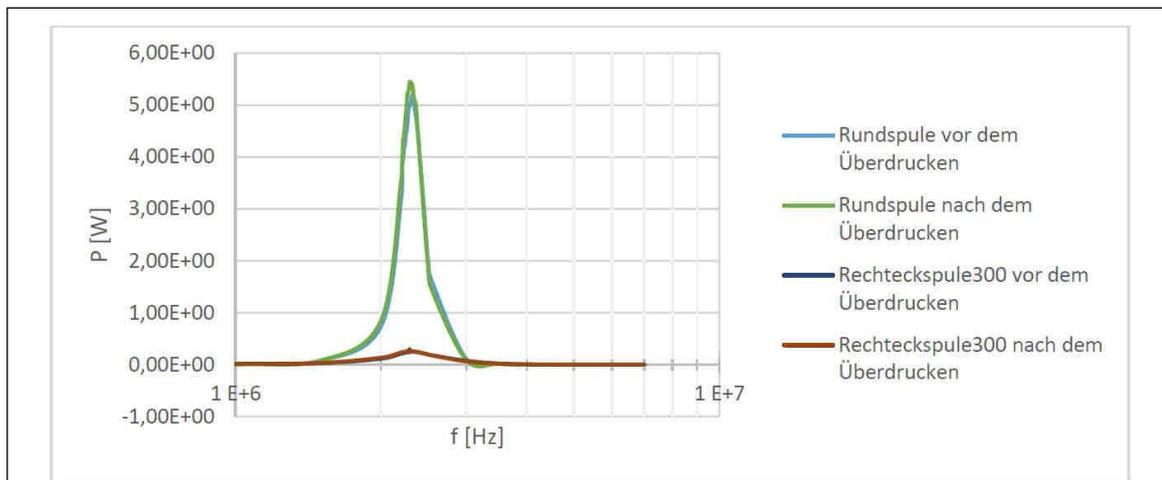


Abbildung 36: Leistungsänderung nach dem Überdrucken

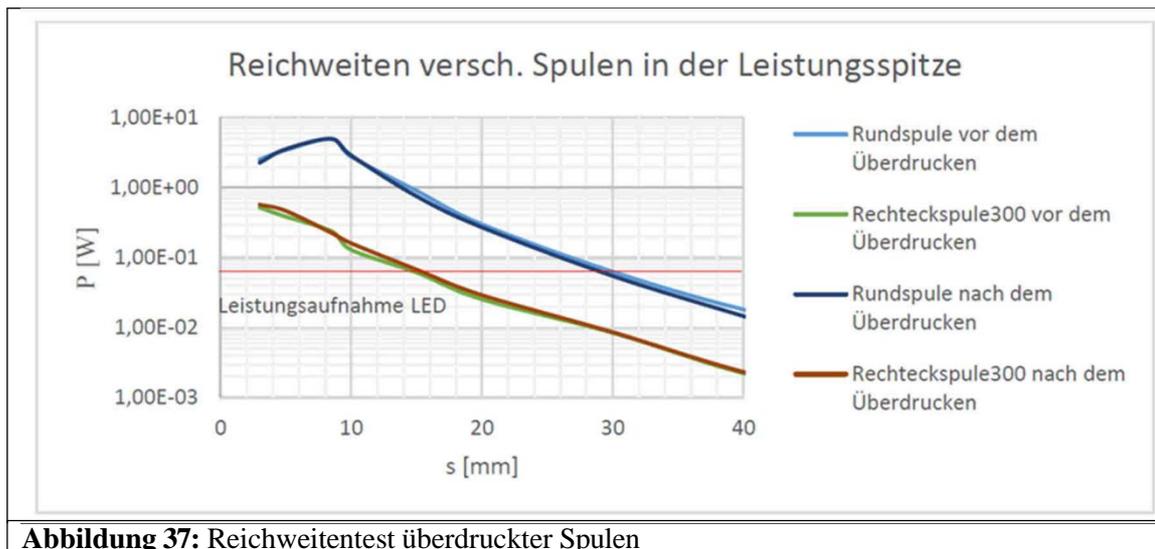


Abbildung 37: Reichweitentest überdruckter Spulen

Ein Überdrucken bedeutet kaum Leistungseinbuße, wenn die Übertragungsfrequenz variiert werden kann. Die Abbildung 37 zeigt nur eine minimale Veränderung der Reichweite nach dem Überdrucken. Die Ursachen liegen wahrscheinlich in der veränderten Permittivität im Zwischenraum zwischen den Spulen.

Ergebnisse und Zusammenfassung

Die Versuche haben gezeigt, dass mit der FDM-LDS-Technologie kontaktlos Energieübertragende Systeme aufgebaut werden können. Die Technologie hat aber noch nicht den Reifegrad erreicht, um beliebige Anwendungen bedienen zu können. Es zeigte sich, dass es wichtig ist ein Optimum an Oberflächenqualität im 3D-Druck zu schaffen, um eine möglichst ebene Fläche für das Galvanisier-Verfahren zu ermöglichen.

Auch ist die Struktur der Kupferlage schwer zu definieren, da das thermische und elektrische Verhalten der Schicht noch nicht vollständig charakterisiert ist. Hier steckt das meiste Potenzial der Effizienzsteigerung, auch für das Verhalten bei höheren Frequenzen. Der Einfluss zwischen Rauheit und dem kapazitiven Effekt führt zu Feldstärkenüberhöhungen, wie auch Korngrenzen im Material und Lunker. Erst wenn die Fertigungsprozesse charakterisiert und Proben wiederholbar mit nahezu identischen Eigenschaften gefertigt werden können, kann eine zuverlässige Eigenschaftsvorausberechnung entwickelt werden.

AP10 Demonstrator

In AP10 wurde in Zusammenarbeit mit dem AP9 (TEPROSA) ein Demonstrator eines additiv gefertigten gekapselten Sensorsystems erstellt.

- Fusion der entwickelten sensorischen (AP3, 6) und aktuatorischen (AP 4,5,8,9) Verfahren in einem Musterprozess und anhand einer typischen Flüssigkeit als Zielmedium
- Simultane Darstellung aller Wirkprinzipien

Auf der Grundlage der aus den Experimenten der Arbeitspakete 3, 6 sowie 4, 5, 8, 9 gewonnenen Daten wurden mehrere Änderungen des endgültigen Demonstrators entworfen.

Für die endgültige Demonstrationsplattform wurde ein etwas anderes Material, Xantar 3760 LDS, verwendet (da die Menge des vorherigen Filaments begrenzt war), das uns von Mitsubishi zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Filament unterscheidet sich farblich leicht vom vorherigen Filament Xantar 3764 LDS und ist nun schwarz und sieht glänzender aus. Die Druckeinstellungen und Parameter für die Laseraktivierung blieben aber gleich. Die Proben wurden mit dem Ultimaker 3 Extended 3D-Drucker hergestellt.

Druckparameter:

- Drucktemperatur 270 - 280° C
- Temperatur der Druckplatte 105° C
- Druckgeschwindigkeit 50 mm / s
- Materialfluss 95%
- Schichtdicke 0,2 mm
- Düsendurchmesser 0,4 mm.

Mit Hilfe des AutoCAD-Programms wurde eine CAD-Datei erstellt, und anschließend wurden die Platten entsprechend dem erstellten Entwurf mit dem Laser aktiviert.

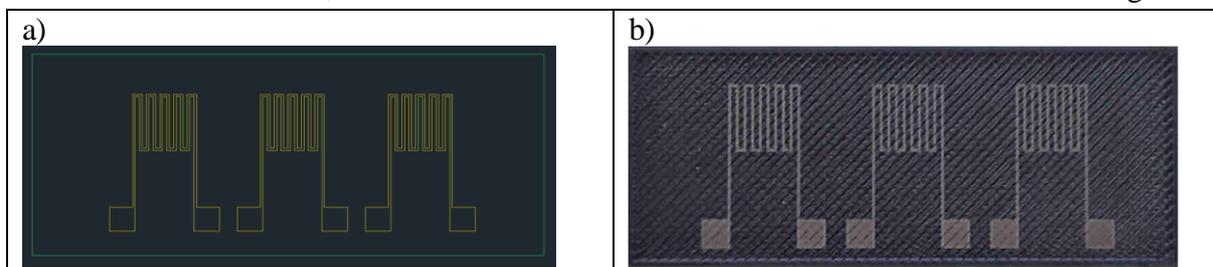
Laser-Parameter:

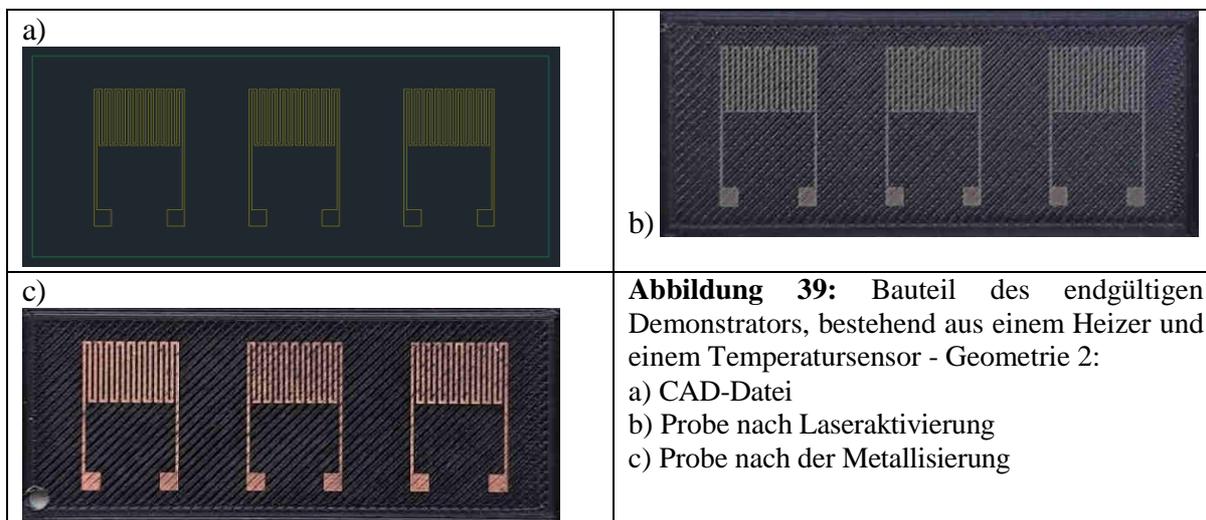
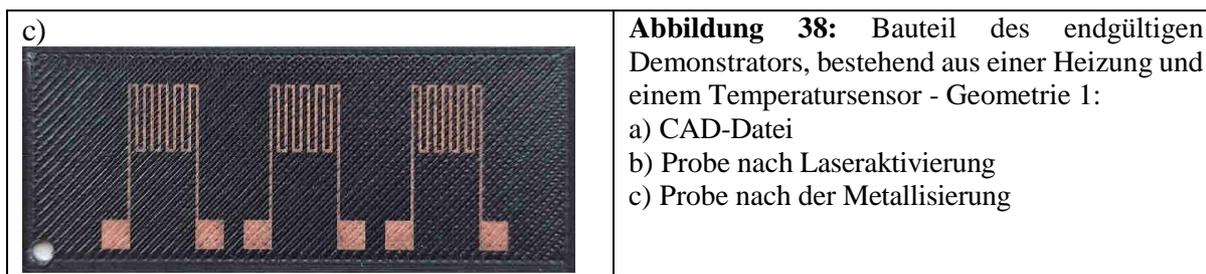
- $P=7W$;
- $F= 60 \text{ kHz}$;
- $V= 2\text{m/s}$;
- Schlupfwinkel $30\mu\text{m}$.

Für die Entwicklung des endgültigen Demonstrators wurden Geometrieoptionen für verschiedene Anwendungen entwickelt.

Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen schrittweise Mäanderplatten, die als Temperatursensor und Heizung fungieren können und ein modularer Teil des gesamten Demonstrators sind. Die Plattengröße beträgt $50 \times 25 \times 0,6 \text{ mm}$, auf denen 3 Mäander angeordnet sind. Die Dicke der Mäanderfinger betrug $300\mu\text{m}$ und der Abstand zwischen ihnen $300\mu\text{m}$, was auch für die Laseraktivierung sehr günstig ist, um ein gutes Ergebnis zu erzielen, da die Schraffur $30\mu\text{m}$ beträgt. In Abbildung 38 beträgt die Länge jedes Mäanders $86,7 \text{ mm}$, in Abbildung 39 beträgt sie $147,1 \text{ mm}$.

In jedem Mäander wurden die Kontaktpunkte speziell weiter entfernt platziert, um das Löten der Drähte zu erleichtern, und es wurde auch ein Platz für den Druck des Kanals benötigt.



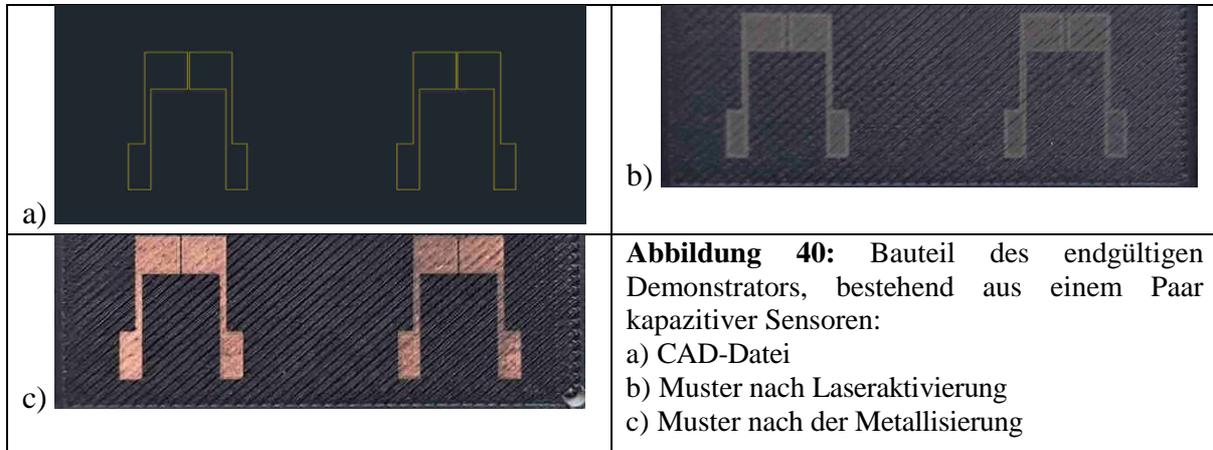


Nach der Durchführung des Galvanisierungsprozesses war optisch erkennbar, dass die Ausbildung der Kupferschicht nicht durchgehend gut erfolgte. Bei der Messung des Widerstands wurde festgestellt, dass es an einigen Stellen der Mäanderfinger keinen Punktkontakt gibt oder der Kontakt zum Anschlussdraht verloren gegangen ist. Außerdem ist nach dem Metallisierungsprozess zu erkennen, dass die Farbe der gebildeten Kupferschicht anders und blasser ist als bei den Proben der vorherigen Arbeitspakete.

Der nächste Grund für die fehlende Bildung einer durchgehenden Kupferschicht könnte eine zu hohe Oberflächenrauheit der Druckplatte sein. Daher bilden sich zwischen den Drucklinien Vertiefungen, was ebenfalls kritisch für die Bildung einer 5 µm dicken Kupferschicht ist, da die kleinste Dicke der Druckschicht 0,1 mm beträgt.

Obwohl die Proben mit einer minimalen Druckschicht von 0,1 mm nachgedruckt wurden, hatte diese Geometrie nicht den gewünschten Effekt, und der Kontakt ging an einigen Stellen der Mäander immer noch verloren. Auch die Verlängerung der Dauer des Metallisierungsprozesses brachte nicht den gewünschten Effekt.

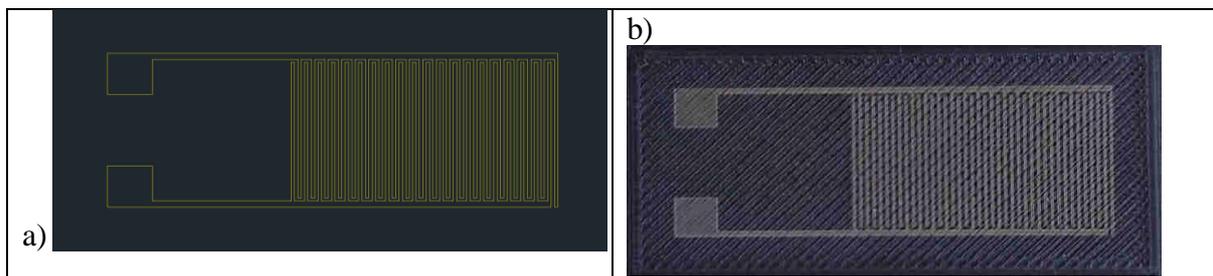
Die nächste Komponente des Demonstrators ist ein kapazitiver Sensor. Es handelt sich um 2 kapazitive Sensoren auf einer 50x25x0,6 mm großen Platte (Abbildung 40). Bei dieser Geometrie wurde die Kupferschicht beim erneuten Bedrucken der Proben mit einer minimalen Druckschichtdicke von 0,1 mm gebildet.

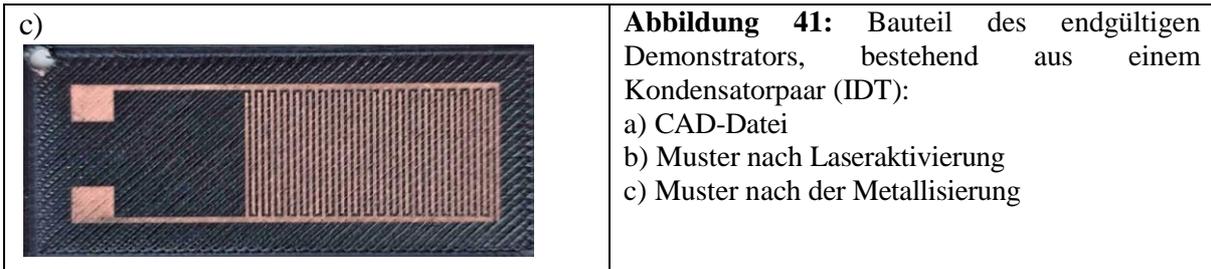


Für Experimente sollte ein offener/geschlossener Kanal mit einem Einlass und einem Auslass für den Durchfluss der Flüssigkeit gedruckt werden. Dies wird später bei der Beschreibung des Demonstrators gezeigt.

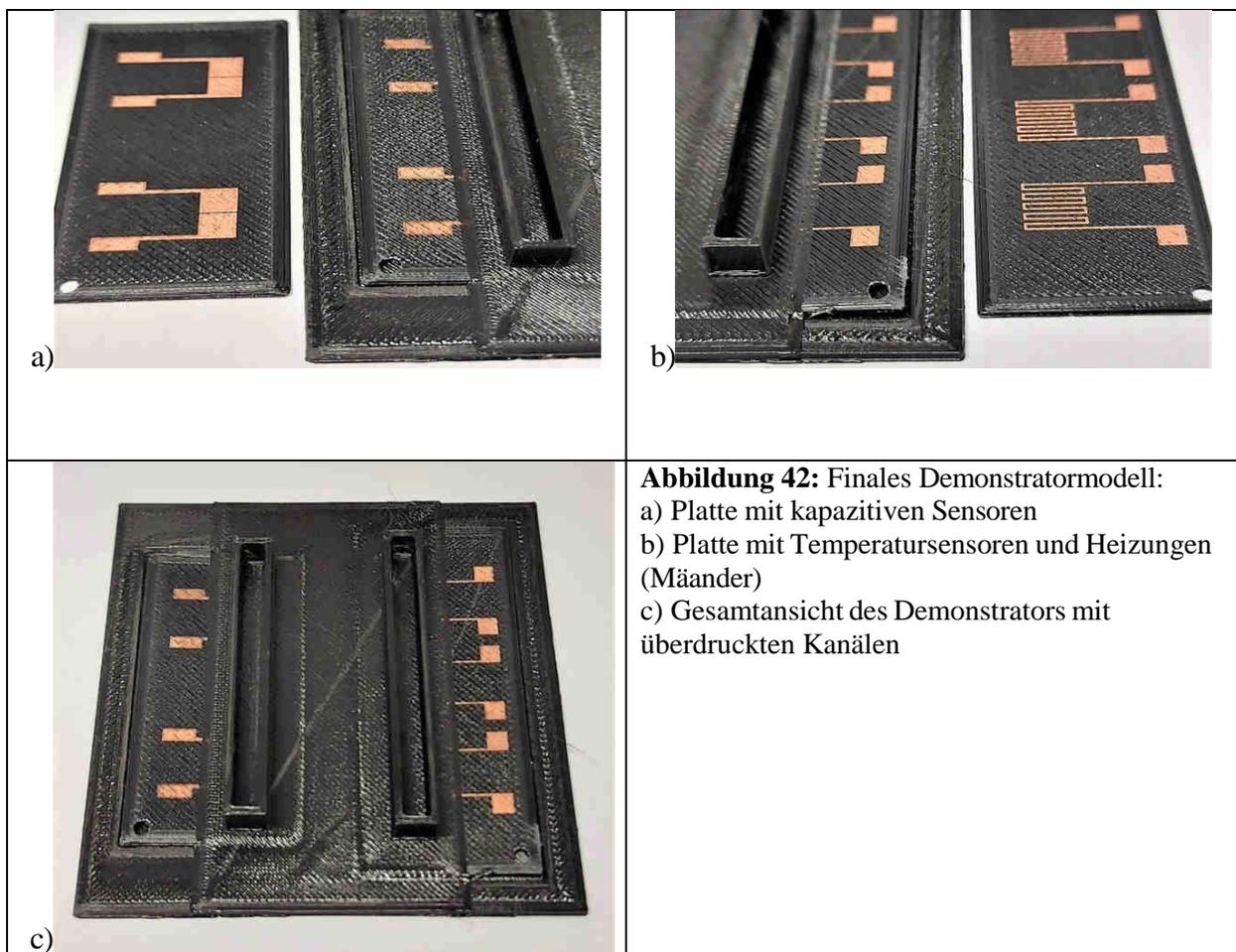
Das nächste Modell wurde für einen kapazitiven Sensor entwickelt - Inter Digitated Capacitor (IDC)-Struktur (Abbildung 41). Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von Platten mit den Maßen 50x25x0,6 mm gedruckt. Die Länge der einzelnen Finger betrug 14 mm, die Breite und der Abstand zwischen ihnen 300 μm . Es war geplant, eine rechteckige oder runde Messzelle (Kanal) über die Elektroden für Experimente zu drucken.

Durch eine weitere Modifikation des Filaments wurde die Kupferschicht auch bei der bisher verwendeten Fingerbreite von 300 μm nicht ausreichend dicht ausgebildet; ein weiterer Schwachpunkt ist die erhöhte Oberflächenrauigkeit, die die Kupferbildung behindert. Wie bei den Mäandern kam es zu einer punktuellen Unterbrechung des Kontakts der Kupferschicht entlang der Länge der Finger oder an den Übergängen.





Da die Idee des endgültigen Demonstrators darin bestand, eine Art modulare Plattform zu schaffen, deren Bestandteile ausgetauscht werden können, um so neue Modifikationen zu schaffen, wurde ein spezieller Halter gedruckt, in den die erforderlichen Teile (Platten) eingefügt und dann Kanäle über die fertigen Elektroden gedruckt wurden (Abbildung 42). Beim Drucken der Kanäle wurde auch eine 0,2 mm hohe Isolierschicht gedruckt.



Beim Überdrucken von Kanälen können die folgenden Probleme auftreten:

- Wenn die Düse über eine 5 µm dicke Kupferschicht fährt, kann dies zu Kratzern führen oder den Kontakt vollständig zerstören;
- zwischen der Kupferschicht und der Isolierschicht kann sich an einigen Stellen Luft befinden oder die Isolierschicht kann anschwellen, da sich der Kunststoff manchmal ungleichmäßig „legt“;

- Außerdem wird ein gewisser Druck auf die Platte ausgeübt, die in den Halter eingesetzt wird, was zur Bildung eines kleinen Verschiebungswinkels führt.

Der PC-Kunststoff mit der Kupferschicht wurde mit dem PDMS-Material kombiniert, aus dem der Kanal und die Isolierschicht hergestellt wurden. PDMS ist transparent, und der verwendete Kunststoff macht es nicht möglich zu sehen, was mit den Elektroden während des Experiments geschieht. Aus der fertigen, gehärteten PDMS-Schicht wurden Öffnungskanäle ausgeschnitten, und anschließend wurde eine Struktur mit einem geschlossenen Kanal geschaffen (Abbildung 43).

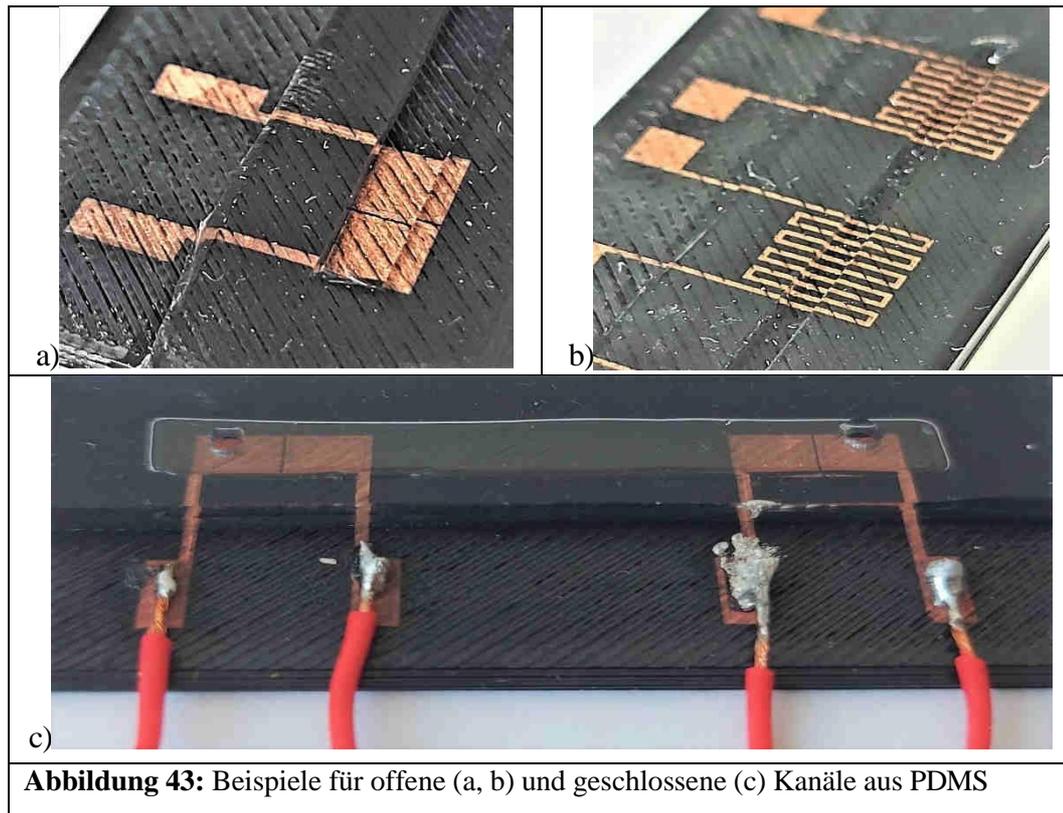


Abbildung 43: Beispiele für offene (a, b) und geschlossene (c) Kanäle aus PDMS

Zusammenfassung

Für den Druck der Komponenten des endgültigen Demonstrators wurden die zuvor getesteten Geometrien und Parameter verwendet, aufgrund von Materialverfügbarkeit beim Hersteller Mitsubishi aber aus Xantar 3760 LDS- Material hergestellt.

Mäandermuster mit einer Fingerdicke von $300\ \mu\text{m}$ und einem Abstand von $300\ \mu\text{m}$ wurden bereits zuvor gedruckt und die Kupferschichten waren recht gut ausgebildet, aber es wurde Xantar 3764 LDS-Filament verwendet. Im Gegensatz dazu sind die Ergebnisse bei Verwendung von Xantar 3760 LDS nicht vielversprechend und weisen weitere Unwägbarkeiten auf. Dies könnte darauf hindeuten, dass eine geringfügige Änderung des Filaments zu einer Verschlechterung der Leistung des Beschichtungsprozesses führen kann. Es ist möglich, dass die Metallpartikel im Inneren des Polycarbonats eine andere Dispersion (größer) aufweisen und sich während der Laseraktivierung eine nicht kontinuierliche optisch aktivierte Schicht bildet, so dass die Kupferschicht nach der Metallisierung ungleichmäßig wird und sich die

Kupferschicht etwas zufällig aufbaut. Das Ergebnis sind Punkte, an denen die gebildete Kupferschicht weniger als 5 μm beträgt, wodurch der Kontakt innerhalb des Mänders unterbrochen wird.

Eines der Hauptprobleme der FDM-Technologie ist die erhöhte Oberflächenrauheit, die den Prozess der Laseraktivierung und die Bildung einer Kupferschicht beeinträchtigt. Selbst bei der kleinsten 3D-gedruckten Linienstärke von 0,1 mm bilden sich Rillen, wodurch eine "wellige" Oberfläche entsteht. Für den Durchgang eines Laserstrahls mit einer Durchlassöffnung von 30 μm ist es nicht möglich, die Oberfläche des Polymer-Kunststoffs leicht zu "glätten", so dass die Rillen leicht geglättet werden, aber nicht ausreichend. Das hat zur Folge, dass auch die Kupferschichten wellenförmig wachsen, was zu einer losen Beschichtung oder zu Kontaktabbrüchen führen kann.