

FAU Studien aus dem Maschinenbau 457

Simone Neermann

Untersuchung photonischer Sinterverfahren
und Entwicklung eines neuen elektrischen
Messverfahrens zur Qualifizierung der
Sinterung gedruckter Elektronik

Simone Neermann

Untersuchung photonischer Sinterverfahren und Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens zur Qualifizierung der Sinterung gedruckter Elektronik

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 457

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Simone Neermann

**Untersuchung photonischer
Sinterverfahren und Entwicklung eines
neuen elektrischen Messverfahrens
zur Qualifizierung der Sinterung
gedruckter Elektronik**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2025

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Kontakt: Simone Neermann, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg, ([ror https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)), ORCID: 0009-0004-8409-5349

Bitte zitieren als

Neermann, Simone. 2025. *Untersuchung photonischer Sinterverfahren und
Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens zur Qualifizierung der
Sinterung gedruckter Elektronik*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band
457. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-801-9

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-800-2 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-801-9 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-801-9

**Untersuchung photonischer Sinterverfahren und
Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens
zur Qualifizierung der Sinterung gedruckter Elektronik**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Simone Neermann, M.Sc.

aus Hutthurm

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 20.11.2024

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Klaus Helmreich

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für die Unterstützung meiner Forschungsarbeit, der gewährten wissenschaftlichen Freiheiten und vor allem das entgegengebrachte Vertrauen und die Motivation zur Fertigstellung dieser Arbeit nach meiner aktiven Zeit am Lehrstuhl. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Florian Risch für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Helmreich danke ich für die Übernahme des Koferates und die exzellente Zusammenarbeit. Ganz herzlich möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Erdmann Spiecker bedanken für die Bereitschaft als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums zur Verfügung zu stehen.

Diese Arbeit beruht in Teilen auf Ergebnissen verschiedener vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderter Projekte. Für die gute Zusammenarbeit möchte ich mich herzlich bei den beteiligten Industriepartnern und Forschungseinrichtungen sowie der Forschungsvereinigung 3-D MID.e.V. bedanken. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle dem Team Additive Fertigung des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik, Gerald Gold, Mark Sippel, Konstantin Lomakin und Michael Ehrngruber, die mich teilweise bereits seit meiner Masterarbeit begleiten und ohne deren Rückhalt und fachliche Diskurse diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Mein Dank gilt ebenso meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, allen voran meinen Kollegen und Freunden aus dem Forschungsbereich Elektronikproduktion. Besonders bedanken möchte ich mich bei Martin Muckelbauer, Marcel Baader, Felix Häußler und Nils Thielen, aber auch bei den Alumni Jochen Bönig, Thomas Kuhn und Andreas Reinhardt für eure fachliche Unterstützung und Freundschaft.

Ebenso möchte ich meinem Partner Sven und meiner Familie danken, denn ohne deren Rückhalt und fortwährenden Zuspruch wäre diese Arbeit am Ende wohl nie fertig geworden.

Lustmühle (CH), im November 2024

Simone Neermann

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis | ix |
| Bildverzeichnis..... | xiii |
| Tabellenverzeichnis | xix |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Wirtschaftliche und technische Grundlagen der Fertigung gedruckter Elektronik..... | 5 |
| 2.1 Marktanalyse und Einsatzbereich gedruckter Elektronik | 5 |
| 2.1.1 Einordnung gedruckter Elektronik im Vergleich zur Fertigung elektronischer Baugruppen..... | 6 |
| 2.1.2 Gedruckte Sensoren | 8 |
| 2.1.3 Gedruckte Antennen- und Radartechnik..... | 9 |
| 2.2 Aufbau gedruckter Elektronik | 11 |
| 2.2.1 Substratwerkstoffe..... | 11 |
| 2.2.2 Druckmaterialien..... | 15 |
| 2.3 Verfahren zur Herstellung gedruckter Elektronik..... | 17 |
| 2.3.1 Berührende Druckverfahren | 18 |
| 2.3.2 Nicht berührende Druckverfahren | 24 |
| 2.4 Theorie der Sinterung und Sintermethoden für die gedruckte Elektronik..... | 28 |
| 2.4.1 Theoretische Grundlagen des Sintervorgangs..... | 28 |
| 2.4.2 Alternative Sinterverfahren..... | 37 |
| 2.5 Handlungsfelder zur Sinterung und Charakterisierung der gedruckten Elektronik..... | 44 |
| 3 Qualifizierung von NIR und UV zur alternativen photonischen Sinterung gedruckter Elektronik | 49 |
| 3.1 Signifikante Einflussgrößen auf das Sinterergebnis | 49 |
| 3.1.1 Material | 50 |
| 3.1.2 Methode..... | 51 |
| 3.1.3 Maschine..... | 52 |
| 3.1.4 Milieu | 53 |
| 3.1.5 Mensch..... | 53 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2 | Evaluierung von photonischen Sinterverfahren für Aerosol-Jet gedruckte Strukturen..... | 54 |
| 3.2.1 | Das Aerosol-Jet-Verfahren zur Herstellung gedruckter Elektronik | 54 |
| 3.2.2 | Qualifizierung von NIR- und UV-Strahlung | 60 |
| 3.2.3 | Experimenteller Vergleich und Gegenüberstellung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften..... | 65 |
| 3.3 | Empfehlungen der Nutzung von UV und NIR zur photonischen Sinterung Aerosol-Jet gedruckter Strukturen ... | 74 |
| 4 | Neuartige Charakterisierungsmethode zur Bewertung der Qualität der Sinterung..... | 77 |
| 4.1 | Evaluierung von Analyseverfahren zur Bestimmung der Qualität gedruckter Strukturen | 77 |
| 4.1.1 | Schliffpräparation..... | 78 |
| 4.1.2 | Focused-Ion-Beam-Rasterelektronenmikroskopie | 79 |
| 4.2 | Ausnutzung von Hochfrequenzeffekten zur Strukturcharakterisierung | 82 |
| 4.3 | Konzipierung einer neuartigen Charakterisierungsmethode zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit gedruckter Silbernanopartikelintinten..... | 87 |
| 4.3.1 | Darstellung des realen Messaufbaus aus APC7-Verbindern und gedruckten leitfähigen Schichten..... | 87 |
| 4.3.2 | Mathematisches Modell des Messaufbaus | 89 |
| 4.3.3 | Verifizierung des analytischen Modells mittels CST-Feldsimulation..... | 94 |
| 5 | Elektrische Charakterisierung des Sinterergebnisses mittels Hochfrequenztechnik..... | 97 |
| 5.1 | Herstellung der Aerosol-Jet gedruckten Strukturen..... | 97 |
| 5.2 | Anwendung der HF-Messung zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit | 99 |
| 5.2.1 | Standardsinterprozess: Wärmebehandlung im Ofen | 99 |
| 5.2.2 | Photonisches Sinterverfahren mit Xenon-Blitzlicht | 106 |
| 5.2.3 | Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 108 |
| 5.3 | Erschließung weiterer Anwendungsfelder durch den Einsatz bei alternativen Dünnschichtstrukturen..... | 109 |
| 5.4 | Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen der Qualität der Sinterung und Zuverlässigkeit | 113 |

| | | |
|----------|----------------------------------|------------|
| 6 | Zusammenfassung..... | 119 |
| 7 | Summary | 123 |
| | Literaturverzeichnis..... | 127 |

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

| <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Beschreibung</i> |
|-----------------|-------------------|--|
| α | ppm/K | Wärmeausdehnungskoeffizient |
| A_H | mm ² | Halsfläche |
| A_L | mm ² | Leiterquerschnitt |
| a | mm | Partikelradius |
| ΔC_v | - | Leerstellenkonzentrationsunterschied |
| c_0 | m/s | Vakuumlichtgeschwindigkeit |
| c | m/s | Ausbreitungsgeschwindigkeit im Material |
| D_b | m ² /s | Korngrenzendiffusionskonstante |
| D_g | m ² /s | Gasdiffusionskonstante |
| D_l | m ² /s | Gitterdiffusionskonstante |
| D_s | m ² /s | Oberflächendiffusionkonstante |
| δ_{Skin} | µm | Äquivalente Leitschichtdicke Skineffekt |
| ϵ_r | - | Relative Permittivität |
| f | s ⁻¹ | Periodenfrequenz |
| η | Pas | Viskosität |
| k_B | J/K | Boltzmann-Konstante |
| k | m ⁻¹ | Wellenzahl |
| I | A | Strom |
| l | mm | Länge |
| l_t | mm | Schichtdicke |
| n | - | Komplexe Brechzahl |
| ΔP | - | Druckunterschied |
| Δp | - | Dampfdruckunterschied |
| Q | J | Umgesetzte Wärme |
| R | Ω | Widerstand |
| r | mm | Radius |

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|---------------|------------------|---|
| r_o | mm | Radius (Atome befinden sich auf der Oberfläche des Nanopartikels) |
| S_m | K | Schmelztemperatur Bulkmaterial |
| S_T | - | Transmission im Material |
| σ | S/m | Elektrische Leitfähigkeit |
| $\tan \delta$ | - | Verlustfaktor |
| θ | ° | Kontaktwinkel |
| T | °C | Temperatur |
| T_g | °C | Glasübergangstemperatur |
| $T_m(\infty)$ | K | Schmelztemperatur Bulkmaterial |
| $T_{so}(r)$ | K | Initiale Sintertemperatur |
| t | s | Sinterzeit |
| μ | $VsA^{-1}s^{-1}$ | Permeabilität |
| μ_0 | $VsA^{-1}s^{-1}$ | Vakuumpermeabilität |
| μ_r | - | Relative Permeabilität |
| V | mm^3 | Halsvolumen |
| V'_m | l/mol | Molares Volumen Leerstellen |
| V_m | l/mol | Molares Volumen Festkörper |
| x | mm | Nackenradius |
| ω | s^{-1} | Kreisfrequenz $2\pi f$ |
| γ_{lv} | N/m | Grenzflächenspannung (flüssig-gasförmig) |
| γ_s | N/m | Oberflächenenergie |
| γ_{sl} | N/m | Grenzflächenspannung (flüssig-fest) |
| γ_{sv} | N/m | Grenzflächenspannung (fest-gasförmig) |
| Z | Ns/m^3 | Wellenimpedanz |

| Abkürzung | Beschreibung |
|-------------------|--|
| 2D | Zweidimensional |
| 2.5D | Zweieinhalbdimensional |
| 3D | Dreidimensional |
| Ag | Silber |
| Al | Aluminium |
| APC | Amphenol Precision Connector |
| CAD | Computer-Aided-Design |
| CTE | Coefficient of Thermal Expansion, thermischer Längenausdehnungskoeffizient |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DoD | Drop-on-Demand |
| EDX | Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy |
| FAPS | Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik |
| FAU | Friedrich-Alexander-Universität |
| FR ₄ | Flame retardant, flammhemmender Verbundwerkstoff |
| HCl | Chlorwasserstoff |
| IR | Infrarot |
| LCP | Liquid Crystal Polymer |
| LED | Lichtemittierende Diode |
| MgCl ₂ | Magnesiumchlorid |
| MOD | Metal-Organic-Decomposition |
| NaCl | Natriumchlorid |
| Ni | Nickel |
| NIR | Nahinfrarot |
| NP | Nanopartikel |
| OWRK | Owens-Wendt-Rabel-Kaelble Verfahren |
| PA 6 | Polyamid 6 |
| PC | Polycarbonat |
| PET | Polyethylenterephthalat |

| Abkürzung | Beschreibung |
|------------------|---------------------------------|
| PEN | Polyethylennaphthala |
| PI | Polyimid |
| RFID | Radio-Frequency Identification |
| S-Parameter | Streuparameter |
| SLA | Stereolithografie |
| SNP | Silbernanopartikel |
| TGA | Thermogravimetrische Analyse |
| TOSM | Through, Open, Short, Match |
| UV | Ultraviolett |
| VNA | Vektorieller Netzwerkanalysator |
| W | Wolfram |
| Xe | Xenon |

Bildverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Bild 1: | Einsatzbereiche gedruckter und organischer Elektronik sowie ihre wesentlichen Vorteile, in Anlehnung an [5] | 2 |
| Bild 2: | Darstellung des konventionellen photolithographischen Produktionsprozesses, in Anlehnung an [16] | 6 |
| Bild 3: | Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses gedruckter Elektronik ohne vorherige Reinigung des Substrates | 7 |
| Bild 4: | Fotographie von gedruckten resistiven Sensoren, hergestellt mit dem Piezo-Jet-Verfahren, zum Ein- und Ausschalten der LEDs auf einem Glassubstrat, eigene Aufnahme..... | 9 |
| Bild 5: | SLA-gedruckte Hohlleiterantenne, die im Anschluss galvanisch metallisiert wurde (Firma Golden Devices, links) und Helix-Antenne, die mit dem Aerosol-Jet Verfahren metallisiert wurde (Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, rechts)..... | 10 |
| Bild 6: | Schematische Darstellung der Benetzung eines Substrats mit einer Flüssigkeit, in Anlehnung an [34]..... | 12 |
| Bild 7: | Thermische Längenausdehnung ausgewählter Substratmaterialien, in Anlehnung an [37, 38]..... | 14 |
| Bild 8: | Schematische Darstellung des Druckmaterials bestehend aus Silbernanopartikeln, organisches Coating sowie Lösemittel und Additiven, in Anlehnung an [30] | 17 |
| Bild 9: | Schematische Darstellung einer Auswahl an Druckverfahren, die in berührende Verfahren (links) und nicht berührende Verfahren (rechts) unterteilt sind | 18 |
| Bild 10: | Schematische Darstellung des Flexodrucks mit Tauchwalze (1), Aniloxwalze mit Rakel (2), Druckform (3) und Gegenzylinder (5), in Anlehnung an [51] | 19 |
| Bild 11: | Schematische Darstellung des Tiefdrucks mit Druckform (1), Rakel (2) und Druckzylinder (3), in Anlehnung an [51] | 20 |
| Bild 12: | Schematische Darstellung des Offsetdrucks bei dem sich hydrophobe und hydrophile Stellen auf einer Ebene befinden, in Anlehnung an [51] | 21 |

| | | |
|----------|---|----|
| Bild 13: | Schematische Darstellung des Siebdrucks mit Siebgewebe durch welches das Druckmaterial mittels eines Rakels gedrückt wird, in Anlehnung an [51]..... | 22 |
| Bild 14: | Schematische Darstellung des Zeit-Druck-Dispensprozesses als berührendes Druckverfahren, in Anlehnung an [S1] | 24 |
| Bild 15: | Schematische Darstellung des Ink-Jet Prozesses mit thermischer (links) und elektrischer (rechts) Auflösung, in Anlehnung an [32] | 25 |
| Bild 16: | Schematische Darstellung des Piezo-Jet-Verfahrens mit Piezoaktor und Keramikstößel, in Anlehnung an [60, 61]..... | 26 |
| Bild 17: | Schematische Darstellung der Aerosol-Jet-Druckverfahrens mit pneumatischer Zerstäubung, in Anlehnung an [30]..... | 27 |
| Bild 18: | Darstellung des Festphasensinterns mit den vier Phasen Kontaktstadium, Ausbildung der Sinterhalse, Kornwachstum und verdichteter Sinterkörper, in Anlehnung an [67] | 30 |
| Bild 19: | Zweiteilchenmodell zur Darstellung der Transportmechanismen ohne (a) und mit (b) Materialschrumpfung, in Anlehnung an [69]..... | 31 |
| Bild 20: | Schematische Darstellung der Materialtransportmechanismen während des Sinterprozesses, in Anlehnung an [69] | 32 |
| Bild 21: | Theoretisch berechnete anfängliche Sintertemperatur für Wolfram-, Nickel- und Silbernanopartikel, in Anlehnung an [79]..... | 34 |
| Bild 22: | Schematische Darstellung des Sinterprozesses bei der Verwendung von Nanopartikeln oder partikelfreien Tinten, in Anlehnung an [80]..... | 36 |
| Bild 23: | Schematische Darstellung von Silbernanopartikel vor (links) und nach (rechts) der Verwendung von NaCl, in Anlehnung an [88] | 40 |
| Bild 24: | Schematische Darstellung von Schwingungen der Leitungselektronen im elektrischen Feld, in Anlehnung an [98] | 41 |

| | | |
|----------|--|----|
| Bild 25: | Ishikawa-Diagramme der wichtigsten Einflussgrößen auf das Aerosol-Jet Prozessergebnis (oben) und das Sinterergebnis (unten)..... | 50 |
| Bild 26: | Aufnahme der Plasmavorbehandlung (links) und schematische Darstellung des Verfahrensweges auf dem Substrat (rechts) | 55 |
| Bild 27: | Aufnahme der Tropfenausbildung in Abhängigkeit der Zeit von Glycerin auf PA6 | 56 |
| Bild 28: | Messergebnisse der Oberflächenenergieanalyse von LCP, PA6 und Glas mit (mV) und ohne (oV) Plasmavorbehandlung | 56 |
| Bild 29: | Thermogravimetrische Analyse der Silbernanopartikelintinte Paru 007 mit einer maximalen Verdampfungsrate bei 120 °C aus [P2]..... | 57 |
| Bild 30: | Thermogravimetrische Analyse der Silbernanopartikelintinte Clariant TPS 50 mit einer maximalen Verdampfungsrate bei 115 °C aus [P2]..... | 58 |
| Bild 31: | Aufnahme des Drucklayouts (rechts) für die Sinterversuche bestehend aus 10 mm langen Leiterbahnen zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit sowie 2 x 2 mm Quadraten zur Qualifizierung der Haftfestigkeit und schematische Darstellung (links) | 59 |
| Bild 32: | Messergebnisse der Spektrometeruntersuchung der verwendeten Substrate PA6 und LCP aus [P2]..... | 61 |
| Bild 33: | Messergebnisse der Spektrometeruntersuchungen der verwendeten Silbernanopartikelintinten Clariant TPS 50 und Paru 007 aus [P2] | 62 |
| Bild 34: | NIR-96-250-E System der Firma adphos Digital Printing mit der Prozesssteuereinheit, verfahrbarer Probenstisch und Strahlermodul | 63 |
| Bild 35: | UV-LED Cube 100 IC der Firma Hönle mit Prozesssteuereinheit, abgeschirmter UV-LED Strahler und Bestrahlkammer aus [P3]..... | 64 |
| Bild 36: | Mikroskopische Untersuchung der gedruckten Proben nach unterschiedlichen Substrat- und Tintenkombination sowie nach Sinterverfahren | 66 |

| | | |
|----------|--|----|
| Bild 37: | Schematische Darstellung der Vierleitermessung auf der gedruckten Struktur | 67 |
| Bild 38: | Messergebnisse der elektrischen Leitfähigkeitsuntersuchungen auf LCP (links) und PA6 (rechts) mit der Standardabweichung zum Mittelwert | 68 |
| Bild 39: | Schematische Darstellung des Tape Tests auf gedruckten Strukturen mit einem Abziehwinkel von 60° | 69 |
| Bild 40: | Messergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchung eingeteilt in Kategorien auf LCP (links) und PA6 (rechts) | 70 |
| Bild 41: | Schematische Darstellung des Temperaturprofils für den Temperaturwechseltest mit einer Zyklusdauer von 90 Minuten..... | 71 |
| Bild 42: | Gegenüberstellung der Leitfähigkeitsergebnisse pro Substrat für die Tinte Paru 007 nach dem Temperaturwechseltest..... | 72 |
| Bild 43: | Fehlerbilder nach der Sinterung gedruckter Strukturen, eigene Aufnahmen..... | 74 |
| Bild 44: | Schliffbild von gesputterten Aluminium (oben) und Kupfer (mittig) Proben sowie mit dem Aerosol-Jet hergestellte Leiterbahnen (unten) [P6]..... | 79 |
| Bild 45: | Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Aerosol-Jet gedruckten Strukturen auf PI nach der Sinterung im Ofen und der Bestrahlung mit UV und NIR (von links nach rechts)..... | 80 |
| Bild 46: | Exemplarische EDX-Analyse einer Aerosol-Jet gedruckten Struktur auf PI nach der Ofensinterung..... | 81 |
| Bild 47: | Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle und ihrer Ausbreitungsrichtung, in Anlehnung an [127] | 83 |
| Bild 48: | Magnetfeld und Stromdichte aufgrund des Skin效ekts bei verschiedener Phasenlage, in Anlehnung an [128] | 84 |
| Bild 49: | Darstellung der Eindringtiefe in Abhängigkeit der Leitfähigkeit des Leiters | 85 |
| Bild 50: | Darstellung der Streuparameter eines Zweitorts, in Anlehnung an [127] | 86 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Bild 51: | Bild des verwendeten APC7-Verbinders (links) und schematische Querschnittsdarstellung (nicht maßstabsgetreu) des Messaufbaus innerhalb zweier APC7-Verbinder (rechts) | 88 |
| Bild 52: | Schematische Darstellung des mathematisch vollständig beschriebenen Messaufbaus | 92 |
| Bild 53: | Exemplarische Darstellung der Streuparameter einer Messprobe, die für die Berechnung herangezogen werden | 93 |
| Bild 54: | CST-Simulation des verwendeten APC7-Verbinders mit Messprobe (links) und resultierendes zirkular um die Mittelachse verlaufendes Magnetfeld (Mitte) und radial verlaufendes elektrisches Feld (rechts) zwischen Innen- und Außenleiter | 94 |
| Bild 55: | Schematische Darstellung einer Messprobe mit der Druckrichtung von innen nach außen..... | 98 |
| Bild 56: | Aerosol-Jet gedruckte Silbernanopartikelschicht auf Polyimid (links) und eingelegte Messprobe in den APC7-Verbinder (rechts) | 98 |
| Bild 57: | Rasterelektronenaufnahme der Oberfläche der Aerosol-Jet gedruckten Proben bei einer Sintertemperatur von 160 °C (links) und 200 °C (rechts) | 99 |
| Bild 58: | Rasterelektronenaufnahme der Oberfläche mit einer Vergrößerung von 500 nm bei einer Sintertemperatur von 160 °C (links) und 100 nm bei 200 °C (rechts) | 100 |
| Bild 59: | Rasterelektronenmikroskopaufnahmen des Probenquerschnitts bei einer Sintertemperatur von 160 °C (links) und 200 °C (rechts) | 101 |
| Bild 60: | Messergebnisse der Einfügedämpfung in Abhängigkeit der verwendeten Sintertemperatur aus [P6]..... | 102 |
| Bild 61: | Aus dem Modell extrahierte Leitfähigkeiten der gemessenen Proben in Abhängigkeit der Frequenz aus [P6] | 103 |
| Bild 62: | Vergleich der Einfügedämpfung einer realen Messprobe und der berechneten Kurve des Modells aus [P6] | 103 |
| Bild 63: | Phasenverlauf einer realen Messprobe im Vergleich zum mathematischen Modell aus [P6] | 104 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Bild 64: | Leitfähigkeitsverlauf einer bei 200 °C für 30 Minuten gesinterten Messprobe mit einer berechneten Schichtdicke von 2,0 µm aus [P6] | 105 |
| Bild 65: | Berechnete Leitfähigkeitswerte ausgewählter Messproben bei unterschiedlich gesinterten Temperaturen im Konvektionsofen und kalkulierten Schichtdicken aus [P6]..... | 105 |
| Bild 66: | Einfügedämpfung ausgewählter Messproben nach photonischer Sinterung mit exemplarischen Parametereinstellungen aus [P6] | 107 |
| Bild 67: | Mit Aluminium gesputterte Messproben zur Anwendung des Messverfahrens auf alternative Dünnschichtproblematiken aus [P6]..... | 110 |
| Bild 68: | Mit dem Messverfahren ermittelten Leitfähigkeitswerte ausgewählter gesputterter Proben mit Kupfer aus [P6]..... | 111 |
| Bild 69: | Mit dem Messverfahren ermittelten Leitfähigkeitswerte ausgewählter gesputterte Proben mit Aluminium aus [P6]..... | 111 |
| Bild 70: | Leitfähigkeitswerte der DC-Messung von gesputterten Probekörper mit Kupfer und Aluminium | 112 |
| Bild 71: | Aufnahme der Messproben nach dem Feuchte-Wärme-Test mit vollständig zerstörten Proben nach 120 °C Sinterung (links) und messtechnisch auswertbaren Proben nach einer Sinterung bei 160 °C (mittig) und 200 °C (rechts)..... | 114 |
| Bild 72: | Aufnahme der Messproben nach dem Temperaturschocktest nach einer Sinterung bei 160 °C (links) und 200 °C (rechts)..... | 115 |
| Bild 73: | Hochfrequenztechnische Untersuchung der Aerosol-Jet gedruckten Proben nach dem Feuchte-Wärme-Test und einer Sinterung bei 160 °C aus [P6] | 115 |
| Bild 74: | Hochfrequenztechnische Untersuchung der Aerosol-Jet gedruckten Proben nach dem Feuchte-Wärme-Test und einer Sinterung bei 200 °C aus [P6] | 116 |
| Bild 75: | Hochfrequenztechnische Untersuchung der Aerosol-Jet gedruckten Proben nach dem Temperaturschocktest und einer Sinterung bei 200 °C aus [P6] | 117 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Materialparametereigenschaften von PET, PEN und PI, in Anlehnung an [37, 38]..... | 15 |
| Tabelle 2: Auswahl der meistgenutzten Drucktechnologien und ihrer rheologischen Eigenschaften in der Elektronikproduktion..... | 15 |
| Tabelle 3: Verschiedene Arten des Transportmechanismus, die während des Sinterprozesses stattfinden, in Anlehnung an [67, 71, 70]..... | 33 |
| Tabelle 4: Vergleich der bekannten alternativen Sintermethoden für die Verdichtung gedruckter Elektronik..... | 47 |
| Tabelle 5: Maschineneinstellung unter Einhaltung folgender Aspekte: Abstand 10 mm, einmalige Überfahrt, keine Schädigung des Substrats, gleichmäßige Sinterung von Linien und Flächen sowie erzielte Leitfähigkeit vergleichbar mit der Ofensinterung (150°C und 1 Stunde)..... | 65 |
| Tabelle 6: Erzielte Leitfähigkeitswerte nach der photonischen Sinterung unter der Verwendung von Multiimpulsen..... | 107 |

1 Einleitung

Die Erfindung des Buchdrucks durch Johannes Gutenberg in Mainz Mitte des 15. Jahrhunderts legt den Grundstein für eine neue Ära der Wissenschaft und Technik. Durch die ersten beweglichen metallenen Lettern gelingt es ihm, ein Drucksystem zu entwickeln, welches das gedruckte Buch zu einem Massenartikel macht. Die damals verwendete „dinte“ aus Ruß von Wachskerzen oder Kiefernholz und Leinölfirnis findet lange Zeit Anwendung als schwarz glänzende Druckerschwärze. [1] Zwischen dem 16. und 19. Jahrhundert werden weitere Drucktechniken entwickelt, wie der Kupferstich, der Holzschnitt oder auch die Lithographie. Somit wird eine Reproduktion von Bildern und Texten für die Massen ermöglicht. [2]

Durch die Entwicklung neuer dielektrischer, halbleitender und leitfähiger Materialien wird das Anwendungsfeld der klassischen Druckverfahren weg vom Zeitungs- und Buchdruck hin zur Elektronikfertigung erweitert. In den 1950er Jahren werden leitfähige Strukturen mit dem Gravurdruck auf Leiterplatten aufgetragen, welcher kurze Zeit später jedoch aus Effizienzgründen durch die Photolithographie ersetzt wurde. Im Bereich der Displayherstellung werden die damaligen Loch- und Schlitzmasken mit einer Kombination aus Druck- und Ätzprozessen für den Röhrenfernseher hergestellt, gefolgt von keramischen passiven Komponenten, wie Widerständen, Kondensatoren und Antennen, die mit dem Gravur- und Siebdruckverfahren im Rolle-zu-Rolle-Verfahren gefertigt werden, bis hin zu gedruckten Solarzellen mittels Sieb- und Ink-Jet-Druck und Weitere. In den 70er und 80er Jahren beginnen Forscher leitfähige Tinten und Pasten aus Kupfer, Silber und Kohlenstoffnanoröhren herzustellen und das mögliche Anwendungsspektrum um ein Vielfaches zu erweitern.

Die gedruckte Elektronik ist somit keine plötzliche Erfindung des 21. Jahrhunderts, sondern entwickelt sich kontinuierlich seit dem 20. Jahrhundert in der Elektronikfertigung weiter. Durch die Kombination aus Drucktechnologien und Nanomaterialien kam es in den letzten 20 Jahren zu einem enormen Anstieg des Anwendungspotenzials. [3] Die Technologie hat heute Anwendung in verschiedenen Branchen gefunden, wie der Elektronikindustrie, Medizin, Automobilindustrie, Energietechnik und Unterhaltungselektronik, wie in Bild 1 exemplarisch dargestellt. [4] Vor allem die organische und gedruckte Elektronik haben sich als vielversprechende Bereiche herauskristallisiert. Druckbare Elektroden und organische Halbleitermaterialien etwa ermöglichen die kostengünstige Herstellung von Transistoren, Dioden und Speicherelementen.







| | | | |
|---|---|--|---|
| <p>Automotive & Mobilität</p> <ul style="list-style-type: none"> • OLED-Leuchten • Touchoberflächen • Sitzbelegungs-erkennung  | <p>Verpackung & Druck</p> <ul style="list-style-type: none"> • Smarte Labels • Fälschungsschutz • Leuchtende Verpackung  | <p>Gesundheit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Smart Watches • Sensoren zur Blutzuckermessung • EKG-Elektroden  | <p>Vorteile gedruckter und organischer Elektronik</p> <ul style="list-style-type: none"> leicht ✓ dünn ✓ flexibel ✓ dehnbar ✓ kostengünstig ✓ umweltschonend ✓ |
| <p>Smart Home</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensoren • Organische Photovoltaik • OLED-Leuchten  | <p>Unterhaltungselektronik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Antennen in Smartphones • OLED-TV • E-Reader  | <p>Internet der Dinge</p> <ul style="list-style-type: none"> • RFID-Labels • Sensoren • NFC-Labels  | |

Bild 1: Einsatzbereiche gedruckter und organischer Elektronik sowie ihre wesentlichen Vorteile, in Anlehnung an [5]

Für den Einsatz gedruckter Elektronik und Optik müssen diese, vor allem in Hinblick auf Anwendungen im Automobil und für Antennen- und Radartechnik, spezifischen Anforderungen hinsichtlich genau definierter elektrischer Leitfähigkeit, Oberflächenrauheit, Mikro- und Makrostruktur und Zuverlässigkeit genügen. Hierbei rückt der Prozessschritt der Verdichtung der gedruckten Strukturen in den Fokus, da die Leitfähigkeit der Leiterstrukturen mit diesem Prozessschritt hergestellt, die Oberfläche geformt und gleichzeitig die Zuverlässigkeit maßgeblich beeinflusst werden kann.

Ziel der vorliegenden Dissertationsschrift ist es, den Post-Prozess der Sinterung gedruckter Elektronik umfassend zu analysieren, Nahinfrarot (NIR) und Ultraviolettbestrahlung (UV) als alternative photonische Sinterverfahren durch gezielte Untersuchungen für das Aerosol-Jet Verfahren zu qualifizieren und ein neuartiges Prozessmodell zu entwickeln, welches zur Charakterisierung weiterer leitfähiger Dünnschichtproblematiken in der Elektronikfertigung eingesetzt werden kann und somit die Lücke der fehlenden elektrischen Charakterisierung geschlossen wird.

Hierfür wird in Kapitel 2 eine wirtschaftliche und technologische Betrachtung der gedruckten Elektronik durchgeführt, wobei anfangs auf die populärsten Einsatzbereiche, gedruckte Sensoren und Antennen, eingegangen wird. Der Schwerpunkt liegt auf der detaillierten Analyse der in der Elektronikfertigung heute eingesetzten Druckprozesse sowie Druckmaterialien. Weiterhin wird im Anschluss der Fokus auf die zu Grunde liegende Theorie der Sinterung nanopartikulärer Druckmaterialien und alternativer Sinterverfahren gelegt und Möglichkeiten sowie Herausforderungen dieser aufgezeigt, um ein besseres Grundlagenverständnis zu generieren und somit die theoretische Basis für die nachfolgenden Untersuchungen zu schaffen.

In Kapitel 3 liegt der Fokus in einem ersten Schritt auf der Analyse der Einflussparameter auf das Sinterergebnis, wie Druckprozess, Sinterverfahren und Materialien. In einem zweiten Schritt werden mittels Experimenten UV und NIR als alternative photonische Sinterverfahren in den Mittelpunkt gestellt und die Ergebnisse mit dem konventionellen Sinterprozess hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit sowie Haftfestigkeit bei der Anwendung auf Aerosol-Jet gedruckte Strukturen verglichen. Zur Absicherung der Anforderung an ihre Qualität und Zuverlässigkeit unter harschen Umgebungsbedingungen werden unterschiedliche Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt.

Eine genaue Analyse der vorhandenen messtechnischen Möglichkeiten für gedruckte Strukturen, welche sich in optische und elektrische Methoden unterteilen, motiviert die Forschungsarbeiten, die Notwendigkeit einer neuartigen elektrischen Charakterisierungsmethode abzuleiten, mit dem sich Kapitel 4 beschäftigt. Auf Grundlage der Hochfrequenztechnik wird ein analytisches Modell erstellt, um die elektrische Qualifizierung der gedruckten Struktur ohne deren Beschädigung zu ermöglichen.

In Kapitel 5 wird die Anwendung der neuartigen Charakterisierungsmethode auf Aerosol-Jet gedruckte Strukturen experimentell untersucht. Hierbei steht der Vergleich des Xe-Blitzlichtsinterns mit dem Ofenprozess im Vordergrund. Eine abschließende erweiterte Anwendung auf andere Dünnschichtstrukturen zeigt das zukünftige Potenzial der neuen Messmethode auf.

2 Wirtschaftliche und technische Grundlagen der Fertigung gedruckter Elektronik

Die gedruckte Elektronik gehört zu den am schnellsten wachsenden Technologien der Welt und ermöglicht den Einsatz von Elektronik in Bereichen, in denen sie bisher kaum Anwendung findet. Neben der klassischen Automobil- und Unterhaltungselektronikbranche ergeben sich vielfältige Anwendungen und neue Produkte in den Gebieten Internet der Dinge, Pharmaindustrie und Verpackung. Kostengünstig, flexibel, dehnbar, umweltschonend, schnell und leistungsoptimierend sind ausgewählte Vorteile, die im Zusammenhang mit der gedruckten Elektronik genannt werden. Durch die Kombination unterschiedlicher Materialien gelingt die Realisierung neuartiger Funktionalitäten. Beginnend mit einer Marktanalyse und typischen Anwendungen wird in den nächsten Abschnitten der Herstellungsprozess und die sich daraus ergebenden Prozessschritte mit Fokus auf die Sinterung detailliert beschrieben.

2.1 Marktanalyse und Einsatzbereich gedruckter Elektronik

Der weltweite Markt für die organische und gedruckte Elektronik wird im Jahr 2024 auf rund 15,6 Mrd. US\$ geschätzt und soll laut Prognosen bis zum Jahr 2033 auf 75,2 Mrd. US\$ ansteigen. [6] Grundsätzlich werden vor allem die Bereiche flexible Displays, gedruckte Sensoren, gedruckte Photovoltaik und sogenannten „Wearable Electronics“ am stärksten wachsen. [7] In Anbetracht der enorm ansteigenden Menge an Elektroschrott als Folge des digitalen Wandels, kommt der gedruckten Elektronik auch im Hinblick auf die Nachhaltigkeit eine besondere Bedeutung zu. [8, 9] Allein im Jahr 2019 wurde nach einem Bericht der Vereinten Nationen eine Menge von rund 53,6 Millionen Tonnen an Elektroschrott generiert, welche jährlich mit einer Rate von mehr als 2 Millionen Tonnen ansteigen wird. [10] Die gedruckte Elektronik liefert hier Vorteile im Bereich des Ökodesigns, bei der Minimierung des Energieverbrauchs sowohl in der Herstellungs- als auch in der Nutzungsphase und erlaubt einen geringeren Einsatz gefährlicher Stoffe sowie eine verbesserte Recyclingfähigkeit. [11] Trotz des bereits breiten Einsatzes gedruckter Elektronik sind noch weitere Forschungen nötig, um die elektrische Charakteristik mit dem Schwerpunkt auf der

elektrischen Leitfähigkeit zu verbessern, das generelle Prozessverständnis zu fördern und an die Anforderungen der jeweiligen Branchen anzupassen. [12]

2.1.1 Einordnung gedruckter Elektronik im Vergleich zur Fertigung elektronischer Baugruppen

Um das Ziel der Fertigung immer kleinere Produkte, die Nutzung von Frequenzen im Gigahertz-Bereich und höher, eine Minimierung der Umweltbelastung und das Erzielen kürzerer Produktionszeiten zu erreichen, haben additive Herstellungsprozesse an Bedeutung gewonnen. Diese weisen im Gegensatz zur konventionellen Leiterplattenfertigung entscheidende Vorteile auf, da auch dreidimensionale Substrate verwendet werden können und auf Durchkontaktierungen zwischen Lagen, sogenannte Vias, verzichtet werden kann [12]. Der konventionelle photolithographische Produktionsprozess besteht aus mehreren Einzelschritten, wie in Bild 2 dargestellt, und ist abhängig von der benötigten Lagenanzahl. Der Schaltungsentwurf und die Layout-Entwicklung finden mit speziellen CAD-Programmen statt. Im Anschluss daran wird anhand der CAD-Daten die Maske für die Belichtung entwickelt. Bei der Leiterplattenstrukturierung wird zwischen drei verschiedenen Verfahren unterschieden: Subtraktivverfahren, Additivverfahren und Semi-Additivverfahren. Bei dem am häufigsten eingesetzten Subtraktivverfahren wird in einem ersten Schritt das Substrat (beispielsweise der flammenhemmende Epoxidharz-Glasgewebe-Verbundwerkstoff FR4) gereinigt und im Anschluss eine leitfähige Kupferschicht auf das Leiterplattenmaterial aufgebracht, gefolgt von einer Schicht Photoresist.

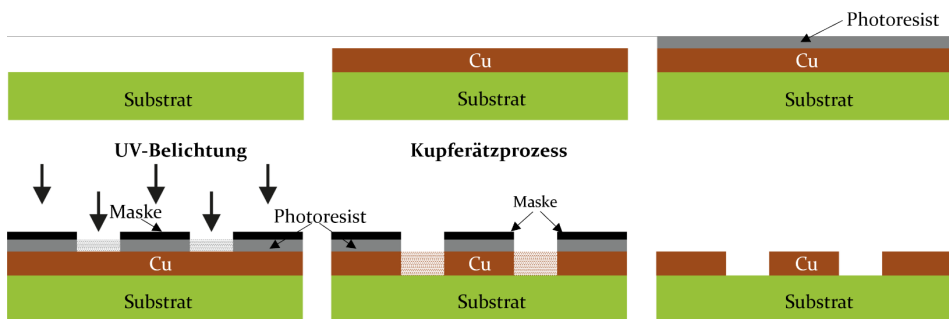


Bild 2: Darstellung des konventionellen photolithographischen Produktionsprozesses, in Anlehnung an [16]

Zum Erzeugen der gewünschten Leiterstruktur wird eine Maske auf die Kupferschicht aufgelegt und mit UV-Licht belichtet. Nach der Entwicklung wird das überschüssige und ungeschützte Kupfer in einem Ätzprozess entfernt und das verbliebene Photoresist abgewaschen. [13–15]. Beim Additivverfahren entfällt der Kupferätzprozess mit seinen umweltschädlichen Abfallprodukten. Durch das chemische Aufmetallisieren verlängern sich die Prozesszeiten verglichen mit dem Subtraktivverfahren jedoch deutlich. Im Gegensatz zur klassischen Photolithographie existieren für die gedruckte Elektronik eine Vielzahl von Definitionen. [17, 18] Für die vorliegende Arbeit werden die gedruckte Elektronik und daraus ableitend auch die einzelnen Herstellungsschritte in Anlehnung an [13] wie folgt definiert: das additive Aufbringen funktionaler Materialien mittels Druckverfahren auf verschiedene Substrate ohne nachfolgende umweltschädliche Ätzprozesse.

Im Gegensatz zur konventionellen Herstellung von Leiterplatten sind bei der gedruckten Elektronik nur drei Prozessschritte notwendig:

1. (Optionales) Reinigen des Substratmaterials
2. Drucken der funktionellen Tinte
3. Trocknen und Verdichten der erzeugten Struktur

Nach der optionalen Reinigung des Substratmaterials findet der Materialauftrag auf das Substrat statt. Je nach verwendetem Druckmaterial und Methode ist eine nachfolgende Wärmebehandlung notwendig, um die gewünschten elektrischen und mechanischen Eigenschaften vollständig zu erreichen. [13]

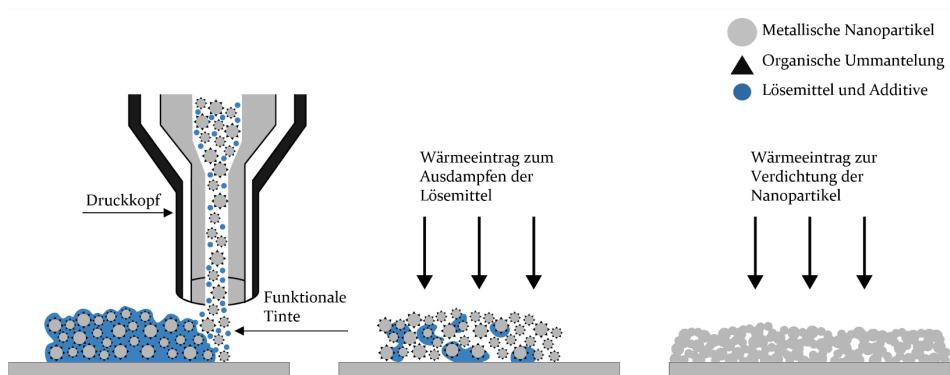


Bild 3: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses gedruckter Elektronik ohne vorherige Reinigung des Substrates

Der Schritt der Wärmebehandlung lässt sich wiederum in zwei Bereiche aufteilen: dem Trocknen bzw. Ausdampfen des Lösemittels und dem

Entfernen der organischen Ummantelung der Metallpartikel sowie dem eigentlichen Verdichten der Partikel zur Erzielung der elektrischen Leitfähigkeit. In Bild 3 ist der Herstellungsprozess gedruckter Elektronik mit dem Druckprozess (1), Trocknen (2) und Verdichten (3) schematisch dargestellt.

2.1.2 Gedruckte Sensoren

Eines der bekanntesten Einsatzgebiete gedruckter Elektronik findet sich im Bereich des Internets der Dinge und hier im Speziellen im Bereich Sensorik. Smarte Systeme, welche durch die direkte Integration von Sensoren auf betreffenden Messstellen entstehen, eröffnen ein enormes Wachstumspotenzial in zahlreichen Branchen. Getriebe, Maschinenelemente und Motoren können in Echtzeit hinsichtlich der Prozessparameter, Maschinenzustände, Umweltbedingungen, Produkt- und Materialqualitätsdaten überwacht werden.

Es lassen sich im Allgemeinen fünf Sensorprinzipien unterscheiden:

1. Resistiv
2. Kapazitiv
3. Induktiv
4. Optisch
5. Piezoelektrisch

Zu den grundlegenden Anforderungen bei der Auslegung eines Sensors gehören seine Stabilität, Empfindlichkeit, Wiederholbarkeit und Reaktionszeit. Neben diesen technischen Eigenschaften spielen in der Praxis auch die Kosten, Größe, Gewicht und der Energieeinsatz eine wichtige Rolle. [19] Die traditionellen mikrosystemtechnischen Herstellungsverfahren sind aufgrund einer hohen Anzahl an Fertigungsschritten zeitaufwendig und weisen eine geringe Skalierbar- und Erweiterbarkeit der Herstellung auf. [20]

Mittels digitaler Druckverfahren werden diese Nachteile überwunden und elektronische Komponenten auf starren Leiterplatten substituiert, die aufwendig in Gehäusen integriert und mit der Außenwelt verbunden werden müssen. Vor allem das resistive Sensorprinzip ist aufgrund seiner Einfachheit für den Einsatz der gedruckten Elektronik, beispielsweise für Dehnmessstreifen, prädestiniert [21, 22]. Wie groß das Interesse an gedruckten Sensoren ist, zeigt auch die Auswertung der Google Scholar-Suchergebnisse nach „Sensors“ und „3D printing“, wonach die Anzahl der Veröffentlichungen in diesem Gebiet um das 56-fache gestiegen ist im Vergleich zum letzten Jahrzehnt. [23] Gedruckte Sensoren stellen mittlerweile den

größten Markt für gedruckte Elektronik dar, der bis 2032 zu einer Marktgröße von fünf Mrd. US\$ anwachsen soll. [24]

Bild 4 zeigt beispielhaft am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) hergestellte und mit dem Piezo-Jet-Verfahren und Silberpaste gedruckte Sensoren auf einer Glasplatte. Die Bauteile sind nach dem Druckprozess manuell auf die Anschlussflächen gesetzt und anschließend im Konvektionsofen getrocknet worden. Dadurch können die notwendige elektrische Leitfähigkeit und Fixierung der Bauteile auf der Glasplatte erreicht werden. Mit den Plus- und Minusflächen kann durch das resistive Sensorprinzip das Ein- und Ausschalten der LEDs gesteuert werden. Das grundsätzliche Prinzip kann somit in einem Experiment nachgewiesen werden, jedoch Bedarf es im Gebiet gedruckter Sensoren weitere Forschung, um die Herausforderungen hinsichtlich der Anbindung der Stromversorgung und der Zuverlässigkeit zu überwinden.

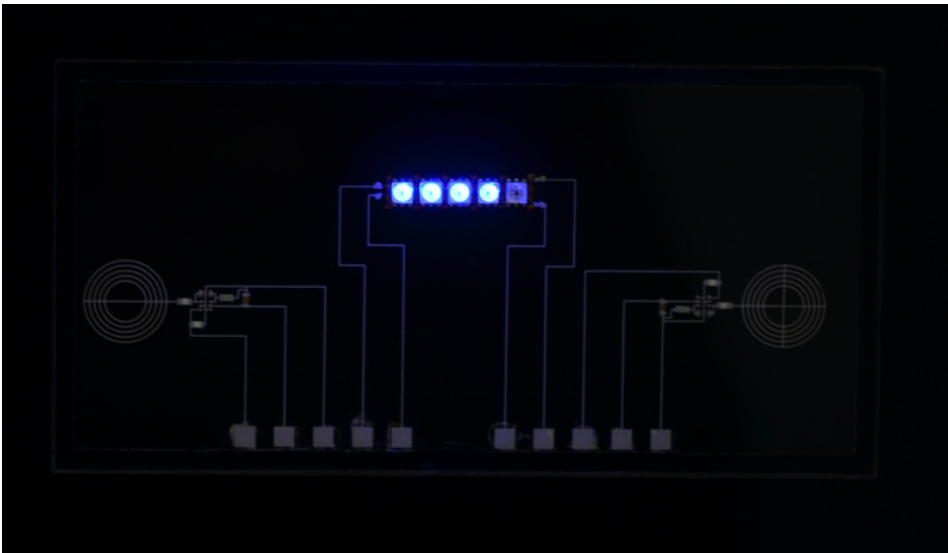


Bild 4: Photographie von gedruckten resistiven Sensoren, hergestellt mit dem Piezo-Jet-Verfahren, zum Ein- und Ausschalten der LEDs auf einem Glassubstrat, eigene Aufnahme

2.1.3 Gedruckte Antennen- und Radartechnik

Durch die steigende Nachfrage nach schnelleren Übertragungsraten und höheren Bandbreiten, getrieben durch die erfolgreiche Umsetzung von Industrie-4.0-Konzepten und vernetzten Geräten, gewinnt die Hochfrequenztechnik immer mehr an Bedeutung. Insbesondere der Antennen-

und Radartechnik wird ein hoher Stellenwert als Kommunikationssystem zugewiesen.

Mit zunehmender Frequenz verkleinern sich die Abmessungen der Antennen, bei gleichzeitig steigender Anforderung an die Präzision der Fertigung. Die photolithographischen Herstellungsverfahren begrenzen jedoch die Möglichkeiten auf zweidimensionale Antennen, wie planare Patchantennen, welche hinsichtlich Bandbreite und Antennengewinn (Richtwirkung und Wirkungsgrad) nicht die ideale Geometrie aufweisen. Dreidimensionale Aufbauten sind aufgrund komplexer Fräsprozesse mit einem hohen Aufwand und Kosten in der Fertigung verbunden und daher kaum rentabel für Kleinserien im höheren Frequenzbereich. Vor diesem Hintergrund bieten die additiven Fertigungstechnologien, kombiniert mit der gedruckten Elektronik zur Funktionalisierung, vielfältige Lösungen mit einer hohen Oberflächenqualität. So werden bereits in der Forschung Wellenleiterkomponenten für E- und D-Band-Anwendungen [25, 26], Helix-Antennen für 11 GHz [27] und 77 GHz [28] sowie Koppler für V-Band-Anwendungen [29] erfolgreich hergestellt. Deren elektrische Eigenschaften sind vergleichbar mit den konventionell hergestellten Kopplern bei deutlich geringeren Kosten und Herstellungszeiten.



Bild 5: SLA-gedruckte Hohlleiterantenne, die im Anschluss galvanisch metallisiert wurde (Firma Golden Devices, links) und Helix-Antenne, die mit dem Aerosol-Jet Verfahren metallisiert wurde (Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, rechts)

In Bild 5 sind exemplarisch 3D gedruckte und funktionalisierte Antennen dargestellt. Die Aufnahme der linken Seite zeigt eine mit dem Stereolithografie (SLA)-Verfahren hergestellte Hohlleiterantenne, welche im Anschluss mittels Galvanisierung metallisch funktionalisiert wurde. In der rechten Aufnahme wird eine Helix-Antenne mit einem Einsatzbereich von 11 GHz dargestellt. Die Funktionalisierung wurde mit dem Aerosol-Jet-Verfahren realisiert. [27]

2.2 Aufbau gedruckter Elektronik

Anhand der Definition gedruckter Elektronik lassen sich der grundsätzliche Aufbau und die Bestandteile ableiten. Im Wesentlichen besteht die gedruckte Elektronik aus zwei Komponenten: dem Substratmaterial und dem Druckmaterial. Abhängig vom jeweiligen Einsatzgebiet und dem zu verwendenden Druckverfahren werden die Materialien hinsichtlich ihrer zukünftigen Anforderungen ausgewählt. In den folgenden beiden Abschnitten wird im Detail auf die am häufigsten verwendeten Materialien eingegangen.

2.2.1 Substratwerkstoffe

Werkstoffe werden in der Materialwissenschaft in fünf Hauptgruppen unterteilt:

- Metalle (z.B. Aluminium und Kupfer)
- Nichtmetalle (z.B. Edelgase und Halogene)
- Organische Rohstoffe (z.B. Kohlenstoffe)
- Anorganische, nichtmetallische Rohstoffe (z.B. Keramik und Glas)
- Halbleiter (z.B. Germanium und Silizium)

Neben diesen Hauptgruppen gibt es noch die Gruppe der Verbund- bzw. Kompositwerkstoffe. Diese setzen sich aus zwei oder mehreren stoff- oder formschlüssig verbundenen Materialien zusammen, welche andere Werkstoffeigenschaften besitzen als ihre Einzelkomponenten. [30] Während sich in der konventionellen Leiterplattenherstellung gefüllte Formmassen auf Basis von Epoxid- oder Phenolharz etabliert haben, gestaltet sich die Substratauswahl für die gedruckte Elektronik, abhängig von der verwendeten Drucktechnologie, deutlich flexibler. Im klassischen Rolle-zu-Rolle-Verfahren wird auf beschichtetes Papier oder Folien aus Polyethylenterephthalat (PET), Polycarbonat (PC) und Polyethylenphthalat (PEN) zurückgegriffen. Wird ein temperaturstabiles Foliensubstrat benötigt, wird häufig die technische Kunststoffgruppe der Polyimide (PI) verwendet. Wichtig ist die exakte Kenntnis der beigefügten Zusatzstoffe, da die Ausdampfung dieser während des Trocknungsprozesses zu einer Diffusion in die gedruckte Struktur führen kann. Dadurch kommt es zu einer verminderten elektrischen Leitfähigkeit der aufgetragenen Schicht. Werden metallische Substratmaterialien ausgewählt, muss vor dem Bedrucken eine Isolationsschicht aufgebracht werden.

Je nach Anwendung und Druckverfahren sind verschiedene Werkstoffeigenschaften für die richtige Substratauswahl entscheidend: Oberflächen-

energie, Temperaturbeständigkeit, Wärmeausdehnung, Oberflächenrauheit. Aber auch wirtschaftliche und ökologische Aspekte, wie Recycling und Verfügbarkeit, spielen bei der Auswahl eine Rolle.

Oberflächenenergie und Oberflächenspannung

Die Oberflächenenergie wird als freie Energie von Oberflächen definiert und ist bei Flüssigkeiten mit der Oberflächenspannung, welche sich auf Grenzflächenspannungen (flüssig-gasförmig (γ_{lv}), flüssig-fest (γ_{sl}), fest-gasförmig (γ_{sv})) bezieht, gleichgesetzt [31, 32]. Sie gibt an, wie hoch die Benetzbarkeit einer Oberfläche ist. Die Betrachtung der Oberflächenenergie findet in der Regel in Zusammenhang mit der Adhäsion statt. Hierbei gilt, dass hochenergetische Oberflächen eine bessere Benetzung aufweisen als niederenergetische. Die Oberflächenspannung ist definiert als die Arbeit dW_A , welche pro Fläche dA geleistet werden muss, um die Flüssigkeitsoberfläche zu vergrößern. [33]

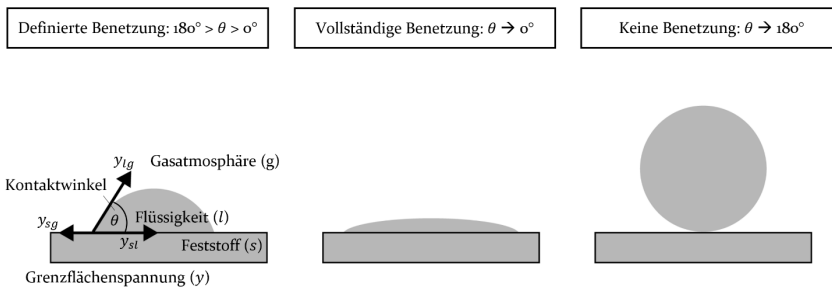


Bild 6: Schematische Darstellung der Benetzung eines Substrats mit einer Flüssigkeit, in Anlehnung an [34]

Bei Metall-Kunststoffverbindungen handelt es sich in der Regel um energiereiche und chemisch reaktive Metalloberflächen und eine im Gegensatz dazu energiearme Kunststoffoberfläche. Eine genaue Bestimmung der Oberflächenenergien ist indirekt experimentell mit Hilfe der Kontaktwinkelmessung möglich. Ein Tropfen einer Flüssigkeit mit bekannter Oberflächenenergie (l) wird in einer Gasatmosphäre (v) auf einen Feststoff (s) appliziert. In Abhängigkeit der Grenzflächenspannungen ergibt sich ein Gleichgewichtszustand im Dreiphasensystem, der die Benetzung des Tropfens und dessen Kontaktwinkels θ auf der Feststoffoberfläche bestimmt. Anhand der Young'schen Gleichung ist der Zusammenhang der Grenzflächenspannungen wie folgt definiert:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (1)$$

Bei Polymeren, welche eine niedrige Oberflächenenergie aufweisen, kann näherungsweise angenommen werden, dass $\gamma_{sv} = \gamma_s$ gilt. Weiterhin sind Wechselwirkungen zwischen den Flüssigkeitsmolekülen an der Oberfläche vernachlässigbar, was zur Annahme $\gamma_{lv} = \gamma_l$ führt. Somit kann die Gleichung wie folgt umformuliert werden [35, 36]:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos \theta \quad (2)$$

Die Spreitung der Flüssigkeit auf der Oberfläche ohne äußere Einflüsse wird bei $\theta = 0^\circ$ erzielt und wird vor allem in der Klebstofftechnik angestrebt. Damit der Kontaktwinkel des Flüssigkeitstropfens auf einem Substrat möglichst klein ist, muss die Oberflächenspannung der Flüssigkeit geringer als die Oberflächenenergie des Substrats sein ($\gamma_l < \gamma_s$). Ist die Oberflächenenergie des Feststoffes kleiner als die Grenzflächenspannung zwischen Substrat und Gasatmosphäre, tritt nur eine geringe Benetzung ein ($\theta > 90^\circ$). In Bild 6 sind die drei möglichen Benetzungen schematisch dargestellt. Keine Benetzung mit einem Kontaktwinkel $\theta = 180^\circ$ ist rein theoretisch, da in der Natur immer eine geringe Adhäsion wirkt. [35]

Temperaturbeständigkeit und Wärmeausdehnung

Bei der Verwendung von Kunststoffen sind viele Materialeigenschaften von der Temperatur abhängig. Diese müssen auf ihren Einsatzbereich und den Post-Prozess der Sinterung gedruckter Elektronik angepasst sein. Die meisten relevanten teilkristallinen Kunststoffe haben eine Glasübergangstemperatur zwischen -20°C und 100°C . Diese entspricht zwar dem potenziellen Einsatzgebiet, ist jedoch für den konventionellen thermischen Trocknungsprozess, die sich im Bereich $> 120^\circ\text{C}$ bewegen, zu gering.

Im Gegensatz zu den am häufigsten eingesetzte Druckmaterialien Silber und Kupfer, steigt bei Kunststoffen insbesondere bei Überschreitung der Glasübergangstemperatur der CTE (Coefficient of Thermal Expansion) drastisch an, was das Risiko der Rissbildung des Verbundstoffes erhöht. In Tabelle 1 und Bild 7 sind die wichtigsten Materialparameter von PET, PEN und PI dargestellt. Kupfer weist im Vergleich einen CTE von 17 ppm/K auf, während Silber einen CTE von 19 ppm/K besitzt. Wichtig zu beachten ist, dass die in den Datenblättern der Materialhersteller angegebenen CTE-Werte nur für einen bestimmten Temperaturbereich gültig sind. In der Regel beziehen sich die Angaben auf einen engen Temperaturbereich ausgehend von Raumtemperatur. [37]

Aufgrund der Fehlanpassung des Ausdehnungskoeffizienten, dargestellt durch den Abstand zum gestrichelten CTE-Wert von Kupfer oder Silber, zwischen Substratmaterial und dem Verbundstoff Drucktinte ergeben sich unter thermischer Wechselbelastung kritische Spannungszustände, die in den dünnen Leiterbahnen lokale Spannungskonzentrationen verursachen. Diese sind Auslöser für Rissbildung, welche sich in der gedruckten Struktur ausbreiten und zum Ausfall der Funktionsfähigkeit führen.

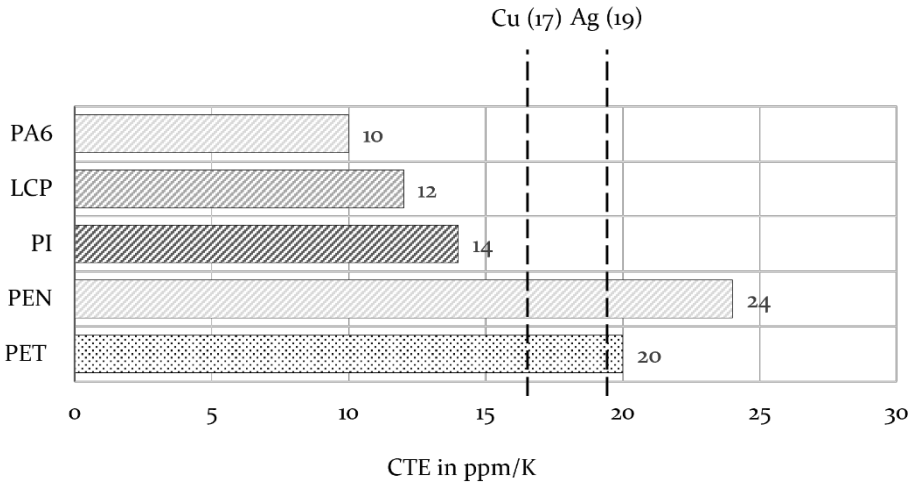


Bild 7: Thermische Längenausdehnung ausgewählter Substratmaterialien, in Anlehnung an [37, 38]

Oberflächenrauheit

Neben der Oberflächenenergie spielt auch die Oberflächenrauheit für die Haftfestigkeit eine wichtige Rolle. Diese beeinflusst neben der Adhäsion bei dünnen, gedruckten Schichten auch deren Oberflächenprofil. Im Bereich hoher Frequenzen, wie sie zum Beispiel bei Radarantennen benötigt werden, trägt aber die Oberflächenrauheit besonders zu den Gesamtverlusten und einer hohen Signaldämpfung bei und wirkt sich dementsprechend kontraproduktiv auf die elektrischen Eigenschaften aus. Ist die Oberflächenrauheit bekannt, kann sie in die Modellierung aufgenommen und korrekt berücksichtigt werden. [39, 40] In Tabelle 1 sind die Substratparameter der für flexible Elektronik am häufigsten eingesetzten Materialien PET, PEN und PI aufgeführt. Eine deutliche Unterscheidung ist vor allem bei der Glasübergangstemperatur zu sehen, welche einen Einfluss auf den zukünftigen Anwendungsbereich gedruckter Elektronik hat.

Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Materialparametereigenschaften von PET, PEN und PI, in Anlehnung an [37, 38]

| Materialeigenschaft | PET | PEN | PI |
|----------------------------|------------|------------|-----------|
| T_g in °C | 70 – 110 | 120 – 155 | 155 – 270 |
| α in ppm/K | 15 – 33 | 20 | 8 – 20 |
| Oberflächenrauheit | mittel | mittel | gering |

2.2.2 Druckmaterialien

Je nach Anwendungsgebiet und eingesetzter Drucktechnologie müssen die verwendeten Druckmaterialien unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Die rheologischen Charakteristiken, wie Viskosität und Oberflächenspannung, werden an die Drucktechnologie angepasst. Hieraus ergeben sich hochviskose Pasten oder niedrigviskose Tinten, welche neben der Anforderung einfache Druckbarkeit auch auf einer Vielzahl von Substraten eine adäquate Haftfestigkeit erzielen müssen. [41]

Tabelle 2 zeigt eine Auflistung der rheologischen Eigenschaften für verschiedene Drucktechnologien. [41]

Tabelle 2: Auswahl der meistgenutzten Drucktechnologien und ihrer rheologischen Eigenschaften in der Elektronikproduktion

| Drucktechnologie | Viskosität in Pas | Oberflächenspannung in mN/m |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Siebdruck | 0,5 – 5 | 38 – 47 |
| Flexodruck | 0,01 – 0,5 | 14 – 23 |
| Ink-Jet-Druck | 0,001 – 0,1 | 15 – 25 |

Grundsätzlich bestehen Tinten und Pasten für die gedruckte Elektronik aus vier Komponenten:

1. Füllmaterial
2. Bindemittel/Organik/Polymere
3. Additive
4. Lösemittel

Das Füllmaterial besteht in der Regel aus metallischen, organischen oder keramischen Bestandteilen. [42] Hauptaugenmerk liegt in der gedruckten Elektronik auf den metallischen Füllmaterialien. Bei der Wahl des Metalls

spielen die Kriterien Kosten, Handhabung und Leitfähigkeit eine wichtige Rolle. Besonders geeignete Metalle sind aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit Silber mit 61 MS/m, Kupfer mit 58 MS/m und Gold mit 45 MS/m. Aus kostentechnischer Sicht wird auf die Verwendung von Goldpartikeln in der Massenproduktion weitgehend verzichtet. Kupfer mit Kosten von 7,71 € pro kg ist hier Silber mit 730 € pro kg (Stand August 2023) vorzuziehen. Ein weiterer signifikanter Faktor bei der Entscheidung, welches Metall als Basis genutzt werden soll, ist eine einfache Handhabung während des Druckprozesses. Hierbei weist Kupfer aufgrund der Oxidation einen wesentlichen Nachteil auf. [43] Kupfer bildet sehr schnell Oxide aus, welche das Sintern erschweren oder komplett verhindern, weshalb hauptsächlich Silber trotz höherer Kosten eingesetzt wird. [44]

Die verwendeten Partikelgrößen bewegen sich im Nanometerbereich (< 100 nm) für Tinten oder im Mikrometerbereich (10 µm – 30 µm) für Pasten. Der Masseanteil der Partikel liegt zwischen 20 und 60 Gewichtsprozent (wt%) bei den meisten Druckverfahren jedoch über 80 wt%, wie beispielsweise beim Siebdruck. Metallpartikel im Mikrometerbereich werden in der Metallurgie mittels mechanischer, chemischer oder elektrolytischer Verfahren hergestellt. Die Herstellung metallischer Nanopartikel erfolgt entweder durch die Zerkleinerung makroskopischer Metallstücke mittels Laserablation, mechanischer Mahltechniken (Top-down-Prinzip) oder durch chemische Synthese, wobei die Partikel aus atomaren Einheiten aufgebaut werden (Bottom-up-Prinzip). Hierbei können Nanopartikel in Form von Kugeln, Stäbchen, Drähten, Würfeln, Tetraedern und Bipyramiden synthetisiert werden. [41, 45, 46]

Die in der Tinte enthaltenen Bindemittel sind für eine homogene Vermischung der Metallpartikel im Lösemittel verantwortlich und dienen der Erhöhung der Adhäsion auf dem Substrat. Diese polymeren Bindemittel bestehen aus Acryl-, Styrol-, Silikon- oder Fluorelastomeren. Abhängig von der Oberflächenchemie des Füllmaterials wird das geeignete Bindemittel ausgewählt. Das Lösemittel wird zu Erzielung der gewünschten Viskosität benötigt. Anhand der Hansen Löslichkeitsparameter [47] kann die Löslichkeit vorhergesagt werden und in Abhängigkeit von Bindemittel und Füllmaterial das richtige Lösemittel ausgewählt werden. Als letzter Bestandteil werden der Tinte oder Paste verschiedene Additive zugefügt. Diese bestehen aus Tensiden, Haftvermittlern, Feuchthaltemittlern, Penetrationsförderern und Stabilisatoren. Somit werden die rheologischen Eigenschaften sowie die Benetzungs- und Dehnungseigenschaften der Tinte und gedruckten Strukturen definiert.

Niedrigviskose Tinten, die im Aerosol-Jet-, Ink-Jet- und Nano-Jet-Verfahren eingesetzt werden, teilen sich in zwei Kategorien. Die erste Kategorie besteht aus einer Suspension von Nanopartikeln (NP). Diese Tinten werden als Nanopartikelintinten bezeichnet. Die zweite Kategorie an Tinten basiert auf metall-organischen Dekompositionen (MOD) bestehend aus Silbersalz, welches in einem geeigneten Lösemittel gelöst wird. Der Vorteil der MOD-Tinten gegenüber NP-Tinten besteht in einer Reduktion der Verstopfung der Druckdüsen. Aufgrund der geringeren Anzahl an Partikel ist die später generierte elektrische Leitfähigkeit geringer als bei den weit verbreiteten Nanopartikelintinten, weshalb diese bevorzugt eingesetzt werden. [43, 48] Bild 8 zeigt die Zusammensetzung einer Silbernanopartikelintinte mit kugelförmigen, ummantelten Silbernanopartikeln, Lösemittel und Additiven.

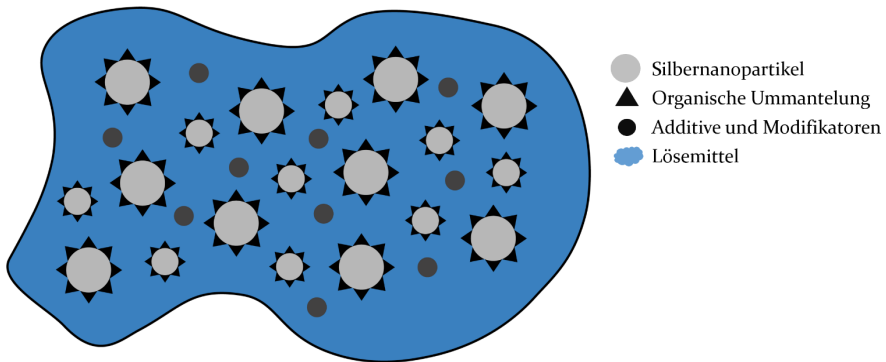


Bild 8: Schematische Darstellung des Druckmaterials bestehend aus Silbernanopartikeln, organisches Coating sowie Lösemittel und Additiven, in Anlehnung an [30]

2.3 Verfahren zur Herstellung gedruckter Elektronik

Der Herstellungsprozess gedruckter Elektronik lässt sich in drei Schritte untergliedern, wobei in dieser Variante auf eine optionale Substratvorbehandlung und auf eine Nachbehandlung der gesinterten Strukturen verzichtet wird. Der erste Schritt ist das Drucken der gewünschten und vorab mit einem CAD-Programm erstellten Struktur mittels selektiver Druckverfahren. Im folgenden Abschnitt wird im Detail auf die möglichen Druckverfahren eingegangen.

Die eingesetzten Druckverfahren in der gedruckten Elektronik lassen sich in berührende und nicht-berührende Verfahren sowie analoge und digitale Druckverfahren einteilen. Die Kategorie der Druckverfahren mit statischen Druckformen, auch *analoge Druckverfahren*, nach DIN 16500 beinhaltet die

Hauptdruckverfahren Hochdruck (z.B. Flexodruck), Flachdruck (z.B. Offsetdruck), Tiefdruck und Durchdruck (z.B. Siebdruck).

Im Gegensatz dazu stehen die Druckverfahren mit dynamischer Druckform und ohne Druckform, welche oft unter dem Begriff *digitale Druckverfahren* aufgeführt werden. Darunter zählen unter anderem die berührungslosen Verfahren wie Ink-Jet, Aerosol-Jet, Nano-Jet und Piezo-Jet aber auch der berührende Dispensprozess. [49] Bild 9 zeigt eine schematische Darstellung der bekannten Druckverfahren untergliedert in analoge und digitale bzw. berührende und nicht-berührende Verfahren.

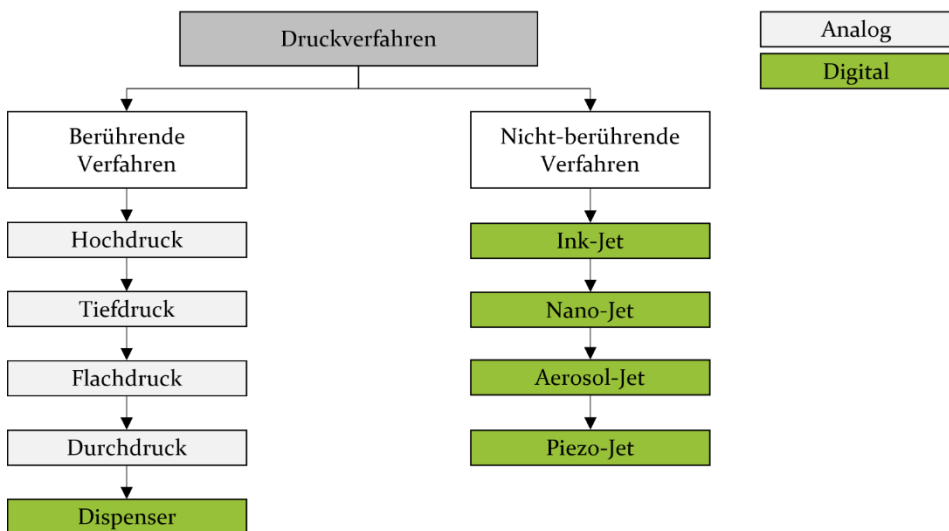


Bild 9: Schematische Darstellung einer Auswahl an Druckverfahren, die in berührende Verfahren (links) und nicht berührende Verfahren (rechts) unterteilt sind

2.3.1 Berührende Druckverfahren

Besonders bekannt sind die berührenden Verfahren aus dem Bereich des Zeitungs- und Mediendrucks, welche im folgenden Abschnitt ausführlich erläutert werden.

Flexodruck

In Bild 10 ist die schematische Darstellung des Flexodruckprinzips mit den vier unterschiedlichen Walzen zu sehen. Der Flexodruck ist ein Hochdruckverfahren, bei welchem die zu bedruckenden Stellen der Druckform höher liegen als die nichtdruckenden Stellen. [50] Die Druckfarbe wird

über eine Tauchwalze (1) aus der Farbwanne über die Nöpfchen der Aniloxwalze (2) auf die Druckform (3) übertragen. Überschüssige Farbe wird zuvor auf der Aniloxwalze mit einem Rakelmesser abgestreift. Die elastische Druckform überträgt die Farbe auf den zu bedruckenden Stoff (4), wobei mit Hilfe eines Gegenzylinders (5) der notwendige Anpressdruck erzeugt wird.

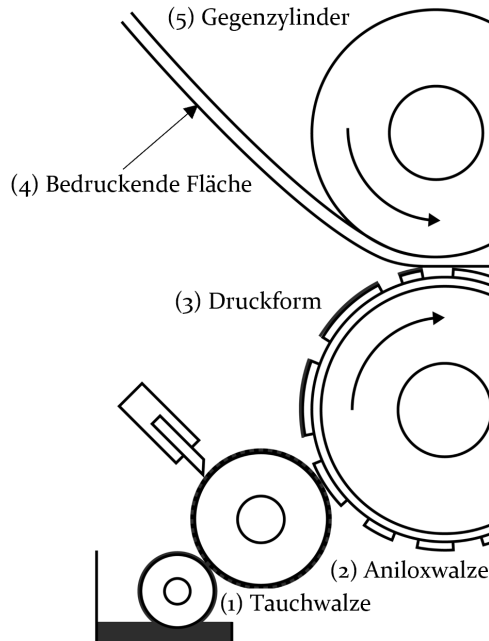


Bild 10: Schematische Darstellung des Flexodrucks mit Tauchwalze (1), Aniloxwalze mit Rakel (2), Druckform (3) und Gegenzylinder (5), in Anlehnung an [51]

Klassische Anwendungsgebiete des Flexodrucks sind der Verpackungsdruck und der Etikettendruck. [51] Bei diesem Druckverfahren werden Druckmaterialien mit Viskositäten zwischen $0,001 - 0,5$ Pas eingesetzt, mit denen sich Schichtdicken von circa 100 nm realisieren lassen. [7] Die Schichtbreiten bewegen sich zwischen $50 - 100$ μm und können in Abhängigkeit des verwendeten Substrates auf 20 μm reduziert werden.

Ein wesentlicher Nachteil des Flexodrucks ist die Schichtinstabilität und Entnetzung, die zu offenen Linien und einem Quetschrand führen können. Durch den Materialauftrag über Nöpfchen kann es zu Fehlern im Druckbild kommen, falls diese prozessbedingt verstopfen. Besonders für den Einsatz

bei Antennen und in der Hochfrequenztechnik ist der Flexodruck ungeeignet, da Unregelmäßigkeiten der Geometrien zu Verlusten führen. [52]

Tiefdruck

Beim Tiefdruck liegen die bildgebenden Stellen in Form von Nöpfchen in der Druckform. Die Druckform wird mittels Laser, Diamantstichel oder chemisch auf der Walze erzeugt. Durch die moderne lithografische Gravur kann eine Auflösung von $10\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$ erzeugt werden [53]. Bild 11 zeigt die schematische Darstellung des Tiefdrucks mit der Druckform, Rakel und dem Druckzylinder. Der Formzylinder mit der Druckform (1) wird in eine Farbwanne (2) eingetaucht und überschüssiges Material auf den Stegen mit Hilfe eines Rakels (3) abgestreift. Die Farbübertragung auf das Substrat findet über Anpressen des Druckzylinders (4) und Adhäsionskräfte statt. [51]

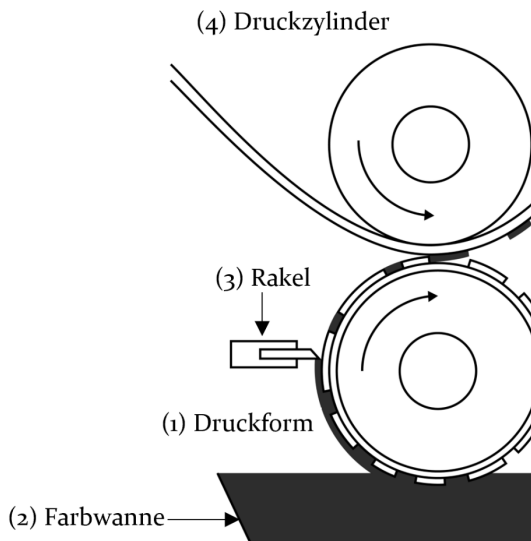


Bild 11: Schematische Darstellung des Tiefdrucks mit Druckform (1), Rakel (2) und Druckzylinder (3), in Anlehnung an [51]

Das Druckergebnis auf flexiblen Substraten wird durch die Parameter Porosität, Farbaufnahmefähigkeit, Benetzbarkeit, Viskosität, Trocknung, Rakelwinkel und -druck sowie die Druckgeschwindigkeit maßgeblich bestimmt. [52] Für das Tiefdruckverfahren werden Tinten mit einer Viskosität zwischen 10 und $100\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ verwendet [53]. Ein wesentlicher Nachteil des Tiefdrucks ist die kostenintensive Herstellung der Druckform. Erst ab einer

Auflagenhöhe von etwa 200.000 Stück wird dieser Nachteil gegenüber dem Flexodruck durch die Auflagenbeständigkeit ausgeglichen. [51]

Offsetdruck

Das Prinzip des Offsetdrucks, welches eine Weiterentwicklung des von Alois Senefelder 1796 erfundenen Lithographiedrucks ist und auch als Rotationsdruck bekannt ist, basiert auf dem chemischen Prozess der Abstoßung zwischen Fett und Wasser. In Bild 12 ist der Offset-Druck schematisch dargestellt. Die Druckform (1) besteht aus hydrophoben und hydrophilen Stellen, die sich auf einer Ebene befinden. Während des Druckvorgangs wird durch eine Feuchtwalze (2) die Form befeuchtet. Die hierfür verwendete Lösung weist einen pH-Wert zwischen 5 und 5,5 auf, enthält Tenside und zwischen 0 – 15 % Isopropanol. Durch die Benetzung wird eine stärkere Differenzierung zwischen den eingefärbten Bildbereich und dem nicht eingefärbten Basisträger erreicht.

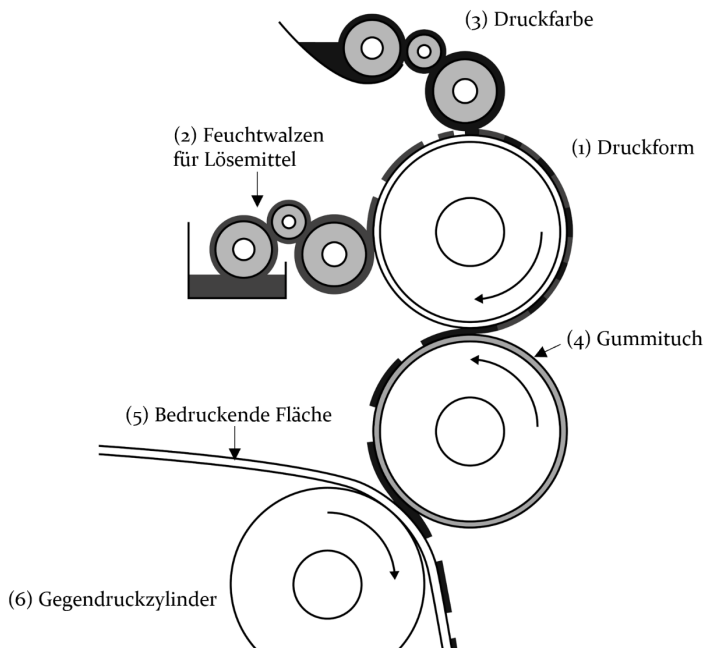


Bild 12: Schematische Darstellung des Offsetdrucks bei dem sich hydrophobe und hydrophile Stellen auf einer Ebene befinden, in Anlehnung an [51]

Als Basisträger werden hauptsächlich Aluminiumplatten oder Kunststofffolien, mit einer Dicke zwischen 0,2 und 0,5 mm verwendet. [54] Die

hydrophilen Stellen nehmen das Feuchtmittel auf, während in einem sich anschließenden Schritt die hydrophoben Stellen mit einer Farbwalze (3) eingefärbt werden. Die Druckfarbe wird auf ein Gummituch (4) abgesetzt und anschließend auf das zu bedruckende Substrat (5) übertragen. Die dafür notwendige Gegenkraft wird durch einen Gegendruckzylinder (6) erzeugt. [51]

Deutlich sichtbar wird hier ebenfalls, dass es sich um ein indirektes Druckverfahren handelt. Die Druckform kommt nicht direkt mit dem zu bedruckenden Stoff in Berührung. Beim Offsetdruck werden im Gegensatz zum Flexodruck, pastöse Farben und Tinten mit einer Viskosität zwischen 2 und 100 Pas verwendet [53]. Die mögliche minimale Strukturbreite beläuft sich heute bei den hochautomatisierten und hochvolumigen Produktionslinien auf 150 μm . [55]

Siebdruck und Schablonendruck

Beim Siebdruckverfahren, schematisch dargestellt in Bild 13, besteht die Druckform (1), aus einem Siebgewebe, welches an den zu druckenden Stellen durchlässig ist. Durch den Faden- oder Drahtdurchmesser wird die Siebfeinheit definiert eingestellt. Je höher die Fadenanzahl pro Zentimeter, desto feiner wird das Druckbild. Das Siebgewebe wird in einen metallischen, starren oder beweglichen Gewebehalter eingespannt und enthält um die Druckfläche Farbrühen. Diese freien Flächen werden zum Umsetzen des Rakels benötigt. Der Druckprozess wird mit einer Rakel (2), welche die Druckfarbe (3) über das Sieb führt, durchgeführt. An den offenen Siebstellen wird die pastöse Farbe auf das darunterliegende Substrat (4) gedrückt. [51]

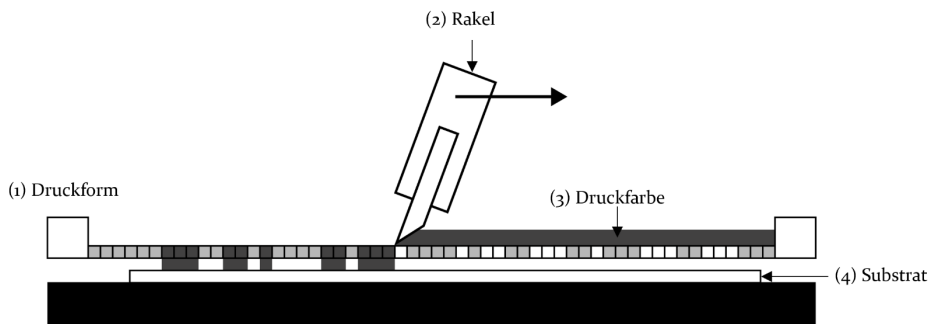


Bild 13: Schematische Darstellung des Siebdrucks mit Siebgewebe durch welches das Druckmaterial mittels eines Rakels gedrückt wird, in Anlehnung an [51]

Ein wesentlicher Vorteil des Siebdruckverfahrens im Gegensatz zu anderen analogen Druckverfahren, ist die 2,5D-fähigkeit des Prozesses, welche durch eine Absprunghöhe zwischen Substrat und Sieb ermöglicht wird. Durch diesen Abstand besteht die Möglichkeit Substrate mit leichten Schrägen und Erhöhungen zu bedrucken. Vergleichbar mit dem Offsetverfahren werden pastöse Materialien mit einer Viskosität zwischen 0,8 und 40 Pas eingesetzt [53], was zu Strukturbreiten $< 25 \mu\text{m}$ führt [56].

Der in der Elektronikfertigung häufig eingesetzte Schablonendruck findet nach demselben Prinzip wie der Siebdruckprozess statt. Der wesentliche Unterschied ist die Verwendung einer starren Schablone aus gehärtetem Stahl anstelle eines flexiblen Siebes. Durch die freien Stellen in der Schablone werden pastöse Druckmaterialien mit Hilfe eines Rakels gedrückt. Aufgrund der starren Schablone können nur zweidimensionale Substrate und begrenzt komplexe Strukturen bedruckt werden.

Dispensen

Beim Dispensdruck wird ein sich in einer Kartusche (1) befindliches normal- bis hochviskoses Druckmedium (2) durch Druckeinwirkung über eine Dosiernadel (3) auf ein Substrat aufgebracht, wie in Bild 14 schematisch dargestellt. [57] Die Größe der Dosiernadeln, mit diversen möglichen Innendurchmessern und Längen, wird in Abhängigkeit des Druckmediums und des Dispensprinzips ausgewählt. Je größer der Innendurchmesser und je kürzer die Dosiernadel ist, desto mehr Druckmaterial kann gefördert werden.

Das Dispensverfahren zählt zu den berührenden Verfahren und lässt sich in vier Prozessprinzipien einteilen: Zeit-Druck-, Schrauben-, Peristaltik- und Kolben-Prinzip. Bei allen Prinzipien entsteht während des Aufbringens durch das druckende Material eine Verbindung zwischen Dosiernadel und Substrat. Während Druck- und Viskositätsänderungen kaum einen Einfluss beim Kolben-Prinzip haben und somit eine hohe volumetrische Wiederholgenauigkeit aufweisen, ist die Handhabung und Geometrieflexibilität bei Zeit-Druck-Systemen hervorzuheben. [58] Obwohl es sich um ein berührendes Verfahren handelt, können mit dem Dispensprozess auch 2,5D-Oberflächen bedruckt werden. Im Gegensatz zu den vorher genannten Verfahren, sind keine Schablonen oder Masken notwendig. Die verwendeten Druckverfahren bewegen sich in der Regel, wie auch beim Siebdruck, im normal- bis hochviskosen Bereich. Durch das Anlegen eines Gegenluftstroms können jedoch auch niedrigviskose Druckmaterialien verarbeitet werden. Hierbei ist jedoch mit Einschränkungen hinsichtlich der Geometriegenauigkeit zu rechnen. [57]

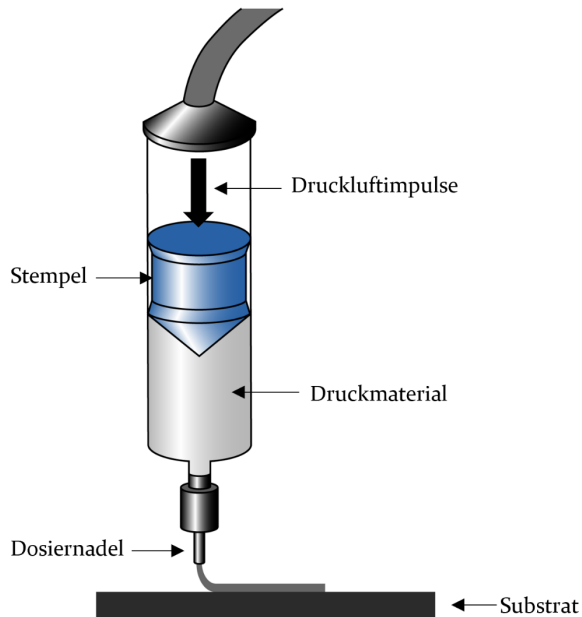


Bild 14: Schematische Darstellung des Zeit-Druck-Dispensprozesses als berührendes Druckverfahren, in Anlehnung an [Si]

2.3.2 Nicht berührende Druckverfahren

Die nichtberührenden Druckverfahren weisen den entscheidenden Vorteil der 3D-Fähigkeit auf und werden deshalb bevorzugt für die gedruckte Elektronik eingesetzt, um deren volles gestalterisches Potenzial auszuschöpfen.

Ink-Jet

Im Jahr 1951 bildete das Patent des ersten Ink-Jet-Druckers Mingograf den Grundstein der Ink-Jet Technologie. [32] Beim Ink-Jet-Druck wird zwischen dem kontinuierlichen und Drop-on-Demand (DOD)-Verfahren unterschieden.

Im kontinuierlichen Modus werden zusammenhängende Strukturen durch einen gleichmäßigen Tintenstrom erzeugt. Nicht benötigte Tropfen werden vor dem Auftreffen auf die Substratoberfläche elektrisch abgelenkt. Vor allem im Bereich der Hochgeschwindigkeitsdrucker, welche eine Druckgeschwindigkeit von 400 m/min erreichen können [59], findet diese

Technik ihre Anwendung und ermöglicht Strukturgrößen von 50 μm bis 150 μm .

Beim DOD-Verfahren findet die Erzeugung der Druckstruktur durch einzelne sequenziell gebildete Tröpfchen statt. Zwei unterschiedliche Verfahren kommen hierbei zum Einsatz. Mittels thermischer Auslösung im sogenannten Bubble-Jet-Druckkopf oder durch elektrische Auslösung im Piezo-Druckkopf. Das Verdampfungsprinzip findet im Bubble-Jet Druckkopf Anwendung. Durch die lokale Erhitzung (1) der Tinte kommt es zu einer schlagartigen Verdampfung, welche ein fein dosiertes Tintenvolumen (2) zum Düsenausgang verdrängt und auf dem Substrat abscheidet. Beim Piezo-Verfahren wird die Erzeugung der Tropfen durch den elektrischen Impuls eines Piezokristalls (3) gesteuert. Durch die Verformung der angegliederten Membran werden feine Tintentropfen (2) aus der Düse ausgestoßen. Deren Größe kann durch die angelegte Spannung kontrolliert werden. Hierbei gilt, je kleiner die Spannung, desto feiner die Tropfenbildung.

Das beschriebene thermische und piezoelektrische Druckprinzip ist in Bild 15 dargestellt. Prinzipiell werden Düsengrößen mit einem Innendurchmesser zwischen 10 – 100 μm verwendet. Die möglichen Druckmaterialien dürfen für eine optimale Tropfenerzeugung eine Viskosität von 20 mPas nicht überschreiten.

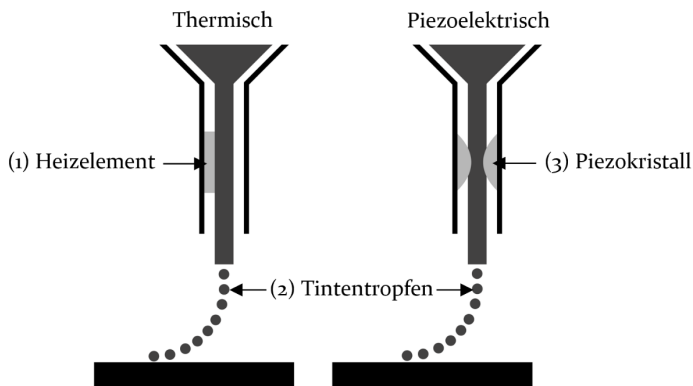


Bild 15: Schematische Darstellung des Ink-Jet Prozesses mit thermischer (links) und elektrischer (rechts) Auflösung, in Anlehnung an [32]

Auch wenn das Ink-Jet-Verfahren zu den berührungslosen Verfahren zählt, muss ein konstanter Arbeitsabstand von ungefähr 2 mm eingehalten werden, um qualitativ hochwertige Linien zu erzeugen. Neben dem

Arbeitsabstand ist die Qualität der Leiterstrukturen von zahlreichen weiteren Prozessparametern abhängig. Dazu zählen die Tinten-Substrat-Kombination hinsichtlich Oberflächenspannung und -energie, die Größe der Tintentropfen, die Vorschubgeschwindigkeit des Druckkopfs und die Tintenviskosität. Vor allem im Bereich der gedruckten Radio-Frequency Identification (RFID)-Anhänger, -Sensoren und organischen LEDs wird das Ink-Jet-Verfahren eingesetzt. [30, 32]

Piezo-Jet

Basierend auf demselben Prinzip wie beim Ink-Jet Verfahren, werden beim Piezo-Jet-Verfahren der gedruckten Elektronik einzelne Tropfen durch einen Piezoaktor erzeugt. Dieser öffnet und schließt ein Ventil mit einem Keramikstößel. Bei geöffnetem Ventil fließt das pneumatisch zur Verfügung gestellte Druckmedium in den Hohlraum über der Düse. Durch Schließen des Ventils wird der Stößel nach unten gedrückt, ein einzelner Tropfen gelöst und auf das Substrat aufgebracht.

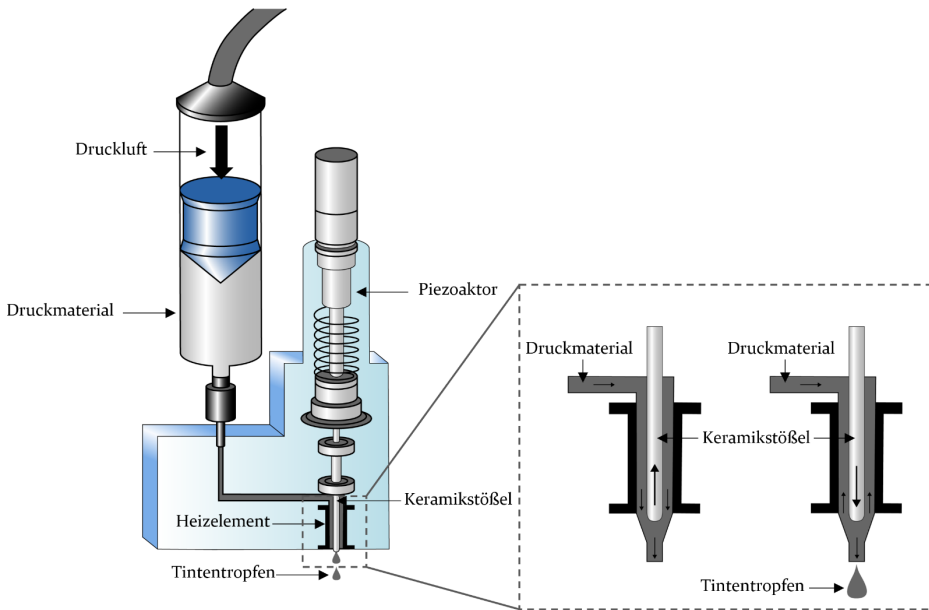


Bild 16: Schematische Darstellung des Piezo-Jet-Verfahrens mit Piezoaktor und Keramikstößel, in Anlehnung an [60, 61]

In Bild 16 ist das Druckprinzip mittels Piezokristall schematisch dargestellt. Abhängig vom verwendeten Piezoaktor werden Dosierfrequenzen bis zu 1,5 kHz erreicht und eine minimale Dosiermenge von 0,5 nl. Dadurch können Druckmaterialien mit einer Viskosität von bis zu 200 Pas verarbeitet

werden. Je nach gewählter Spannung können jedoch auch niedrigviskose Tinten verwendet werden. Mit einer 50 μm Düsen lassen sich Linienbreiten zwischen 250 μm und 350 μm erzeugen. [62]

Aerosol-Jet

Das Aerosol-Jet-Verfahren ist ein kontaktloses und vektorbasiertes Druckverfahren, welches von der Firma Optomec entwickelt wurde. Die Zerstäubung der niedrig- bis mittelviskosen Tinte im Bereich zwischen 7 mPas und 2500 mPas erfolgt mittels Ultraschall oder pneumatischer Sogwirkung. Die Materialbreite ist mit leitfähigen, halbleitenden und dielektrischen Tinten sehr vielfältig.

Die durch den Bernoulli-Effekt zerstäubte Tinte wird im Tintentank (1) mit dem inerten Trägergas (2) vermischt und durch Kunststoffleitungen Richtung Druckkopf geleitet. Die so entstandenen Aerosolpartikel haben eine Größe zwischen 1 – 5 μm und werden vor dem Erreichen des Druckkopfs (6) durch den virtuellen Impactor (3) geleitet. Dabei wird das Trägergas reduziert (4), die zu kleinen Partikel abgesaugt, während zu große Partikel zurück in den Tintenbehälter fallen. Im Druckkopf wird das homogene Aerosolgemisch mit einer Partikelgröße zwischen 3 – 4 μm mit einem Schutzgas aerodynamisch ummantelt (5) und so fokussiert auf das Substrat (7) aufgebracht. In Bild 17 wird der beschriebene Aerosol-Jet-Druckprozess schematisch dargestellt.

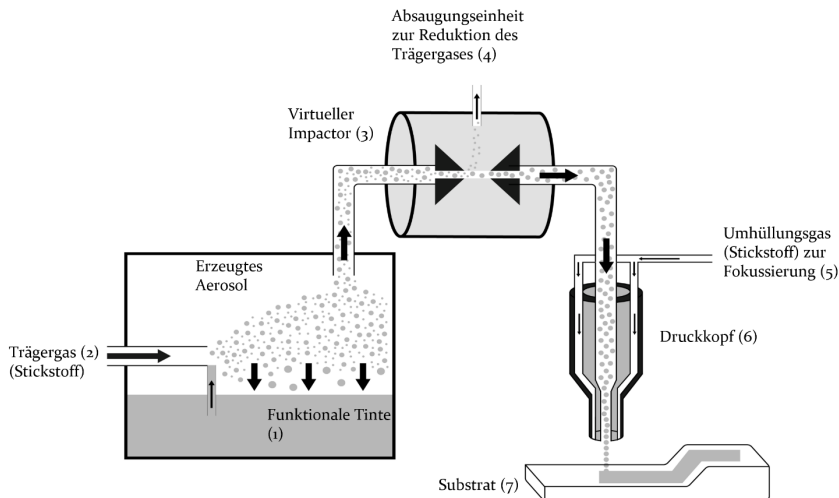


Bild 17: Schematische Darstellung der Aerosol-Jet-Druckverfahrens mit pneumatischer Zerstäubung, in Anlehnung an [30]

Der Arbeitsabstand zwischen Substrat und Düse kann bis zu 10 mm betragen, wobei sich ein Abstand bis zu 5 mm für eine sehr gute Konturschärfe als ideal erwiesen hat. Substratunebenheiten können somit ohne Anpassung der z-Achsenausrichtung des Druckkopfs ausgeglichen werden. Mit dem Aerosol-Jet Verfahren sind feinste Linienbreiten bis zu 10 μm bei einem Linienabstand von 20 μm bei idealen Prozessparametern realisierbar. Die Erzeugung des Aerosols findet in einem kontinuierlichen Prozess statt. Für die Unterbrechung bei getrennten Strukturen sorgt der sogenannte Shutter. Dieser kann entweder ein einfaches Metallgestänge direkt am Düsenausgang sein oder magnetisch integriert im Düsenaufbau. Besonders im Bereich der Hochfrequenztechnik wird aufgrund der dreidimensionalen Fähigkeit des Druckprozesses das Aerosol-Jet-Verfahren eingesetzt. [30]

2.4 Theorie der Sinterung und Sintermethoden für die gedruckte Elektronik

Nach dem Druckprozess findet die Sinterung, beziehungsweise Verdichtung der Strukturen statt, um die finalen elektrischen und mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Hierbei wird standardmäßig auf die Erwärmung der Druckmaterialien durch Konvektion zurückgegriffen. Vergleichbar mit dem in der Elektronikfertigung etablierten Reflowprozess wird über Temperatur und Zeit das Ausdampfen der enthaltenen Lösemittel und das Ausbilden von Sinterhälsen zwischen den Partikeln vorangetrieben. Bei MOD-Tinten wird Wärme eingesetzt, um Metall abzuscheiden und organische Komponenten zu verbrennen, während bei NP-Tinten die organischen Stabilisatoren entfernt werden. [43]

Welche Schwierigkeiten und Herausforderungen hierbei in Anbetracht der für die gedruckte Elektronik verwendeten Materialien entstehen, wird detailliert im folgenden Abschnitt beschrieben. Die Reduktion der Sinterzeit und -temperatur ist essenziell für den wirtschaftlichen Einsatz gedruckter Elektronik in der Industrie. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den für diese Arbeit wichtigen physikalischen Grundlagen des Sinterprozesses und alternativen Sinterverfahren, mit welchen die wirtschaftliche Einsetzbarkeit gedruckter Strukturen erreicht werden kann.

2.4.1 Theoretische Grundlagen des Sintervorgangs

Um die relevanten Aspekte der Materialwissenschaft zu berücksichtigen, werden im folgenden Abschnitt die Grundlagen des Sinterprozesses

erklärt. Der Begriff der Sinterung, welcher in der DIN EN ISO 3252 [63] als urformendes Fertigungsverfahren definiert ist, gestattet die Herstellung von Formteilen unter Umgehen der flüssigen Phase, das heißt ohne Schmelzen. Ursprünglich wird der Begriff vor allem für pulverbasierende Prozesse verwendet. Im folgenden Abschnitt wird auf die Grundlagen des pulverbasierten Sinterprozesses eingegangen und die Besonderheiten der Sinterung von Nanopartikeln, Tinten und Pasten diskutiert.

Pulverbasierter Sinterprozess

Durch Kompaktieren eines Pulvers und Glühen, auch bekannt als Sintern, unterhalb seiner Schmelztemperatur, werden Halbzeuge und Formteile hergestellt. Handelt es sich um mehrphasige Systeme, ist der Schmelzpunkt der höchsten und basisbildenden Phase ausschlaggebend. Bei keramischen Materialien ist die Sintertechnik der bevorzugte Herstellungsprozess. In den Bereichen der metallischen Werkstoffe hat sich das Verfahren stetig weiterentwickelt. Zu Beginn des Prozesses steht die Herstellung des Pulvers mit definierten Eigenschaften, die zur gewählten Verarbeitungsmethode passt und auch die gewünschten Materialeigenschaften aufweist. Die genauen Pulverherstellungsverfahren sind für den weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht von Relevanz, weshalb auf eine detaillierte Erläuterung verzichtet wird.

Bis heute existiert keine einheitliche Theorie des Sinters und somit auch kein physikalisches Modell, welches den Sintervorgang vollständig beschreibt. Ursache hierfür ist der Tatsache geschuldet, dass das Sintern Ausdruck einer Vielzahl an Teilprozessen ist, die sich mit Temperatur, Zeit und anderen Einflussfaktoren überlagern. [64] Die wichtigste thermodynamische Kraft der pulverbasierenden Sinterung ist die Reduzierung der freien Oberflächenenergie durch die Umlagerung von Material. [65] Die durch den Sinterprozess erzeugte Reduktion der freien Oberfläche führt zu einer Verdichtung des losen Pulvers. Eine Bestimmung der exakten Temperatur, bei welcher der Sinterprozess beginnt, ist nicht möglich, da es sich um einen kontinuierlich ablaufenden kinetischen Prozess handelt. Häufig wird jedoch als Starttemperatur der Wert angegeben, an welchem eine schnelle Verdichtung aufgrund der Materialtransportmechanismen eintritt. [66] Nach [67] sind die wesentlichen Materialtransportmechanismen die während des Sinterns auftreten, wie folgt:

- Viskoses und plastisches Fließen
- Verdampfung und Wiederkondensation
- Oberflächen-, Volumen- und Grenzflächendiffusion

Ein weiterer Einflussfaktor auf das Sinterergebnis, ist die Packungsdichte des ungesinterten Pulverrohlings. Bei einer Volumendichte von 60 % bis 64 % existieren mehr Partikelkontaktstellen, was eine geringere Verdichtung notwendig macht. Durch diese Verringerung kommt es zu einer Reduktion der Sinter Temperatur und Sinterzeit. [66, 67] Die typischen Phasen des Festphasensinterns sind in Bild 18 dargestellt.

Im Kontaktstadium, der Phase 1, berühren sich die losen Pulverpartikel. Nach dem Erreichen der für die Aktivierung der Materialtransportmechanismen notwendigen Temperatur erfolgt die Ausbildung der Sinterhalse in Phase 2. Anschließend findet das Kornwachstum (Phase 3) statt, welches zu einem verdichteten Sinterkörper und somit der vierten und letzten Phase führt. [67, 68]

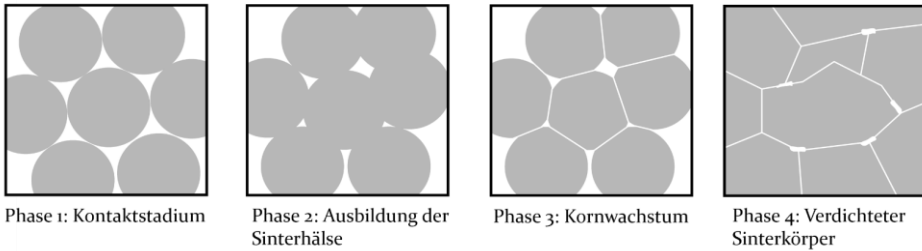


Bild 18: Darstellung des Festphasensinterns mit den vier Phasen Kontaktstadium, Ausbildung der Sinterhalse, Kornwachstum und verdichteter Sinterkörper, in Anlehnung an [67]

Die einzelnen Transportmechanismen werden im Folgenden anhand des vereinfachten Zweiteilchenmodells mit der Annahme sphärischer Partikel nach [69] detailliert erläutert. In Bild 19 ist das Zweiteilchenmodell mit und ohne Material schrumpfung dargestellt. Auf der linken Seite des Bildes (a) bleibt der Abstand zwischen den Partikeln unverändert, während mit steigender Sinterzeit auch die Größe des Sinterhalses ansteigt. Die rechte Seite des Bildes (b) zeigt die Ausbildung des Sinterhalses durch Materialtransport zwischen den Partikeln, was zu einer Schwindung des Materials führt. Bleibt die Korngröße unverändert (a) und beträgt der Flächenwinkel 180° , wird der Radius r der Halskrümmung, die Halsfläche A_H und das Halsvolumen V mit dem Partikelradius a und dem Nackenradius x wie folgt definiert

$$r \approx \frac{x^2}{2a} \tag{3}$$

$$A_H \approx 2\pi x 2r = \frac{2\pi x^3}{a} \quad (4)$$

$$V \approx \int A_H dx = \frac{\pi x^4}{2a} \quad (5)$$

Für (b) gilt

$$r \approx \frac{x^2}{4a} \quad (6)$$

$$A_H \approx \frac{\pi x^3}{a} \quad (7)$$

$$V \approx (\pi x^2 2r)/2 = \frac{\pi x^4}{4a} \quad (8)$$

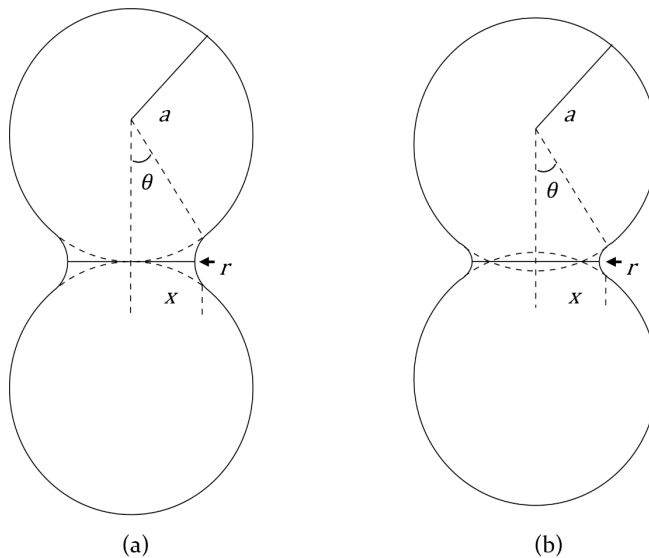


Bild 19: Zweiteilchenmodell zur Darstellung der Transportmechanismen ohne (a) und mit (b) Material schrumpfung, in Anlehnung an [69]

Die treibenden Kräfte der Sinterung zeigen sich in den Unterschieden von Krümmungsdruck, Dampfdruck und Leerstellenkonzentration.

Der Druckunterschied für das in Bild 19 gezeigte Teilchenmodell ΔP , ist

$$\Delta P \cong \frac{\gamma_s}{r} \quad (9)$$

Die Leerstellenkonzentrationsunterschied ΔC_v ist definiert als

$$\Delta C_v = C_{v,\infty} \frac{V'_m \gamma_s}{RT r} \quad (10)$$

Und der Dampfdruckunterschied Δp ist

$$\Delta p = p_\infty \frac{V_m \gamma_s}{RT r} \quad (11)$$

mit γ_s der spezifischen Oberflächenenergie des Festkörpers, V'_m dem molaren Volumen der Leerstellen und V_m dem molaren Volumen des Festkörpers. In Bild 20 sind die wesentlichen Materialtransportmechanismen dargestellt, die aufgrund des Unterschieds in der Grenzflächenkrümmung erfolgen.

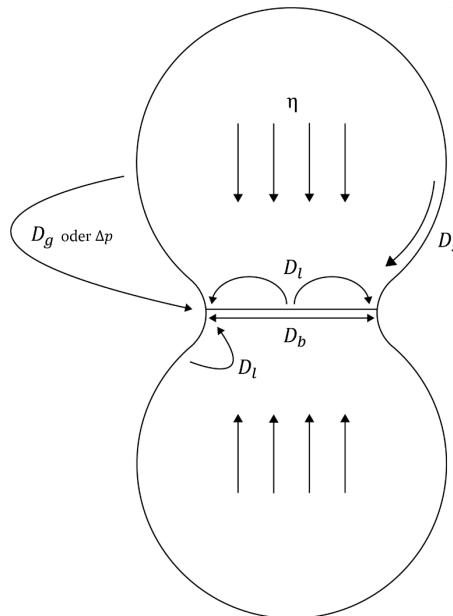


Bild 20: Schematische Darstellung der Materialtransportmechanismen während des Sinterprozesses, in Anlehnung an [69]

Die genauen Transportmechanismen während des Sinterprozesses sind in Tabelle 3 aufgeführt. Je nach Temperatur, Zeit, Halsradius oder Teilchen-

größe kann der dominierende Mechanismus variieren. Die Verringerung des Abstands zwischen einzelnen Partikeln findet durch viskoses Fließen oder durch Materialtransport von der Korngrenze über die Bewegung von Atomen statt. Gelangt Material von der Partikeloberfläche zum Hals wird der Abstand zwischen den Partikeln nicht vergrößert, sondern eine Vergrößerung des Sinterhalses durch Materialumverteilung tritt ein. Erst 1950 wurde durch eine Reihe von Modellexperimenten die Korngrenze als Quelle des Materialtransports für Verdichtung und Schrumpfung in kristallinen Pulverpresslingen anerkannt. Bei atmosphärischen Sintern spielt die plastische Verformung keine Rolle. [69, 70]

Tabelle 3: Verschiedene Arten des Transportmechanismus, die während des Sinterprozesses stattfinden, in Anlehnung an [67, 71, 70]

| Materialtransportmechanismus | Materialquelle | Parameter |
|---|----------------|------------|
| Gitterdiffusion | Korngrenze | D_l |
| Korngrenzendiffusion | Korngrenze | D_b |
| Viskoses Fließen | Bulkmaterial | η |
| Oberflächendiffusion | Kornoberfläche | D_s |
| Gitterdiffusion | Kornoberfläche | D_l |
| Gasphasentransport <ul style="list-style-type: none"> • Kondensation/Verdampfung • Gasdiffusion | Kornoberfläche | Δp |
| | | D_g |

Sinterprozess bei nanopartikulären Materialien

Die sechs im vorherigen Abschnitt erläuterten Mechanismen beziehen sich auf Partikel in herkömmlicher Größe im Mikrometerbereich. Bei Sinterprozessen von Nanopartikeln mit einem Durchmesser von 1 nm bis 100 nm zeigen Simulationen aus den 1990er Jahren, dass vor allem zwei der sechs klassischen Mechanismen einen Beitrag zur Sinterung leisten. Dabei handelt es sich um die Oberflächendiffusion und die Korngrenzendiffusion, die durch die atomaren Kräfte in der Nähe von Grenzflächen beschleunigt werden. [72] Prinzipiell sind weiterhin die gleichen Prinzipien, wie bei mikroskalierten Partikeln gültig, jedoch lässt sich bei nanopartikulären Materialien ein nicht-lineares Diffusionsverhalten beobachten. [73] Nanopartikel weisen eine große Anzahl an Atomen an der Oberfläche auf gegenüber der Anzahl der Atome im Volumen, wodurch es zu einer signifikanten Reduktion der

Schmelztemperatur kommt [74]. Mathematisch beschreiben [75] die größenabhängige Sintertemperatur vom Materialschmelzpunkt durch folgende Gleichung:

$$\frac{T_{so}(r)}{T_m(\infty)} = 0,3 \exp \left[- \frac{2S_m(\infty)}{3k} \frac{1}{\left(\frac{r}{r_0}\right) - 1} \right] \quad (12)$$

$T_{so}(r)$ ist die initiale Sintertemperatur und $T_m(\infty)$ entspricht der Schmelztemperatur des Bulkmaterials. Die Schmelzentropie für Nanopartikel ist S_m , die Boltzmann-Konstante k und der Radius r_0 beschreibt den Radius, bei welchem sich alle Atome eines Nanopartikels auf der Oberfläche befinden. In Bild 21 wird die Abhängigkeit der Sintertemperatur von Silber, Nickel und Wolfram von der Partikelgröße nach Gleichung (12) aufgezeigt.

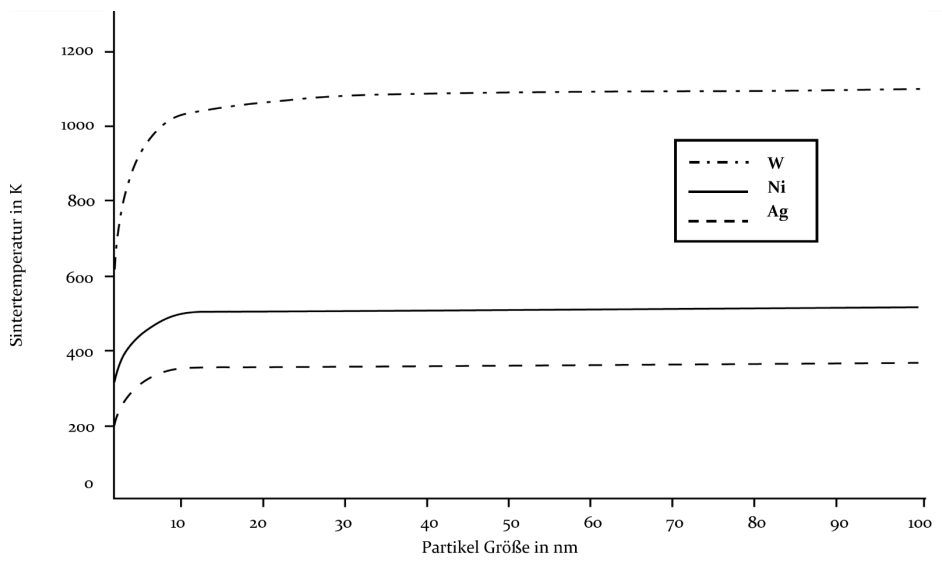


Bild 21: Theoretisch berechnete anfängliche Sintertemperatur für Wolfram-, Nickel- und Silbernanopartikel, in Anlehnung an [79]

In weiteren Arbeiten [76–78] wird nachgewiesen, dass Silbernanopartikel bei Temperaturen zwischen 150 °C – 200 °C versintern und eine relative Leitfähigkeit im Vergleich zum Bulkmaterial von 30 % – 50 % erzielen. In der Praxis wird das Verdichtungsverhalten von Nanopartikeln nicht nur durch die intrinsische Größe der Nanopartikel beeinflusst, sondern auch durch Agglomeration, Poren und Materialverarbeitung. Nanopartikuläre Pulver neigen zur Agglomerationsbildung aufgrund ihrer hohen Ober-

flächenreaktivität. Grundsätzlich ist die Bildung von Agglomerationen auf die Van-der-Waals-Kraft zurückzuführen, welche in einem schwachen Kontakt zwischen den Partikeln und somit einem losen zusammenhängenden Objekt resultiert. Prinzipiell entstehen Poren innerhalb der Agglomeration (interpartikulär) und außerhalb zwischen den einzelnen Agglomerationen (intrapartikulär). Durch das Bi-Poren-Modell wird gezeigt, dass mit größer werdenden Agglomeraten die Sintertemperatur ansteigt. Damit eine vollständige Verdichtung erreicht werden kann, ist es notwendig Pulver zu entagglomerieren oder die Bildung von Agglomeration von vornherein zu vermeiden. [79]

Besonderheiten bei Tinten- und Pastenwerkstoffen

Während sich die vorherigen Betrachtungen auf die Sinterung trockener Pulver beziehen, werden im Bereich gedruckter Elektronik funktionale Dispersionen mit nanopartikulären Füllstoffen verwendet. Je nach Einsatzgebiet und Druckverfahren besteht das flüssige Trägermedium aus Lösemitteln und Additiven, welche die Stabilität der Nanopartikel in der Tinte fördern sollen. Die metallischen Nanopartikel werden mit einem organischen Coating versehen, um eine vorzeitige Agglomeration der hochreaktiven Partikel zu verhindern. Zusätzlich sorgt die Ummantelung der Nanopartikel für eine verbesserte Haftfestigkeit auf dem Substrat, weshalb ein gewisser Anteil des Coatings nach der Sinterung in der gedruckten Struktur erhalten bleiben sollte. Der erste Schritt der Sinterung von Tintendispersionen ist somit das Ausdampfen der vorhandenen Lösemittel und das Aufbrechen des organischen Coatings. Erst im Anschluss daran findet die eigentliche Sinterung der nanopartikulären Metalle statt. Werden für bestimmte Druckverfahren, wie dem Piezo-Jet-Prozess, höherviskose Mikropartikelpasten verwendet, wird im Allgemeinen auch hier bei der Trocknung von Sinterung gesprochen. Korrekterweise handelt es sich jedoch um ein Verkleben der Mikropartikel und keinem Ausbilden sichtbarer Sinterhalse. Der erste Schritt des Verdampfens der enthaltenen Lösemittel verläuft analog zu niedrigviskosen Dispersionen. Dann jedoch finden durch die Epoxid-Matrix ein Berühren und Verkleben der Partikel statt. In Bild 22 ist der Sinterprozess von Dispersionen schematisch dargestellt. Je nach verwendeter Tinte unterscheidet sich der Sinterprozess am Anfang. Während es bei nanopartikelhaltigen Tinten zu einem Aufbrechen des organischen Coatings kommt, findet bei MOD-Tinten das Kristallwachstum statt. [81] Die Verdichtung durch das Ausbilden von Sinterhälsen ist bei beiden Tintenarten identisch.

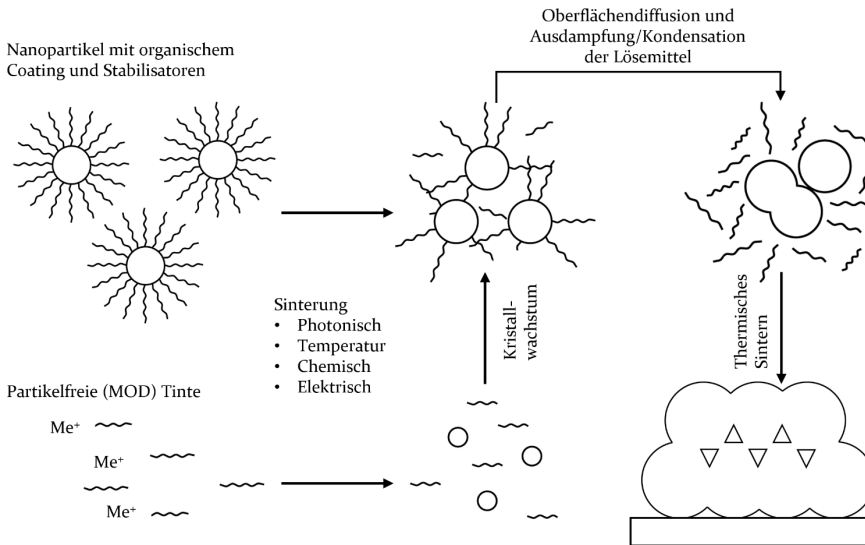


Bild 22: Schematische Darstellung des Sinterprozesses bei der Verwendung von Nanopartikeln oder partikelfreien Tinten, in Anlehnung an [80]

Konvektion als Standardsinterprozess

Die Sinterung im Ofenprozess stellt einen sehr einfachen und reproduzierbaren Prozess dar, bei welchem eine parallele Sinterung von einer fast beliebigen Anzahl an Proben möglich ist. Zur Entfernung der organischen Bestandteile und zur Erzeugung der leitfähigen Strukturen sind nach dem aktuellen Stand der Forschung Sinterzeiten im Ofen von mehr als 30 Minuten notwendig. Je nach gewünschter Leitfähigkeit und verwendetem Material erhöht sich diese auf 60 – 120 Minuten bei Temperaturen von mindestens 120 °C. Die verwendeten Durchschnittstemperaturen bewegen sich jedoch deutlich höher, zwischen 200 °C und 250 °C. Es gilt, je niedriger die Sinter-temperatur, desto länger müssen die bedruckten Substrate im Ofen verweilen, um die gewünschte Leitfähigkeit zu erreichen.

Wird beispielhaft der Einsatz der Konvektion als Sintermethode im klassischen Rolle-zu-Rolle-Prozess bei einer Bahngeschwindigkeit von 1 m/s und mit einer Sintertemperatur von 30 Minuten kalkuliert, müsste eine klassische Fertigungslinie eine Länge von 1,8 km aufweisen. [43]

Neben der Zeit spielen auch die hohen Temperaturen eine entscheidende Rolle. Standardfolien wie PET und PC besitzen eine Glasübergangstemperatur (T_g) von 120 – 148 °C, wodurch auf temperaturbeständigere Substrat-

materialien wie PI zurückgegriffen werden muss, welche deutlich kostenintensiver sind.

Nach einer detaillierten Analyse der vorhandenen Literatur zum Trocknen und Verdichten gedruckter Elektronik mittels konvektiver Ofenprozesse sowie den daraus resultierenden elektrischen Eigenschaften, sind die folgenden Punkte hervorzuheben:

- Die beim Trocknen und Verdichten auftretenden Wirkzusammenhänge sind nicht vollständig verstanden. Der Fokus liegt auf den erzielten elektrischen Leitfähigkeiten.
- Prozesszeiten von bis zu 120 Minuten sind üblich.
- Die Prozesstemperaturen liegen zwischen 120 °C und 300 °C, normalerweise jedoch über 200 °C.
- Die erreichten elektrischen Leitfähigkeiten liegen zwischen 10 % und 50 % der Leitfähigkeit von massivem Silber und sind extremen Schwankungen unterlegen.

2.4.2 Alternative Sinterverfahren

Alternative Sinterverfahren stellen einen vielversprechenden Weg dar, die Sinterzeiten und -temperaturen signifikant zu reduzieren und die Fertigung gedruckter Elektronik wirtschaftlich rentabel zu gestalten und somit ein wesentliches Hemmnis in der aktuellen Anwendung zu überwinden.

Generell lassen sich, neben der Sinterung mittels Konvektion, vier Hauptarten der alternativen Sinterung unterscheiden:

1. elektrisch
2. chemisch
3. Plasmasintern
4. photonisch/elektromagnetisch

Elektrisches Sintern

Beim elektrischen Sintern wird die gedruckte Struktur durch einen Stromfluss lokal erwärmt und die Versinterung der Partikel initiiert. Dieser Vorgang wird durch Gleichung (13) beschrieben. Q entspricht der umgesetzten Wärme in Joule, I dem Strom, R dem Gesamtwiderstand und t der Sinterzeit des elektrischen Sinterprozesses. Dabei ist zu beachten, dass sich der Gesamtwiderstand während der Sinterung verändert und zeitabhängig ist.

$$Q = I^2 R t \quad (13)$$

Durch diese lokale Erwärmung können temperaturempfindliche Substratmaterialien mit einer niedrigen Glasübergangstemperatur eingesetzt werden, ohne beschädigt zu werden. 2008 wurde in [82] das erste Mal Untersuchungen zur elektrischen Sinterung von SNP durchgeführt.

Es existieren grundsätzlich zwei verschiedene Arten von elektrischen Sinterprozessen: zum einen der berührungslose Sinterprozess, basierend auf einem elektromagnetischen Wechselfeld und zum anderen das kontaktierende, elektrische Verfahren unter Gleichspannung. [66] Das berührungslose Verfahren erfordert keinen direkten Kontakt der gedruckten Struktur mit den Elektroden. Stattdessen basiert das Wechselfeld auf beweglichen Sinter Elektroden, die sich oberhalb der Nanopartikelschicht befinden und durch ihre Anordnung ein homogenes elektrisches Wechselfeld zwischen den Elektroden generieren. Diesem Feld ist es möglich, den Elektroden spalt zu überwinden, die Nanopartikel tinte zu durchdringen und einen berührungslosen, lokalen Sinterprozess einzuleiten. Für diese Methode gibt es zwei unterschiedliche Aufbaumöglichkeiten. In beiden Fällen wird eine Elektrode mit einem Abstand von 1 mm über der Probe angebracht. Der Unterschied liegt darin, dass sich die Gegenelektrode einerseits unter dem bedruckten Substrat befindet und andererseits neben der ersten Elektrode oberhalb des Elements angebracht werden kann.

Der Aufbau des elektrischen Sinterns mit Gleichspannung unter Kontakt ist ähnlich zu der zuvor erläuterten Konstruktion. Der Unterschied liegt darin, dass die Sinter Elektroden im direkten Kontakt zur Nanopartikel schicht stehen und der Sinterprozess unter Anwendung von Gleichspannung stattfindet. [83, 84, S2] Beim berührenden Verfahren muss bereits eine Grundleitfähigkeit bestehen, welche vorab bei niedrigen Temperaturen im Ofen oder mittels einer Heizplatte bei 80 °C erzeugt wird. Der maximale Gleichstrom, welcher für die Sinterung verwendet wird, beträgt 170 mA mit einer angelegten Spannung von 100 V (U_{DC}) und einem vorgeschalteten Serienwiderstand (R_S) zur Kontrolle des maximalen Stromflusses innerhalb der Struktur mit 500 Ω . Innerhalb von 65 s wird der maximale Stromfluss erreicht und der elektrische Widerstand der Teststruktur von 11,9 k Ω auf 93 Ω gesenkt. Bei einem Stromfluss von 200 mA, welcher nach 50 s mit U_{DC} von 40 V und 100 Ω R_S erreicht wird, sinkt der elektrische Widerstand der gedruckten Leitung von 2,6 k Ω auf 40 Ω . [85]

Ein wesentlicher Nachteil des berührenden elektrischen Sinterns ist die Überhitzung der Struktur an unregelmäßigen Punkten sowie ungesinter ten Bereichen an anderen Stellen der Struktur. Ein nachträgliches

elektrisches Sintern ist nicht mehr möglich, sobald sich ein erster leitfähiger Pfad ausgebildet hat. [84]

Chemisches Sintern

Befinden sich keine Stabilisatoren oder organische Bestandteile in der Dispersion ist eine Sinterung nanopartikulärer Metalle mit einem Partikeldurchmesser < 15 nm auch bei Raumtemperatur möglich. Beim chemischen Sintern wird bewusst ein Destabilisator hinzugefügt, um polymere Stabilisatoren von der Oberfläche der Nanopartikel zu entfernen. Die einfachste Möglichkeit ist das Tauchen der gedruckten Struktur in verschiedene Alkohollösungen, wie Methanol, Ethanol oder Isopropanol für eine Dauer von bis zu zwei Stunden. [86, 87] Dodecylamin, welches sehr häufig als Stabilisator in Silbernanopartikelintinten verwendet wird, löst sich leicht in Alkoholen auf. Die ungeschützten Ag-NP folgen dann dem oben beschriebenen Sinterprozess. Mit einer Methanolbehandlung kann eine elektrische Leitfähigkeit von $0,07 - 2,2$ % rel. Bulk-Ag bei einer Tauchzeit von 60 Sekunden bis zu zwei Stunden erreicht werden. [83] Unter dem Terminus 'Bulk-Ag' wird das Vollmaterial von Silber verstanden. Der Vergleich der erreichten elektrischen Leitfähigkeit erfolgt häufig in Bezug auf das Vollmaterial.

Häufig wird neben klassischen Alkoholen auch Salzsäure (HCl) sowie Lösungen von Kochsalz (NaCl) oder Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) verwendet. Die Chloridionen ersetzen und lösen die Verankerungsgruppen des polymeren Stabilisators und ermöglichen somit deren Koaleszenz und Sinterung. [77, 88, 89] Bild 23 zeigt die schematische Darstellung von Silbernanopartikeln vor und nach dem Einsatz von Salzsäure. Links dargestellt, ist das Nanopartikel vom organischen Coating ummantelt. Nach der Anwendung von NaCl werden die Verbindungen des Coatings aufgebrochen und durch Chloridionen ersetzt. Mit der „Zweidruckmethode“, also dem Drucken der klassischen Silbernanopartikelschicht gefolgt von Druck des Destabilisators, erzielen [90] eine elektrische Leitfähigkeit von 31 % des Vollmaterials. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Salzsäuredampf. [91] Wird die gedruckte und getrocknete Struktur diesem ausgesetzt, haben [89] eine Leitfähigkeit von bis zu 41 % der Vollmaterials erreicht. Ebenso wurde bewiesen, dass eine Sinterung von bis zu $1,2$ μm dicken Strukturen möglich ist. Als Ursache hierfür wird die Porosität der Linien gesehen, welche es dem Dampf ermöglicht auch in tiefere Schichten einzudringen. [89]

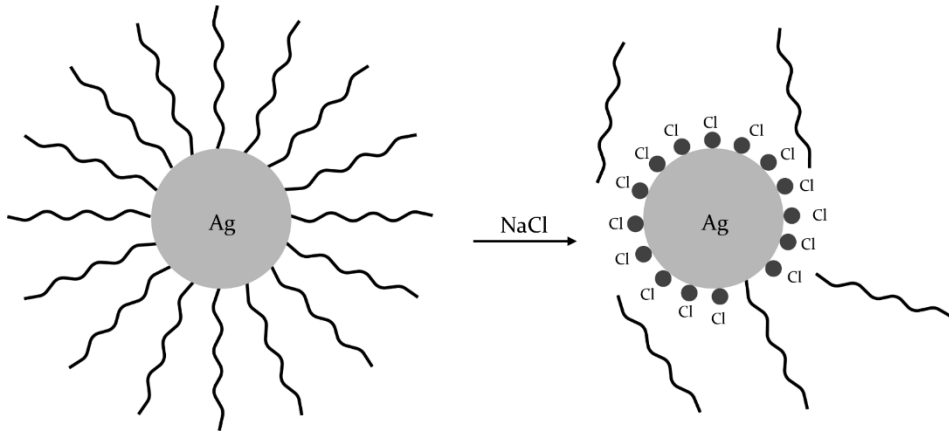


Bild 23: Schematische Darstellung von Silbernanopartikel vor (links) und nach (rechts) der Verwendung von NaCl, in Anlehnung an [88]

Plasmasintern

Eine weitere Sintermethode zur Behandlung gedruckter Strukturen auf temperaturempfindlichen Substraten ist die Verwendung von Niederdruckplasma, welche durch [92] das erste Mal auf die gedruckte Elektronik angewendet wurde. Im Rahmen des Plasmasinterns werden die organischen Stabilisatoren der Nanopartikelintens, anders als bei anderen alternativen Sinterverfahren, von oben nach unten zersetzt. [93] Aufgrund dieser Eigenschaft bildet sich an oberster Stelle der Tintenstruktur schnell eine leitfähige Krustenschicht, die das Sintern der darunter liegenden Schichten erschwert, indem es die aktivierten Teilchen des Plasmas beeinträchtigt, das Material zu durchdringen. Deshalb ist die Sinterzeit für die darunter liegende Substanz, insbesondere für die Bodenschicht, recht hoch. Bei einer zu geringen Prozesszeit kann es also zu ungesinterten Materialabschnitten kommen. Demnach ist es zwar möglich, dünne Tintensichten von wenigen 100 nm in angemessenen Zeitabschnitten zu sintern, allerdings ist die schnelle und gleichmäßige Sinterung einer mehrerer Mikrometer dicken Schicht kaum realisierbar. [94]

Das Plasmasinterergebnis ist zusätzlich abhängig von der Partikelgröße und der Art des stabilisierenden Stoffes in der Tinte sowie von den Maßen der gedruckten Struktur. [95] Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass damit großflächige Tintenschemen auch auf Substraten mit einer Glasübergangstemperatur $< 120\text{ °C}$ gesintert werden können. Als Prozessgas wird in den häufigsten Fällen Argon eingesetzt, da dieses, im Gegensatz zu beispielsweise Sauerstoff, die metallischen Tinten auf der Oberfläche nicht oxidieren lässt. [92] Bei den ersten Plasmasinterversuchen von [92] wurde ein

Argonplasma mit einer Leistung zwischen 40 bis 80 W erzeugt und auf Ink-Jet gedruckte Leitungen auf PC und PET angewendet. Vorab fand eine Trocknung bei 120 °C statt. Der erzielte spezifische Widerstand lag bei einer Größenordnung über dem theoretischen Widerstand des Vollmaterials Silber. Bei [93] konnte durch die Nutzung eines Niederdruckargonplasmas bei einer Leistung 300 W bei fünf und 60 Minuten eine elektrische Leitfähigkeit von 11 – 40 % des Vollmaterials erreicht werden. Die Prozess-temperatur hat hierbei 70 °C nicht überschritten. In späteren Arbeiten von [96] führte eine Kombination aus Plasma- und einer sich anschließenden Mikrowellensinterung zu Leitfähigkeiten von 60 % des vollverdichteten Silbers.

Photonisches und elektromagnetisches Sintern

Als photonisches Sintern wird die Sinterung metallhaltiger Tinten durch elektromagnetische Strahlung zwischen dem ultravioletten (UV) und Infrarotbereich (IR) bezeichnet. Die in der gedruckten Elektronik eingesetzten Materialien können durch ihre Absorptionseigenschaften selektiv erwärmt werden, ohne Schädigung temperaturempfindlicher Substrate. Für diese selektive Erwärmung ist ein Unterschied in den optischen Eigenschaften der Materialien notwendig. Die zu sinternden Metalle sollten in dem verwendeten Wellenlängenbereich stark absorbierend, während alle anderen Werkstoffe möglichst transparent oder reflektierend sein sollten. [83]

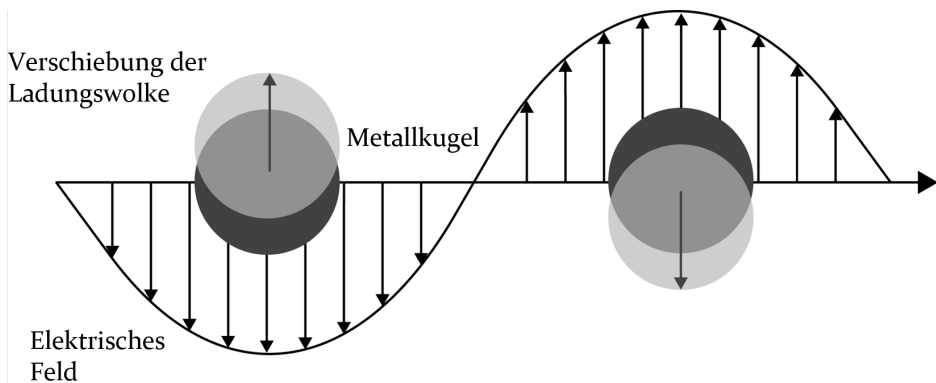


Bild 24: Schematische Darstellung von Schwingungen der Leitungselektronen im elektrischen Feld, in Anlehnung an [98]

Metall-NP zeigen im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums intensive Oberflächenplasmonenresonanzbande, die für die lokale Erwärmung genutzt werden. Wird ein kugelförmiges Metallnanopartikel mit Licht bestrahlt, regt das oszillierende elektrische Feld die Leitungs-

elektronen zu kohärenten Schwingungen an, was schematisch in Bild 24 dargestellt ist. [97, 98] Durch die Schwingungen findet eine Umwandlung von elektromagnetischer Energie in thermische Energie statt. Die entstehende Wärme diffundiert von einzelnen Nanopartikeln weg und führt zu einer Erhöhung der Temperatur des umgebenden Mediums. [99] In Abhängigkeit von der verwendeten Wellenlänge wird zwischen der Laser-, UV-, NIR- und Mikrowellensinterung unterschieden.

UV-Sinterung

Die Sinterung von Silbernanopartikelintinten mit UV-Licht als Alternative zum Ofenprozess wurde von [100] als auch von [101] untersucht. Während Kupferpartikel ihr Absorptionsmaximum bei 600 nm aufweisen, liegt das Absorptionsmaximum bei Silbernanopartikelintinten mit Partikeldurchmessern < 50 nm zwischen 380 nm und 420 nm. [102] Für die UV-Sinterversuche sind LEDs mit einer konstanten Wellenlänge von 395 nm verwendet worden. Nach 30 Sekunden Bestrahlung wurde eine elektrische Leitfähigkeit von 2,1 MS/m erreicht, was etwa 3 % des Vollmaterials entspricht. Bei der Verwendung einer UV-Quelle mit einem Spektrum zwischen 200 nm und 400 nm und einer Leistung von 80 W/cm werden nach 10 bis 80 Sekunden Leitfähigkeitswerte zwischen 11,4 MS/m und 15,4 MS/m erreicht. Bisher sind in der Forschung Versuche zur UV-Sinterung trotz erster sehr vielversprechender Ergebnisse bisher nur marginal betrachtet worden.

Xe-Blitzlicht

Ein weiteres Verfahren im Bereich der Sinterverfahren, welches seit 2008 von der Firma NovaCentrix vorangetrieben wird, ist das Xenon-Blitzlichtsintern. Durch die Verwendung von Xe-Strahlern zwischen 200 nm bis 1000 nm, welche auf das Substrat angepasst werden, sind Pulsraten bis über 1000 Hz möglich. Bei Kupfertinten werden Leitfähigkeiten von 10 % der Bulk-Leitfähigkeit erreicht, bei Silbernanopartikelintinten sogar bis zu 50 %. Die Simulation des Temperaturprofils zeigt, dass die Aufheiz- und Abkühlungszeiten weniger als 2 ms betragen. Nach 200 μ s wird eine Temperatur von 600 °C in der Silberschicht berechnet, welche für ca. 800 μ s erhalten bleibt. [66] Vor allem bei dieser Sintermethodik tritt das Problem der Riss- und Blasenbildung sowie der Schichtbildung in den Vordergrund, was auf den enorm hohen Energieeintrag innerhalb weniger Millisekunden zurückzuführen ist. [103, 104]

Laser-Sinterung

Die Verwendung unterschiedlicher Wellenlängen von NUV bis NIR (405 nm Diodenlaser, 514,5 nm grüner Argon-Ionen-Laser und 817 nm

Diodenlaser) für die gedruckte Elektronik ist forschungsseitig in verschiedenen Studien untersucht worden. Die optische Eindringtiefe für NUV und einem grünen Laser sind mit 28,3 nm und 43,4 nm deutlich geringer als die applizierte Silberschicht mit ca. 170 nm. Durch die schnelle und direkte Absorption des Laserlichts, wird die oberste Schicht gesintert. Als Folge dessen steigt das Reflexionsvermögen schlagartig an und die absorbierte Laserlichtenergie nimmt rapide ab. Darunterliegende Nanopartikelschichten werden durch die vertikale Wärmediffusion nur teilweise gesintert. Einzig der NIR-Diodenlaser mit einer Eindringtiefe von 171 nm erreicht eine volumetrische Durchstrahlung der gesamten Struktur. Die Unterschiede der Wärmeleitmechanismen und der entstehenden Temperaturfelder resultieren in erheblichen Abweichungen der Oberflächenmorphologien, während die erzielten elektrischen Leitfähigkeiten ähnlich sind.

Mit dem NUV-Diodenlaser wird eine elektrische Leitfähigkeit von 17,6 MS/m erreicht, der grüne Laser erzielt 18,9 MS/m und der NIR-Diodenlaser 11,2 MS/m. [105] In weiteren Studien von [106] ist ein Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 408 nm verwendet und mit Abtastgeschwindigkeiten zwischen 4 mm/s und 14 mm/s variiert worden. Die maximale erzielte elektrische Leitfähigkeit beträgt 7,7 MS/m. In Versuchen von [107, 108] sind mit einem Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 532 nm und durch die Variation der Laserleistung sowie Verfahrensgeschwindigkeit eine elektrische Leitfähigkeit von 15,1 MS/m erreicht worden. Im Jahr 2014 erreichte [102] mit einem 808 nm Laser und einer Leistung von 38 W bei einer Scangeschwindigkeit von 80 mm/s eine elektrische Leitfähigkeit von 21,7 MS/m.

Bei allen durchgeführten Versuchen lag der Fokus auf der Evaluierung der erzielten elektrischen Leitfähigkeit. Die optischen Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie und Haftfestigkeitsuntersuchungen zeigten grundsätzlich eine durchgängig starke Porosität und Haftfestigkeitsproblematik.

Infrarot-Sinterung

Das Infrarot (IR) ($3\ \mu\text{m} - 50\ \mu\text{m}$) und Nahinfrarot (NIR)-Sintern ($780\ \text{nm} - 3000\ \text{nm}$) hat sich in den letzten Jahren zur vielversprechenden Sinterart für gedruckte Elektronik entwickelt, wobei der Schwerpunkt auf dem NIR-Spektrum liegt. Dabei werden Systeme mit einer Wellenlänge zwischen 800 nm und 1200 nm verwendet, bei Leistungen der Emitter von 1,8 kW bis 3,5 kW. Die erzielten elektrischen Leitfähigkeiten bewegen sich zwischen 2,4 MS/m und 35 MS/m. [109, 110] Die deutlichen Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeiten sind auf die unterschiedlichen Substrate, Tinten,

Systemeinstellungen, Verweildauer und das Messverfahren zurückzuführen. In einer Studie von [111] wurde mittleres Infrarot im Wellenlängenbereich von 8 μm bis 15 μm verwendet und erzielte damit eine elektrische Leitfähigkeit von 1,25 MS/m. [112] untersuchten in ihren Experimenten das Infrarotsintern von gedruckten Silber- und Goldnanopartikelintinten auf Glas und Papier. Für die Versuche wurde eine Infrarotlampe mit einer Gesamtleistung von 500 W und einem Intensitätspeak bei einer Wellenlänge von 4 μm verwendet. Nach 10 s Bestrahlzeit erreichte die elektrische Leitfähigkeit einen Wert von 16,6 MS/m auf Papier und 33,3 MS/m nach 5 Minuten auf Glas.

Mikrowellensinterung

Mikrowellenerwärmung wird schon lange in der synthetischen Chemie und zur Sinterung dielektrischer Materialien eingesetzt, da es eine gleichmäßige, schnelle und volumetrische Erwärmung ermöglicht. Auch Metalle können durch Mikrowellenstrahlung gesintert werden, welche jedoch hinsichtlich der Eindringtiefe limitiert ist. Die Eindringtiefe bei 2,5 GHz für Silber, Gold und Kupfer variiert zwischen 1,3 μm und 1,6 μm . Folglich müssen die Abmessungen der zur sinternden Struktur in der gleichen Größenordnung liegen, wie die Eindringtiefe, um eine durchgängige Sinterung zu erzielen. [113] In ersten Mikrowellenversuchen werden von [113] Ink-Jet gedruckte Strukturen mit einer Schickdicke von 4,1 μm in einer Mikrowelle mit konstanter Leistung von 300 W behandelt. Vorab wurde die bedruckte PI-Folie auf 150 °C erwärmt, um eine hohe Druckqualität zu erzielen. Innerhalb von 240 s wurde eine elektrische Leitfähigkeit von 3,3 MS/m erzielt, was 5 % des Vollmaterials entspricht. In weiteren Versuchen von [114] wurde die Mikrowellenblitzsinterung als sekundärer Sinterprozess nach dem Xenon-Blitzlichtsintern verwendet. Die gedruckten Strukturen wurden jeweils für 1 s bei 1 W behandelt. Die erzielten Leitfähigkeitswerte lagen bei 35 – 40 % relativ Bulk-Ag.

Photonische Sinterverfahren erweisen sich, unabhängig von der Auswahl der Bestrahlungsquelle, als die erfolgversprechendsten unter allen alternativen Sinterverfahren.

2.5 Handlungsfelder zur Sinterung und Charakterisierung der gedruckten Elektronik

Der Post-Prozess der Trocknung und Sinterung sowie die nachfolgende Charakterisierung gelten oft als Flaschenhals der gedruckten Elektronik und sind entscheidende Hemmnisse für die Ausschöpfung des vollen

Potenzials dieser Technologie. Hieraus lassen sich zwei konkrete Handlungsbedarfe in den folgenden Bereichen ableiten.

Evaluierung von photonischen Sinterverfahren

Die Reduktion der Sintertemperatur und Sinterzeit steht in den letzten Jahren im Fokus der Forschung hinsichtlich der Entwicklung neuer Materialien, aber auch dem Einsatz alternativer Sinterverfahren. Eine direkte Vergleichbarkeit der erreichten Ergebnisse ist kaum möglich, was es potenziellen Anwendern unmöglich macht, das am besten geeignete Verfahren für ihre Anwendung zu bestimmen. So erschwert die große Anzahl an Tinten, welche neben der verwendeten Metallart noch unterschiedliche Partikelgrößen und -formen, Lösemittel und Stabilisatoren aufweisen und die Verwendung diverser Substratmaterialien noch einmal deutlich den Vergleich aktueller Forschungsergebnisse in Hinblick auf die bestmöglichen Sinterprozesse. Die Anwendung alternativer Sinterverfahren für Aerosol-Jet gedruckte Strukturen hat in der Literatur bisher keine Beachtung gefunden, da der Fokus auf dem vergleichsweise einfachen Ink-Jet-Druckprozess gelegen hat.

Aus dieser Sachlage geht der dringende Bedarf an übertragbaren Erkenntnissen alternativer photonischer Sinterverfahren für die Anwendung auf das Aerosol-Jet-Verfahren hervor. Zusätzlich bedarf es der Entwicklung einer stabilen Prozesstechnik und Verfahrensempfehlung für zukünftige Anwender, um dem Spannungsfeld aus Kosten, Zeit und Qualität entgegenzuwirken. Schwerpunkt liegt auf der Verwendung von Nahinfrarot (NIR) und ultraviolettem (UV-) Licht und der Verwendung klassischer Niedertemperatursubstratmaterialien.

Durch eine konsistente Vorgehensweise und eine einheitliche Geometrie gedruckter Strukturen soll der Themenkomplex Verdichtung gesamtheitlich besser verstanden werden und eine deutlich fundiertere Abschätzung zum Einsatzpotenzial der Verfahren durchgeführt werden.

Entwicklung und Evaluierung einer elektrischen Charakterisierungsmethode

Das Sinterergebnis unterliegt vielfältigen Einflüssen, beginnend mit der Druckqualität über der geeigneten Materialauswahl und -kombination. Weiterhin spielen externe Einflüsse wie Verschmutzungen, aber auch die Verwendung unterschiedlicher Messverfahren zur genauen Analyse und Sicherstellung der Qualität der Sinterung eine entscheidende Rolle.

Tabelle 4 zeigt in zusammengefasster Form die wesentlichen Sinterverfahren für gedruckte Elektronik. Es geht deutlich hervor, dass die Sinterzeiten

und erzielten elektrischen Leitfähigkeiten erheblichen Schwankungen unterliegen. Dies ist nicht nur auf die unterschiedlich eingesetzten Substratmaterialien, Silbernanopartikelintinten, Druck- und Sinterverfahren sowie deren Parametereinstellungen zurückzuführen, sondern zusätzlich auch auf die verwendeten Charakterisierungsmethoden zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit.

Bei allen hier aufgezeigten Forschungsarbeiten wurde die Leitfähigkeit mittels Zwei- oder Vierpunktmethode und bei Gleichstrom ermittelt. Ein wesentlicher Nachteil der Zweipunktmethode ist das Mitmessen der Kontaktwiderstände, welche das Messergebnis stark verfälschen. Bei der Vierpunktmethode werden die Kontaktwiderstände eliminiert und in der Regel Gleichung (14) zur Auswertung verwendet.

$$\sigma = \frac{l}{R \cdot A_L} \quad (14)$$

Die elektrische Leitfähigkeit σ berechnet sich somit aus der Länge l zwischen den spannungsmessenden Kontaktstiften, dem Widerstand R und dem Leiterquerschnitt A_L .

Die Querschnittsfläche, die optisch in der Regel mittels eines Lasermikroskops ermittelt wird, unterliegt oft Schwankungen und wird in erster Linie aus Mittelwerten mehrerer Messungen gebildet. Die berechnete elektrische Leitfähigkeit ist somit immer eine Mittelung über den gesamten Querschnitt der gedruckten Struktur und gibt keinen Hinweis darauf, wie die Sinterung innerhalb der gedruckten Struktur aussieht. So ist das häufig bei photonischen Sinterverfahren auftauchende Problem der reinen Oberflächensinterung nicht sichtbar. Die daraus resultierenden Haftfestigkeits- und Zuverlässigkeitsprobleme stehen oft im Widerspruch zu einer hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit. Um eine valide Charakterisierung zu ermöglichen, bedarf es der Entwicklung eines neuen elektrischen und nichtzerstörenden Charakterisierungsverfahrens, welches es erlaubt, eine gezielte Aussage über die Qualität der Sinterung gedruckter Strukturen zu treffen. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse ist es von zentraler Bedeutung, dass der Transfer der Messmethode auch auf andere leitfähige Dünnschichtproblematiken erfolgt, um einen potenziellen Einsatz in der Praxis zu verifizieren und neue Potenziale zu identifizieren.

Tabelle 4: Vergleich der bekannten alternativen Sintermethoden für die Verdichtung gedruckter Elektronik

| Sintertechnologievergleich für gedruckte Elektronik | | | | | | |
|--|---------------------|--|-------------------------------|---------------------|---------------|---------------------|
| Sintermethode | Prozessdauer | Elektrische Leitfähigkeit in MS/m | Gleichmäßige Sinterung | 3D-Fähigkeit | Kosten | Wärmeeintrag |
| Konvektion | 30 – 120 Minuten | 1 – 35 | ja | bedingt | niedrig | hoch |
| Elektrisch | 5 – 65 Sekunden | 0 – 4 | nein | ja | niedrig | hoch |
| Chemisch | 0 – 2 Stunden | 0 – 20 | bedingt | bedingt | niedrig | niedrig |
| Plasma | 5 – 60 Minuten | 7 – 26 | bedingt | ja | hoch | niedrig |
| UV | 10 – 80 Sekunden | 2 – 15 | ja | bedingt | niedrig | mittel |
| Xe-Blitzlicht | < 2 Millisekunden | 0 – 17 | nein | nein | hoch | sehr hoch |
| Laser | < 5 Minuten | 7 – 21 | nein | ja | hoch | sehr hoch |
| Mikrowelle | 0 – 240 Sekunden | 0,5 – 3 | bedingt | bedingt | hoch | mittel |
| Infrarot | 2 – 10 Sekunden | 1 – 33 | ja | ja | niedrig | hoch |

3 Qualifizierung von NIR und UV zur alternativen photonischen Sinterung gedruckter Elektronik

Im Handlungsfeld der alternativen photonischen Sinterverfahren konzentrieren sich die Forschungsarbeiten zunächst auf die systematische Analyse der signifikanten Einflussgrößen auf das Sinterergebnis. Darauf aufbauend werden Nahinfrarot- und Ultraviolettstrahlung als alternative Sinterverfahren für die gedruckte Elektronik detailliert untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für Aerosol-Jet gedruckte Proben evaluiert. Auf Grundlage der Forschungsergebnisse werden abschließend Empfehlungen zur Sinterzeit und -temperatur abgeleitet.

3.1 Signifikante Einflussgrößen auf das Sinterergebnis

Im folgenden Abschnitt soll auf die signifikanten Einflussgrößen auf das Sinterergebnis eingegangen werden. Als Kenngrößen dienen zur Bewertung der Sinterung die elektrische Leitfähigkeit sowie mechanische Eigenschaften, wie Haftfestigkeit und Riss- und Blasenbildung. Anhand zweier Ishikawa-Diagramme in Bild 25 werden die Ursache-Wirkung-Beziehungen dargestellt. Die in Fettschrift dargestellten Einflussgrößen sind aus prozesstechnischer Sicht im verwendeten Messaufbau nicht oder kaum beeinflussbar. Die in Normalschrift aufgezeigten Einflussfaktoren sind generell beherrschbar. Vor der analytischen Betrachtung der Versuchsergebnisse in Kapitel 3 und der Modellerstellung und Erprobung in Kapitel 4 und Kapitel 5 findet eine kurze Zusammenfassung der 5M statt.

Ergänzend zur Kenntnis der Einflussgrößen auf die Qualität des Sinterergebnisses ist ein hinreichendes Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Aerosol-Jet-Prozess und Sinterergebnis sowie die Stärke wirkender Effekte auf die Sinterung von entscheidender Bedeutung. Als Grundlage für eine stabile Produktion sind sowohl die Identifizierung der qualitätsbestimmenden Kenngrößen als auch die Festlegung der Grenzwerte unabdingbar. Hierfür sind übertragbare Ergebnisse aus gezielten und konsistenten Untersuchungen, welche die Besonderheiten Aerosol-Jet gedruckter Strukturen berücksichtigen, eine wichtige Voraussetzung.

3 Qualifizierung von NIR und UV zur alternativen photonischen Sinterung gedruckter Elektronik

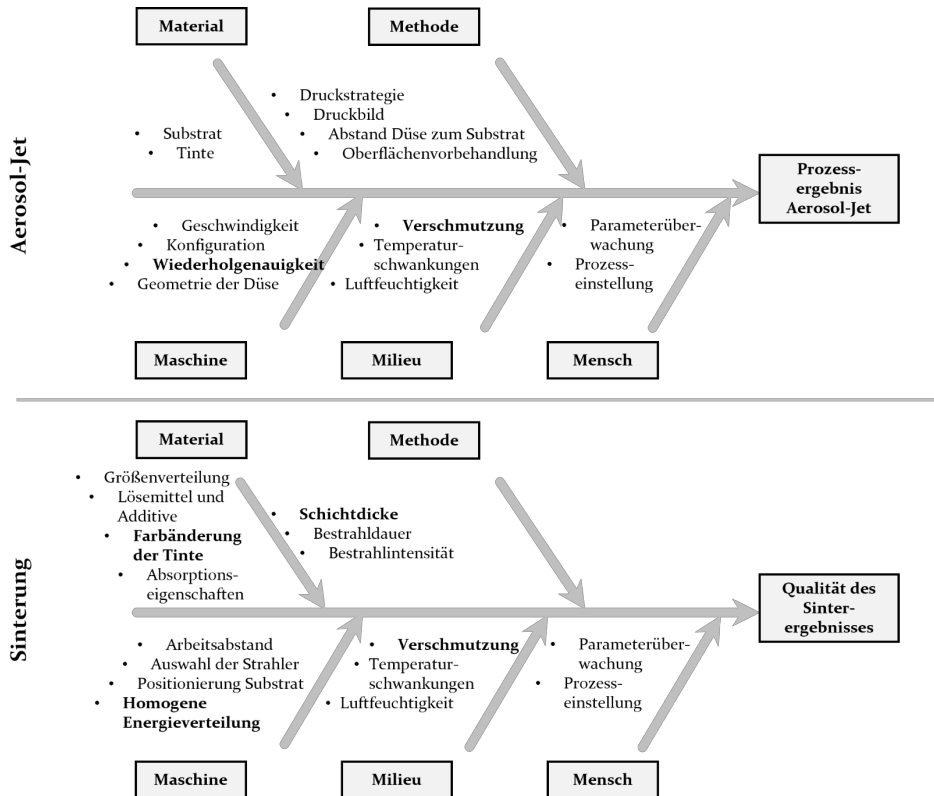


Bild 25: Ishikawa-Diagramme der wichtigsten Einflussgrößen auf das Aerosol-Jet Prozessergebnis (oben) und das Sinterergebnis (unten)

3.1.1 Material

Wie bereits im Vorfeld erläutert, kann die Zusammensetzung der verwendeten Drucktinte aus unterschiedlichen Lösemitteln und Metallpartikeln bestehen. Hier soll speziell noch einmal auf die maßgeblich am Sinterprozess beteiligten Faktoren eingegangen werden. Zum besseren Prozessverständnis werden beginnend die auf den Sinterprozess indirekt wirkenden Einflussparameter des Aerosol-Jet-Prozesses aufgezeigt.

Aerosol-Jet

Für ein optimales Druckergebnis im vorgelagerten Aerosol-Jet-Prozess, spielt die Oberflächenrauheit sowie Oberflächenenergie der verwendeten Substrate eine wesentliche Rolle. Ebenso muss auf die richtige Viskosität der Tinte und deren Bestandteile geachtet werden, um eine ausreichende

Zerstäubung und somit Druckqualität, welche entscheidend für ein gutes Sinterergebnis ist, zu erzielen.

Sinterung

Vor allem für photonische Sinterverfahren spielt die Größenverteilung der Partikel eine entscheidende Rolle hinsichtlich des Absorptionsverhaltens. So verschiebt sich das Absorptionsmaximum um den theoretischen Wert von 420 nm und stellt die Auswahl der richtigen Strahler vor eine Herausforderung. Auch eine Farbänderung der gedruckten Struktur während des Sinterprozesses von einem dunklen grau hin zum silbrigen Farbton ändert die Reflexionseigenschaften kontinuierlich, was eine ständige prozesstechnische Anpassung der Parameter voraussetzen würde.

Ein weiterer Faktor ist die Auswahl der Lösemittel und Additive und deren maximale Verdampfungsrate, welche auf die Glasübergangstemperatur des Substrats angepasst werden muss, ebenso wie die Oberflächenspannung zur Erzeugung eines homogenen Druckbilds. Neben der Auswahl der Tintenwerkstoffe spielen die verwendeten Absorptionseigenschaften des Substrats eine wesentliche Rolle bei der Sinterung. Bei einem hohen Absorptionsgrad findet neben der direkten Sinterung der Tinte (aufgrund von deren Absorptionseigenschaften) auch eine indirekte Erwärmung durch das Substrat statt. Hier gilt zu beachten, dass die indirekt erzeugte Erwärmung nicht zu hoch sein darf, um das temperaturempfindliche Substrat nicht zu beschädigen.

3.1.2 Methode

Der vorhergehende Druckprozess, bezogen auf die erzielbare Schichtdicke und deren Homogenität sowie die Auswahl des Druckbildes und die Druckstrategie, hat die stärksten Auswirkungen auf die Qualität des Sinterergebnisses.

Aerosol-Jet

Ungleichmäßige Schichtdicken, die vor allem auf schwankende Gasströme beim Aerosol-Jet-Prozess zurückzuführen sind, können durch eine regelmäßige Reinigung des Systems (Empfehlung alle 2 h Stunden) minimiert, jedoch nicht vollständig eliminiert werden. Besonders beim Drucken von Flächen, ist die gewählte Druckstrategie ausschlaggebend für homogene Schichtdicken. Werden Flächen von außen nach innen gedruckt, führt dies zu einer Materialansammlung in der Mitte der gedruckten Fläche aufgrund des zeitverzögernden Shutterprozesses am Düsenausgang. Dieser oft nur minimale Unterschied ($< 1 \mu\text{m}$) führt im anschließenden Sinterprozess zu

Hotspotbildung und unregelmäßiger Sinterung. Wird die Druckstrategie bei Flächen umgedreht und von innen nach außen gedruckt, tritt aufgrund des Sheath Gas ein Verblasen des Materials auf, was das Druckbild ebenfalls negativ beeinflussen kann. Der dadurch entstehende Overspray hat keinen direkten Einfluss auf das Sinterergebnis, beeinträchtigt je nach Anwendung aber generell die Funktionalität der gedruckten Struktur.

Sinterung

Wird der Fokus auf das Sintern mit UV- und Nahinfrarot gelegt, haben die Auswahl der Bestrahlungsdauer (kontinuierlich oder mehrmalige kurze Bestrahlzeiten) einen wesentlichen Einfluss auf das Sinterergebnis. Auch die Bestrahlungsintensität zwischen 0 – 100 % wirkt sich ebenso auf die Sinterung aus wie die Auswahl der richtigen Wellenlänge und Bestrahlleistung.

3.1.3 Maschine

Neben den direkten Maschinenparametern der Sinterquellen beeinflussen ebenfalls die Parametereinstellung und Maschineneinflussgrößen im zuvor stattfindenden Druckprozess das Sinterergebnis maßgeblich.

Aerosol-Jet

Die wesentlichen Einflussfaktoren beim Aerosol-Jet stellen die Konfiguration und Regelung der Prozessparameter, die Geometrie und Durchmesser der Düse sowie etwaige Leckagen im System dar. Während die Geometrie und Durchmesser der Düse mit gezielten vorgelagerten Versuchen eindeutig festgelegt werden kann, ist die Konfiguration der Prozessparameter aufgrund des notwendigen mehrmaligen Nachregelns und der Einbeziehung sämtlicher Umgebungseigenschaften schwieriger zu beherrschen. All diese Parameter haben einen direkten Einfluss auf die Qualität der gedruckten Struktur und somit indirekt auf das Sinterergebnis.

Sinterung

Der Arbeitsabstand zwischen Substrat und Bestrahlquelle hat einen wesentlichen Einfluss auf das Sinterergebnis. Ein zu hoher Abstand sorgt für eine gleichmäßige Bestrahlung des gesamten Druckbildes, minimiert jedoch gleichzeitig die eingebrachte Flächenenergie, da diese aufgrund der Konstruktion des Strahlers in den Randbereichen abnimmt. Ist der Arbeitsabstand zu gering, ist der Energieeintrag hoch, jedoch aufgrund des Einfallwinkels der Strahler ungleichmäßig auf der Struktur verteilt. Hier bedarf es eines Mittelwegs, welcher je nach ausgewähltem Druckbild und der

Kombination von Substrat und Tinten experimentell angepasst werden muss.

3.1.4 Milieu

Die Einflussgrößen der Umgebung auf den Aerosol-Jet-Prozess und den Sinterprozess gehören zu den am schwierigsten beherrschbaren Größen.

Aerosol-Jet

Temperaturschwankungen von wenigen Grad Celsius, wie sie auch in klimatisierten Räumen vorkommen, beeinflussen wesentlich die notwendige Gasparametereinstellung des Druckprozesses. Direkte Sonneneinstrahlung auf die verwendete Anlage und Materialien sollte vermieden werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Verunreinigungen durch Staub innerhalb oder auf der gedruckten Struktur vermindern deutlich die Qualität der Proben und haben einen wesentlichen Einfluss auf den Sinterprozess.

Sinterung

Verunreinigungen durch Staub innerhalb der gedruckten Struktur während des Druckprozesses beeinflussen das Sinterergebnis vor allem hinsichtlich mechanischer Eigenschaften. Eingeschlossene Staubkörner führen häufig zu Riss- und Blasenbildungen während des Sinterprozesses. Lange Laufwege zwischen der Druckanlage und der Sinteranlage sollten vermieden werden. Obwohl eine Sinterung direkt in der Druckmaschine die Qualität erhöhen kann, gestaltet sich dies aufgrund der Strahlergröße oder notweniger Sicherheitsvorschriften oft als schwierig umsetzbar.

3.1.5 Mensch

Der Faktor Mensch hat auf empfindliche Prozesse einen wesentlichen Einfluss.

Aerosol-Jet

Wie bereits ausführlich erläutert, gibt es eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf den Aerosol-Jet-Prozess. Der Bediener der Anlage muss zeitnah auf sich verändernde Parameter durch eine Nachregelung der Gasströme reagieren, um ein gleichmäßiges Druckbild zu erreichen. Diese Reaktionen, welche oft innerhalb weniger Sekunden notwendig sind, erfordern eine hohe Expertise auf diesem Gebiet. Das Tragen von Handschuhen und eine

Reinigung des Substrats zum Entfernen von Schmutz und Staub ist unumgänglich.

Sinterung

Ebenso wie beim Aerosol-Jet-Prozess ist der Bediener für die Überwachung des Sinterprozesses verantwortlich. Je nach Druckbild und Druckqualität sowie Substrateigenschaften ist eine Anpassung der vielfältigen Parameter-einstellungen notwendig, was eine große Herausforderung darstellt und eine hohe Expertise auf diesem Gebiet verlangt. Um den Grad der Sauberkeit zu erhöhen und zu einem besseren Sinterergebnis beizutragen, ist das Tragen von Handschuhen unerlässlich um Fettabdrücke, welche die Absorptionseigenschaften der Strukturen verändern, zu vermeiden.

3.2 Evaluierung von photonischen Sinterverfahren für Aerosol-Jet gedruckte Strukturen

Die im folgenden Kapitel vorgestellten Ergebnisse stammen aus zwei Forschungsprojekten die in enger Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Nürnberg, dem Bayerischen Laserzentrum und dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik generiert wurden.

Der vorgestellte Lösungsansatz beruht auf der steigenden Nachfrage der industriellen Einsetzbarkeit der gedruckten Elektronik sowie auf fehlenden Kenntnissen hinsichtlich photonischer Sinterverfahren für Aerosol-Jet gedruckte Strukturen. Für die Versuche werden die häufig für dreidimensionale Schaltungsträger eingesetzten Substrate aus Polyamid 6 (PA 6) und Liquid Crystal Polymer (LCP) mit Plasma vorbehandelt. Die vorbehandelten Proben weisen eine hohe Oberflächenenergie auf und erhöhen somit die Benetzbarkeit der Oberfläche. Die Aerosol-Jet gedruckten Strukturen werden im Anschluss mit NIR- und UV-Strahlung getrocknet und verdichtet. Die erzeugten leitfähigen Bahnen können für jegliche dreidimensionale Anwendungen zur Signalübertragung genutzt werden.

3.2.1 Das Aerosol-Jet-Verfahren zur Herstellung gedruckter Elektronik

Wie bereits in der Analyse der alternativen Sinterverfahren in 2.4.2 festgestellt, beziehen sich die veröffentlichten Forschungsergebnisse ausschließlich auf mit dem Ink-Jet-Verfahren hergestellte Proben. Das Aerosol-Jet-Verfahren und darauf angewendete neue Sintermethoden werden im

aktuellen Stand der Forschung nicht weiter untersucht, weshalb dies als Teil dieser Arbeit geschehen ist.

Substratvorbehandlung

Für die Optimierung der Benetzbarkeit der Oberfläche und somit auch indirekt der Haftfestigkeit gedruckter Elektronik ist ein Verständnis der Wechselwirkung Flüssigkeit auf Festkörper für die hier durchgeführten Forschungsarbeiten notwendig.

Zur gezielten Erhöhung der Benetzbarkeit werden die Substrate mittels eines Stickstoffplasmas vorbehandelt und die erzielte Oberflächenenergie mit der OWRK-Methode berechnet. In einer Versuchsreihe wurde die Plasmavorbehandlung auf die verwendeten Substrate PA6 und LCP angewendet. Glas wurde als Vergleichssubstratmaterial mit idealer Oberfläche herangezogen. Das hierfür erstellte Programm ermöglicht eine gleichmäßige und reproduzierbare Vorbehandlung der Oberflächen. Hierfür wird die Plasmadüse mit einer Geschwindigkeit von 900 mm/s und einem Abstand von 60 mm kontinuierlich in einer Mäanderform über das Substrat verfahren. Die verwendeten Parameter sind anhand der vorab definierten Voraussetzungen keine Schädigung des Substrates und Messbarkeit der Kontaktwinkel in diversen Vorversuchen gewählt worden. In Bild 26 ist eine Aufnahme (links) während der realen Plasmavorbehandlung von LCP gezeigt. Auf der rechten Seite ist schematisch der Verfahrensweg der Plasmadüse auf dem Substrat abgebildet.

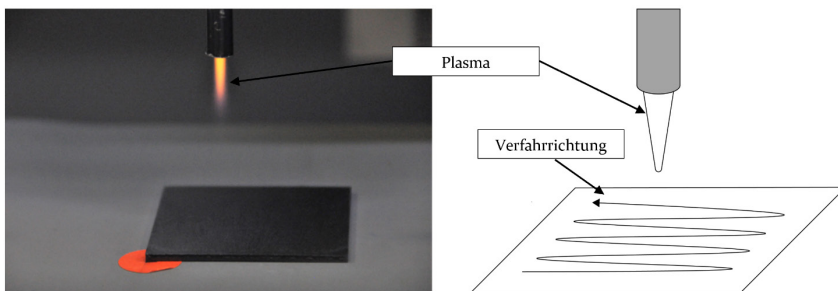


Bild 26: Aufnahme der Plasmavorbehandlung (links) und schematische Darstellung des Verfahrensweges auf dem Substrat (rechts)

Zur Bestimmung der veränderten Oberflächenenergie wird deionisiertes Wasser, Glycerin und Formamid verwendet. Wenige Sekunden nach der Plasmabehandlung wird mit dem Messgerät PGX+ Pocket Goniometer der Firma Gardco die erzielten Kontaktwinkel gemessen. Bild 27 zeigt die

exemplarische Aufnahme der Tropfenausbildung über den Zeitverlauf von Glycerin auf PA6.

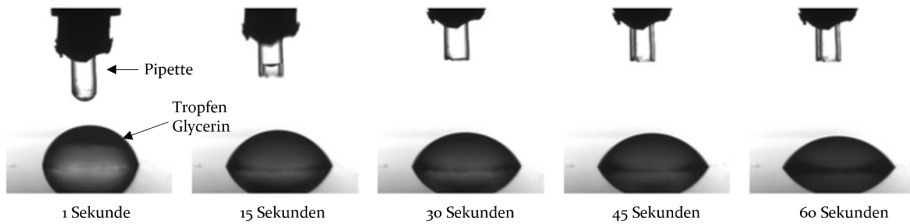


Bild 27: Aufnahme der Tropfenausbildung in Abhängigkeit der Zeit von Glycerin auf PA6

Für LCP ergibt sich nach den durchgeführten Berechnungen eine Oberflächenenergie von 65,5 mN/m und 62,4 mN/m für PA 6. Im Vergleich zu unbehandelten Substraten wurde eine Erhöhung der Oberflächenenergie von über 90 % erreicht. Oberhalb dieses Schwellwerts würde eine Steigerung der Oberflächenenergie zu unerwünschten Nebeneffekten führen. Durch die stärkere Benetzbarkeit kommt es zu einem Verfließen der Leiterbahnen (Abweichung um mehr als 10 %), welche vor allem beim Einsatz in der Hochfrequenztechnik zwangsläufig zu einer Beeinflussung der Übertragungsparameter führt. [P1, S3, S4]

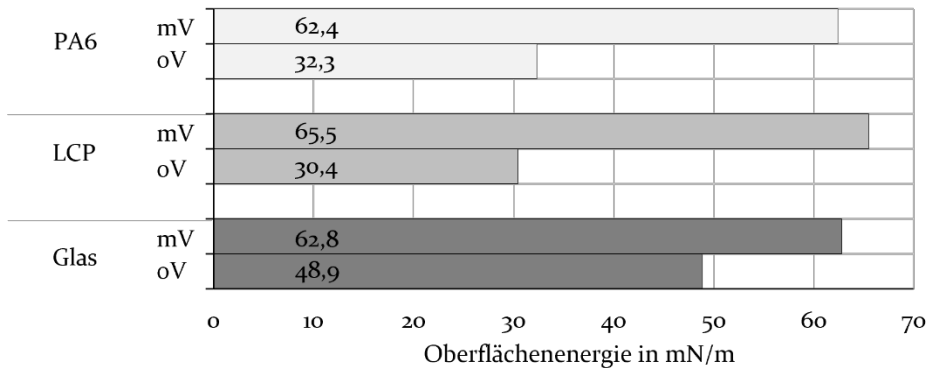


Bild 28: Messergebnisse der Oberflächenenergieanalyse von LCP, PA6 und Glas mit (mV) und ohne (oV) Plasmavorbereitung

Tintenanalyse

Da das verwendete Druckmedium einen signifikanten Einfluss auf die Parameterauswahl der Sinterverfahren sowie das Sinterergebnis hat, wurde eine genaue Analyse der in den Forschungsarbeiten verwendeten

Silbernanopartikel-tinte Paru 007 und Clariant TPS 50 durchgeführt. Die thermischen Eigenschaften werden mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) bestimmt. Die flüssige Tinte wird bei diesem Messverfahren bei Raumtemperatur (Ausgangszustand) in einer definierten Umgebung (20,5 Vol.-% Sauerstoff, synthetische Luft 79,5 Vol.-%, Durchflussrate 23 ml/min) mit einer Heizrate von 5 K/min auf 475 °C erhitzt. Das Probengewicht wird als Funktion der Temperatur und Zeit aufgezeichnet, wodurch die Temperatur der maximalen Verdampfungsrate ermittelt werden kann. Mit Hilfe dieser Erkenntnis ist es möglich, eine Einschätzung der notwendigen Temperatur zum Austreiben der enthaltenen Lösemittel beim Sinterprozess zu treffen.

In Bild 29 ist das Ergebnis der TGA für Paru 007 dargestellt. Die schwarze Kurve gibt die Masse in Prozent als Funktion der Temperatur (rot gestrichelte Linie) und Zeit an. Die graue Kurve stellt die Ableitung der schwarzen Kurve dar und gibt den Masseverlust in Prozent pro Minute an. Das Minimum der grauen Kurve gibt somit die maximale Verdampfungsrate zu einem gewissen Zeitpunkt an. Am Ende der Messung (bei ca. 475 °C) kann aus der schwarzen Kurve der Silbergehalt abgelesen werden (Masse in %).

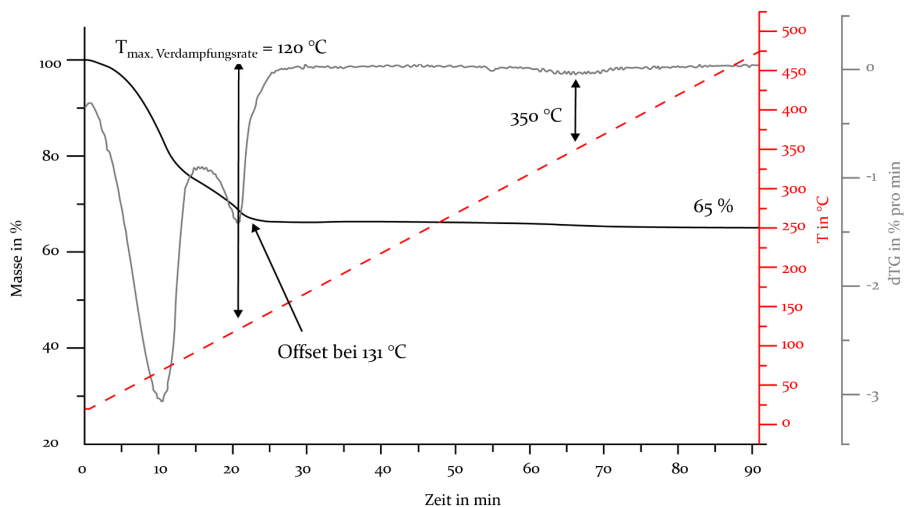


Bild 29: Thermogravimetrische Analyse der Silbernanopartikel-tinte Paru 007 mit einer maximalen Verdampfungsrate bei 120 °C aus [P2]

Die Analyse zeigt einen zweistufigen Masseverlust mit einer maximalen Verdampfungsrate bei 71 °C und 120 °C. Dies wird durch die beiden negativen Peaks der grauen Kurve sichtbar. Der zweistufige Prozess ist auf die

unterschiedlichen Lösemittel in der Formulierung zurückzuführen. Bei ca. 131 °C und 22 Minuten setzt das Ende der Verdampfung ein, welche bei ca. 145 °C abgeschlossen ist.

Anhand der durchgeführten Analyse wurde festgestellt, dass eine Temperatur von mindestens 130 °C zum Sintern der Tinte notwendig ist. Nach dem Sinterprozess beträgt der Silberanteil ca. 65 wt% und der Anteil der organischen Bestandteile liegt bei ca. 1 wt%. Insgesamt tritt ein Masseverlust von über 30 % auf. Ein geringer verbleibender Anteil organischer Bestandteile ist wünschenswert, da diese zu einem besseren Haftungsergebnis beitragen.

Ein vergleichbares Bild zeigt sich in den Ergebnissen der TGA-Analyse der Tinte Clariant TPS 50, welche in Bild 30 dargestellt sind. Die Analyse zeigt, ebenso wie bei Paru 007, einen zweistufigen Masseverlust, der zu vergleichbaren Zeitpunkten, jedoch unterschiedlichen Temperaturen, eintritt.

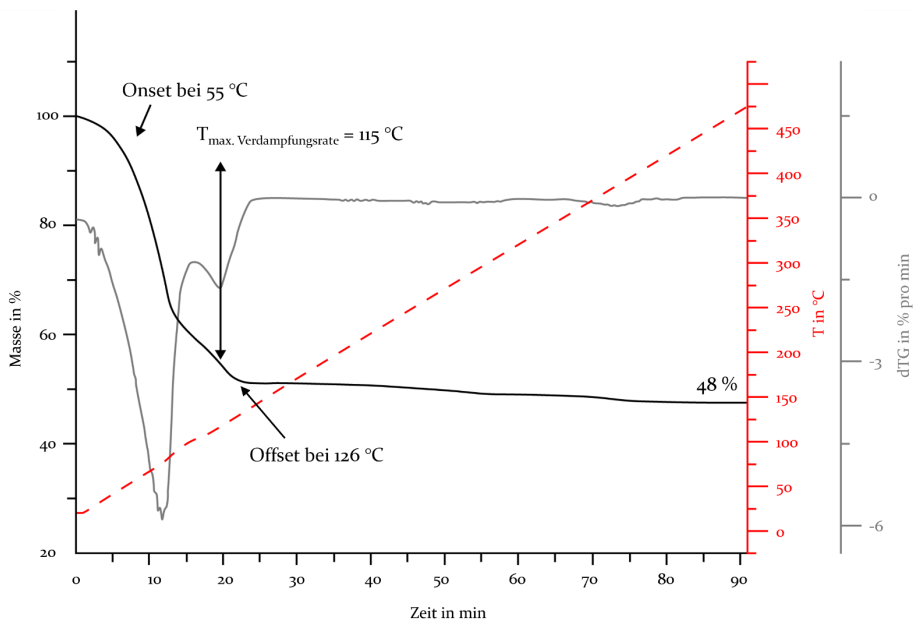


Bild 30: Thermogravimetrische Analyse der Silbernanopartikeltinte Clariant TPS 50 mit einer maximalen Verdampfungsrate bei 115 °C aus [P2]

Der erste Masseverlust, beschrieben durch die graue Kurve tritt nach ca. 12 Minuten bei 55 °C ein, die zweite Stufe setzt bei ca. 115 °C ein. Ursache hierfür sind ebenfalls wie bei Paru 007 unterschiedliche Lösemittelzusammensetzungen in der Tinte. Bei 126 °C setzt das Ende der Verdampfung ein,

welche bei 136 °C nach 22 Minuten abgeschlossen ist. Der verbleibende Silberanteil nach dem Sinterprozess beträgt 48 wt% wobei sich der noch vorhandene Anteil organischer Bestandteile auf 3 wt% beläuft.

Werden beide Ergebnisse miteinander verglichen, zeigen sich fast identische Verläufe. Die durch die Analyse ermittelte ideale Sinter Temperatur von Paru 007 liegt bei 130 °C und für Clariant TPS 50 bei 140 °C. Beide Druckmaterialien sind somit für temperaturempfindliche Substrate nur bedingt geeignet. Durch den ersten Masseverlust bei 71 °C und 55 °C findet ein erstes Ausdampfen der Lösemittel statt. Um jedoch den möglichen Zielzustand der Tinten zu erreichen, sind Temperaturen über 120 °C notwendig. Gleichzeitig gilt zu beachten, dass die TGA-Analyse zwar eine Aussage über das Ausdampfen der Lösemittel und die dafür notwendigen Temperaturen ermöglicht, jedoch keine fundierte Aussage über die Ausbildung der Sinterhalse und somit den Sintergrad getroffen werden kann.

Drucklayout

Für die Versuchsreihen wird ein Layout sowohl zur elektrischen als auch zur mechanischen Qualifizierung der Strukturen gewählt. Es werden Leiterbahnen mit einer Länge von 10 mm und rechteckige Anschlusspads (1,5 mm x 2 mm) zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit mittels Vierpunktmethodem gewählt. Bild 31 zeigt das verwendete Layout der Sinterversuche.

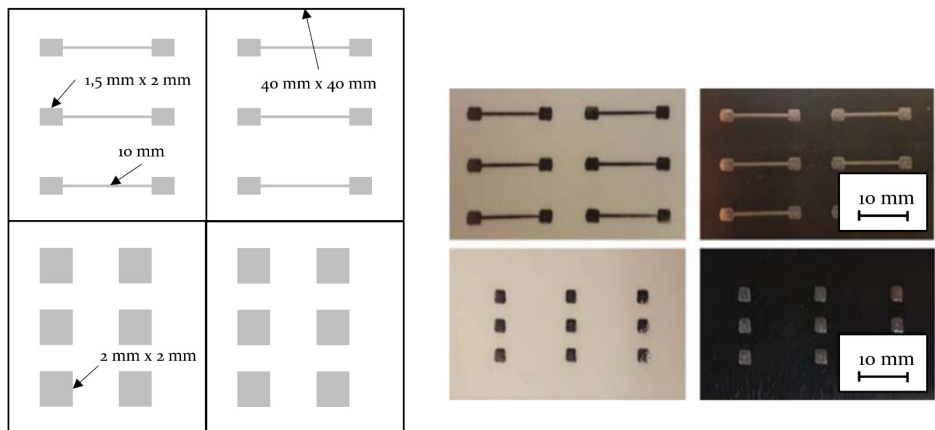


Bild 31: Aufnahme des Drucklayouts (rechts) für die Sinterversuche bestehend aus 10 mm langen Leiterbahnen zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit sowie 2 x 2 mm Quadraten zur Qualifizierung der Haftfestigkeit und schematische Darstellung (links)

Für die Qualifizierung der Haftfestigkeit werden Quadrate (2 mm x 2 mm) verwendet. Die insgesamt sechs Linien (R1 – R6) und 12 Quadrate (T1 – T4) verteilen sich auf einer Gesamtfläche von 4 cm x 4 cm, da in diesem Bereich die Strahlungsintensität der UV-LEDs homogen ist.

3.2.2 Qualifizierung von NIR- und UV-Strahlung

Bei photonischen Sinterverfahren findet die Energieübertragung über elektromagnetische Strahlung statt. Zur idealen Auswahl der Wellenlänge und Spektren der UV- und NIR-Strahler werden die beiden Substrate sowie die Tinte hinsichtlich ihrer Absorptions-, Reflexions- und Transmissionseigenschaften untersucht.

Zur Bestimmung der Absorption wird zunächst die Reflexion bestimmt. Eine Transmission ist sowohl bei der verwendeten Silbernanopartikel als auch bei den verwendeten Substraten nicht vorhanden.

Über die Formel:

$$\begin{aligned} \text{Absorption} + \text{Reflexion} + \text{Transmission} &= 100 \% \\ \text{Absorption} &= 100 \% - \text{Reflexion} - \text{Transmission} \end{aligned} \quad (15)$$

und der Annahme Transmission ist gleich Null kann die Absorptionsrate berechnet werden.

Mit dem UV-NIR -Spektrometer Lambda 19 mit Doppelstrahl (Mess- und Referenzstrahl) von Perkin Elmer werden die Messungen in Kooperation mit der Technischen Hochschule Nürnberg durchgeführt. Das Messgerät mit einer 60 mm Ulbricht-Kugel verfügt über einen Messbereich von 200 nm – 2500 nm mit einer Scangeschwindigkeit von 120 nm/min. Pro Nanometer der Wellenlänge wird ein Messpunkt erzeugt. Durch die Beschichtung der Ulbricht-Kugel mit Bariumsulfat findet eine diffuse Reflexion der Strahlung auf dem Detektor statt.

Die Ergebnisse der Analyse sind in Bild 32 gezeigt. Das Diagramm zeigt das Absorptionsverhalten der Materialien in Abhängigkeit der Wellenlänge. Die blaue Kurve stellt das Emissionsspektrum des UV-LED-Strahlers mit 405 nm dar, während die rote Kurve das Emissionsspektrum des NIR-Strahlers aufzeigt. LCP absorbiert über das gesamte gemessene Spektrum kontinuierlich mit ca. 90 %. Das bedeutet, dass sich das Material während der Bestrahlung mit UV- bzw. NIR-Strahlung stark erwärmt, was auf die schwarze Farbe des Materials zurückzuführen ist.

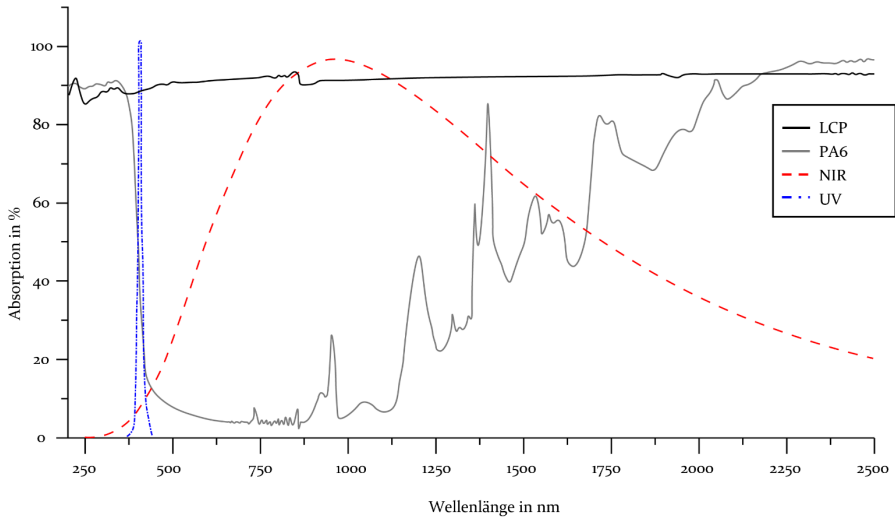


Bild 32: Messergebnisse der Spektrometeruntersuchung der verwendeten Substrate PA6 und LCP aus [P2]

Im Vergleich dazu absorbiert PA6, welches eine weiße Färbung besitzt, im Bereich von 400 nm bis ca. 880 nm kaum Strahlung. Unterhalb von 500 nm findet ein sprunghafter Anstieg des Absorptionsverhaltens statt und erreicht bei 400 nm ca. 50 %. Oberhalb von 880 nm findet ein Anstieg der Absorption mit mehrfachen Peaks statt, was zu einer Erwärmung des Substrats durch den NIR-Strahler führt.

Neben den Absorptionseigenschaften der Substrate hat das Emissionsverhalten der Tinten einen entscheidenden Einfluss auf die Sinterergebnisse. Die Messergebnisse der Spektrometermessung der Tinten sind in Bild 33 gezeigt. Dargestellt sind durch die blau und rot gestrichelte Linien die Emissionsspektren des UV- und NIR-Strahlers, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Beide verwendeten Tinten absorbieren konstant zwischen 30 und 75 % im Bereich von 800 nm bis 2500 nm, wobei die Absorption und damit auch die Erwärmung der Tinte Clariant TPS 50 um knapp 30 % höher als bei Paru 007 liegt. Bei 320 nm zeigen beide Tinten einen Absorptionspeak von knapp 100 %. Dieser Peak lässt sich physikalisch mit der Oberflächenplasmonenresonanz von Silbernanopartikeln erklären. [115]

3 Qualifizierung von NIR und UV zur alternativen photonischen Sinterung gedruckter Elektronik

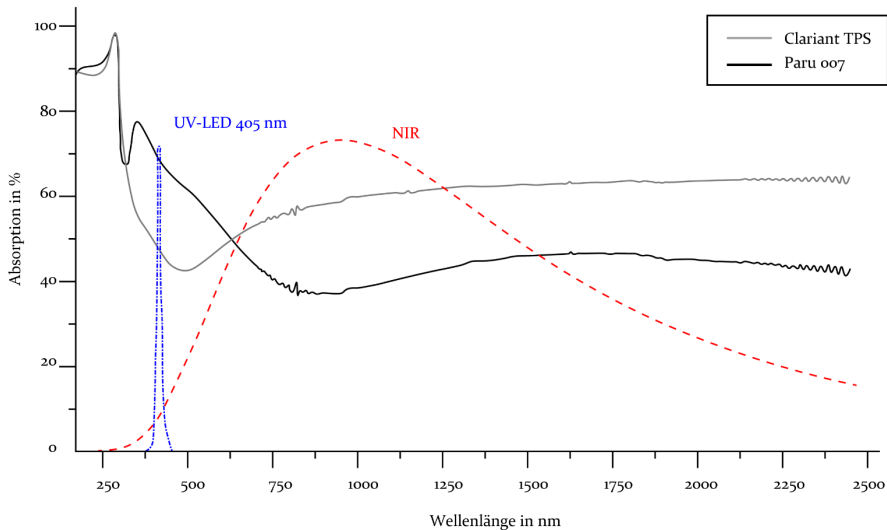


Bild 33: Messergebnisse der Spektrometeruntersuchungen der verwendeten Silbernanopartikelintinten Clariant TPS 50 und Paru 007 aus [P2]

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist es wichtig zu beachten, dass eine Vortrocknung der Tinten bei 80 °C stattgefunden hat. Während des Sinterprozesses kommt es teilweise zu einer sichtbaren Farbänderung der Silberschicht von silbrig schimmernd zu weiß-gräulich, was eine Verschiebung der Absorptionseigenschaften zur Folge hat.

Versuchsaufbau und Ablauf

Die Bestrahlung der Aerosol-Jet gedruckten Proben findet mit dem NIR-System NIR-96-250-E der Firma adphos Digital Printing und dem UV-LED Cube 100 IC der Firma Dr. Hönle AG statt. Das NIR-Modul besitzt eine Strahllänge von 300 mm und eine Strahlbreite von 100 mm. Für die Versuche werden zwei NIR-Strahler mit jeweils 2,5 kW und somit einer höchstmöglichen Leistung von 5 kW verwendet. Der verfahrbare Arbeitstisch in x-Richtung ist mit einer Vakuumeinheit ausgestattet, welche eine Fixierung des Substrates auf dem Probenstisch sicherstellt. Durch diverse Drehregler können je nach Verfahrenrichtung Leistung und Verfahrensgeschwindigkeit eingestellt werden. Ebenso kann mittels eines Drehreglers die Höhe zwischen Substrat und Strahlermodul ausgewählt werden. Die exakte Einstellung dieser Parameter ist essenziell, um reproduzierbare Bedingungen während des Versuchsdurchführung sicherzustellen. In Bild 34 ist das im Rahmen dieser Arbeit verwendete NIR-Sintergerät gezeigt.



Bild 34: NIR-96-250-E System der Firma adphos Digital Printing mit der Prozesssteuereinheit, verfahrbarer Probestisch und Strahlermodul

Der UV-Cube wird mit einer 405 nm LED betrieben und ist in Bild 35 zu sehen. Die Bestrahlkammer besitzt einen Sicherheitsmechanismus, welcher zum automatischen Abschalten der UV-LED führt, sollte die Tür während des Bestrahlungsvorgangs geöffnet werden. Von Seiten des Herstellers wird ein Toleranzbereich der Wellenlänge von ± 10 nm angegeben. Mit der Prozesssteuereinheit werden die beiden Parameter Bestrahlungsdauer und prozentuale Bestrahlleistung eingestellt. Bei beiden Sinterverfahren wird bei der Versuchsreihe der Abstand zwischen den Strahlern und der Probe auf 10 mm konstant gehalten und nur eine Überfahrt der NIR-Strahler durchgeführt. Die Probe im UV-Cube wird mittig, wie in Bild 35 gezeigt, auf einer verstellbaren Versuchshebebühne und zwei Erhöhungen fixiert. Durch den fehlenden flächigen Kontakt des Substrats auf Metall kann ein Sintereffekt durch das indirekte Aufwärmen des Metalls aufgrund der NIR- und UV-Bestrahlung ausgeschlossen werden. Die Sinterung erfolgt somit ausschließlich durch die direkte Erwärmung des Silbernanopartikelintinte und der indirekten Erwärmung des Substrats.

Ein statistischer Versuchsplan wird zu Beginn mit den zwei Faktoren *Leistung* und *Dauer* erstellt und durchgeführt. Der Abstand zwischen der Bestrahlereinheit und dem Substrat, als weiterer wichtiger Faktor, wurde bereits in Vorversuchen auf 10 mm [S5] ermittelt. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass der Übergang von homogen gesintert zu nicht gesintert sehr eng ist und maßgeblich von der Qualität der vorher durchgeführten Druckversuche abhängig ist.

3 Qualifizierung von NIR und UV zur alternativen photonischen Sinterung gedruckter Elektronik

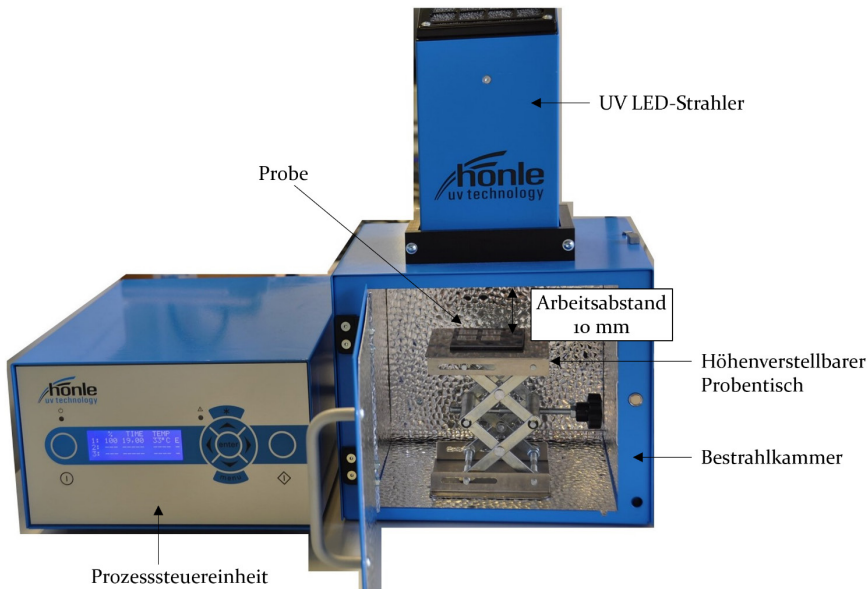


Bild 35: UV-LED Cube 100 IC der Firma Höhle mit Prozesssteuereinheit, abgeschirmter UV-LED Strahler und Bestrahlkammer aus [P3].

Versuchsreihen, die mit denselben Parametern an unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden, zeigen bereits in der optischen Charakterisierung der gedruckten und nicht gesinterten Linien eine Abweichung von mehr als 10 % in der Linienbreite und -höhe sowie der elektrischen Leitfähigkeit. Eine aussagekräftige statistische Auswertung der aus dem Versuchsplan erzielten Sinterergebnisse ist aufgrund dieser Tatsache nicht möglich. Jedoch zeichnet sich ein grundsätzlicher Trend ab: eine lange Bestrahlungsdauer bei gleichzeitiger hoher Leistung führen zu einer Verringerung des elektrischen Widerstandes und somit zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit.

Die finale Auswahl der Parameter für die weiteren Versuche bei nur einer Überfahrt der Bestrahlquelle findet deshalb unter den folgenden Gesichtspunkten statt:

- Keine Beschädigung des Substrates, wie Blasenbildung, Wellenausprägung oder Abplatzen der Oberfläche
- Homogene und vollständige Trocknung des Layouts
- Die erreichten gemessenen Leitfähigkeiten sind $> 5 \text{ MS/m}$ und vergleichbar mit einer Ofensinterung bei 150 °C und einer Zeitdauer von einer Stunde

Unter Einhaltung der oben genannten Punkte führen die folgenden Maschineneinstellungen zu den besten Ergebnissen. Diese sollen künftigen Anwendern als Referenz dienen, müssen jedoch je nach verwendeter Tinten- und Substratkombination sowie Layout (Linien und/oder große Flächen) immer erneut quantifiziert und im Bedarfsfall modifiziert werden:

Tabelle 5: Maschineneinstellung unter Einhaltung folgender Aspekte: Abstand 10 mm, einmalige Überfahrt, keine Schädigung des Substrats, gleichmäßige Sinterung von Linien und Flächen sowie erzielte Leitfähigkeit vergleichbar mit der Ofensinterung (150 °C und 1 Stunde)

| Materialkombination (Substrat-Tinte) | UV-Sinterung (100 % Leistung) | NIR-Sinterung |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|
| LCP-Paru 007 | 60 Sekunden | 58 % Leistung 2,31 Sekunden |
| LCP-Clariant TPS 50 | 110 Sekunden | n/a |
| PA6- Paru 007 | 150 Sekunden | 82 % Leistung 5 Sekunden |
| PA6-Clariant TPS 50 | 180 Sekunden | n/a |

3.2.3 Experimenteller Vergleich und Gegenüberstellung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften

Die Analyse der Güte der gesinterten Proben wird in drei Schritte eingeteilt. Typischerweise findet nach dem Sinterprozess die geometrische Charakterisierung der gedruckten und gesinterten Strukturen statt. Diese wird mit einem Keyence 3D-Laser-Scanning-Mikroskop VK-9700 durchgeführt. In einer Großaufnahme ohne Verwendung der Laserlichtfunktion wird die Struktur auf offensichtliche makroskopische Fehlerbilder wie Verschmutzungen oder Brüche untersucht. Werden solche detektiert, wird die Probe für weitere Auswertungen nicht mehr in Betracht gezogen. Als Nächstes findet unter Einsatz des Laserlichts die 3D-Oberflächenvermessung des Querschnitts und damit der Höhe und der Breite der gedruckten Linien statt. Diese werden nicht nur zur geometrischen Analyse, sondern auch als Grundlage zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit herangezogen. Schwankungen im Druckprozess führen zu ungleichmäßigen Linienbreiten, weshalb als Basis für die elektrische Leitfähigkeit der Durchschnittswert von fünf Messungen auf einer Länge von 5 mm mittig der gedruckten Linie verwendet wird.

In Bild 36 sind exemplarisch die Querschnitte der gedruckten Strukturen nach Substrat, Tinte und Sintermethode dargestellt.

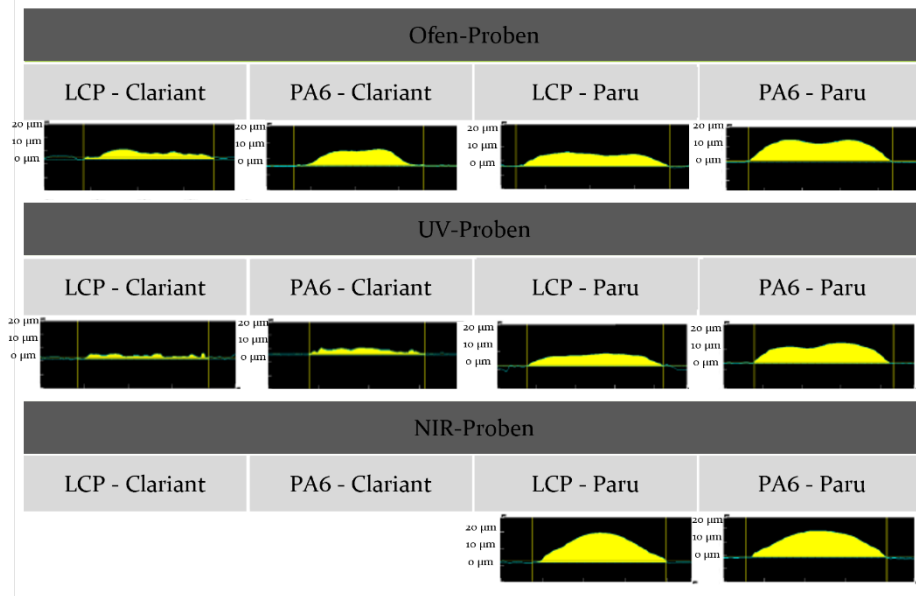


Bild 36: Mikroskopische Untersuchung der gedruckten Proben nach unterschiedlichen Substrat- und Tintenkombination sowie nach Sinterverfahren

Auf beiden Substraten wird mit der Tinte Paru 007 nach jeder Sinterung ein halbkreisförmiger Querschnitt erzielt mit einer Linienbreite von ca. $390\ \mu\text{m}$ – $405\ \mu\text{m}$ und einer Höhe von $8\ \mu\text{m}$. Bei den mit Clariant TPS 50 gedruckten Proben kommt es zu einem deutlichen Verlaufen der Struktur und einer erhöhten Oberflächenwelligkeit. Die Linienbreiten bewegen sich je nach Substrat zwischen $410\ \mu\text{m}$ – $490\ \mu\text{m}$ und einer reduzierten Leiterbahnhöhe von $5\ \mu\text{m}$. Auffällig bei der Verwendung von Clariant TPS 50 und UV-Licht ist das deutliche Verlaufen der Linien. Als mögliche Ursache hierfür ist eine Veränderung der Oberflächenspannung der Tinte aufgrund der UV-Strahlung identifiziert worden.

In einem zweiten Schritt findet die elektrische Charakterisierung der gedruckten Leiterbahnen statt. Diese ist essenziell zur Qualifizierung der Eignung der Leiterbahn für den Einsatz als Signalübertragungsmedium. Das Elio Pedranti Digital Nano-Ohmmeter 20024 wird für die Vierletermessung verwendet. Vier Messspitzen sind hierfür in Reihe angeordnet. Der Abstand der beiden äußeren Spitzen beträgt $9\ \text{mm}$, die inneren Messspitzen weisen einen Abstand von $3\ \text{mm}$ auf. Während an den beiden äußeren Messkontakten konstanter Strom fließt, wird über die zwei innenliegenden

Messstifte der Spannungsabfall gemessen. Der Messbereich des Nano-Ohmmeters liegt zwischen 320Ω und $3200 \mu\Omega$ mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,06 \% + 0,001 \%/^{\circ}\text{C} + 3 \text{ Digit}$ bei einer Umgebungstemperatur von 20°C . [P4] Bild 37 zeigt die schematische Darstellung der Vierleitermessung auf den gedruckten Strukturen.

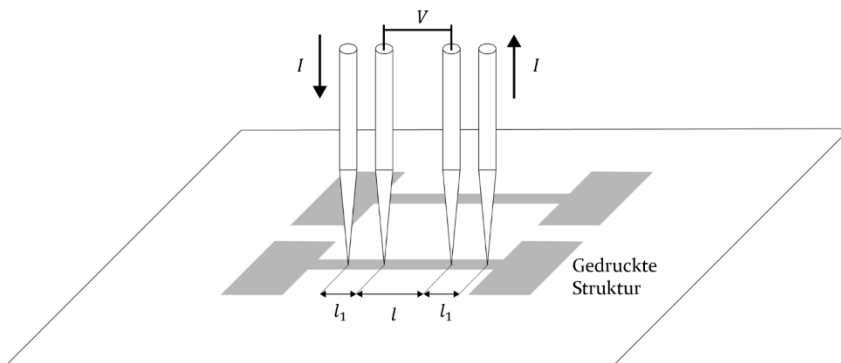


Bild 37: Schematische Darstellung der Vierleitermessung auf der gedruckten Struktur

Die spezifische Leitfähigkeit wird nach der Ermittlung des elektrischen Widerstands sowie der Querschnittsfläche nach Formel (14) berechnet. In Bild 38 sind die Ergebnisse der Leitfähigkeitsuntersuchungen grafisch dargestellt.

Bei der Kombination von PA6 und der Tinte Paru 007 bewegen sich die erzielten Leitfähigkeitswerte zwischen acht und 12 MS/m , was einer relativen Bulk-Ag Leitfähigkeit von $16 \% - 19 \%$ entspricht. Mit Clariant TPS 50 werden Leitfähigkeiten zwischen $0,6 \text{ MS/m}$ und 1 MS/m erreicht. Mit NIR kann keine messbare elektrische Leitfähigkeit erzielt werden. Auf dem schwarzen LCP-Material werden deutlich höhere Werte erreicht. Diese bewegen sich zwischen acht und 22 MS/m für Paru 007 und zwischen $0,6 \text{ MS/m}$ und 1 MS/m für Clariant TPS 50. Der deutliche Unterschied ist auf die Absorptionsfähigkeit des Substrates zurückzuführen. Durch die hohe Absorptionsrate von $> 90 \%$ kommt es zur Erwärmung des Substrats und damit einhergehend zu einem zusätzlichen indirekten Wärmeeintrag auf die Leiterbahn.

In einem letzten Schritt findet nach der geometrischen und elektrischen Charakterisierung die mechanische Charakterisierung der gedruckten Strukturen statt. Das zugrunde liegende Prinzip der Haftung der gedruckten Struktur auf einem Substrat ist die Adhäsion. Durch die Wechselwirkung zwischen elektrischen Dipolen haften der Grundwerkstoff und die

Schicht. Je höher die Wechselwirkung dieser Dipole ist, desto höher ist die Haftfestigkeit.

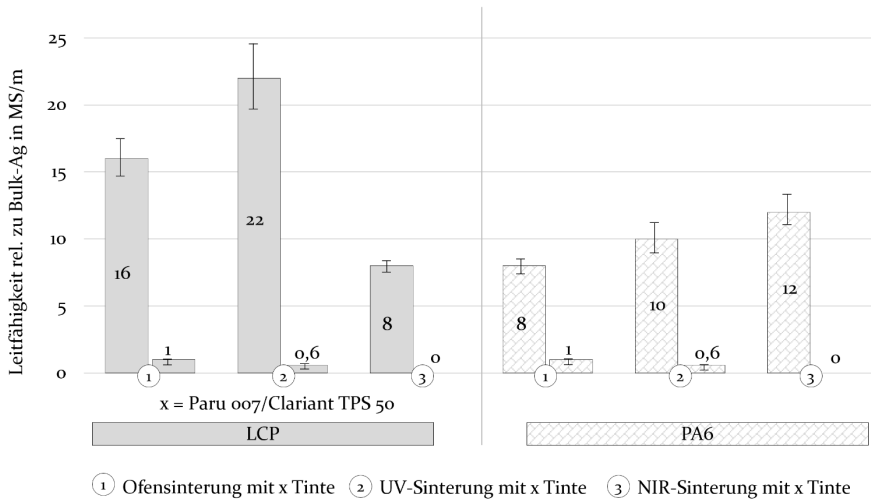


Bild 38: Messergebnisse der elektrischen Leitfähigkeitsuntersuchungen auf LCP (links) und PA6 (rechts) mit der Standardabweichung zum Mittelwert

Um die Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen auf dem Substrat zu bestimmen, wird ein Tape Test nach DIN EN ISO 10683 ohne Gitterschnitt durchgeführt. Ein wesentlicher Nachteil der Methode ist die Einbeziehung von vier unterschiedlichen Materialeigenschaften, die Auswirkungen auf das Haftfestigkeitsergebnis haben: Substrat, Tinte, Klebstoff und das Trägermaterial für das Klebeband. Die Auswahl der Kombination zwischen Klebstoff und Trägermaterial kann die Abziehungskraft bei gegebener Schichtdicke um den Faktor zwei beeinflussen [116]. Dem gegenüber steht der Vorteil der einfachen Probenpräparation und einer schnellen qualitativen Aussage der Haftfestigkeit. [117] Für die gedruckte Elektronik stehen keine weiteren Messungen zur Verfügung, da jegliche andere Testmethoden, wie beispielweise der Hot-Pin-Pull Test, mit Wärme einhergehen und diese somit das Ergebnis aufgrund einer möglichen Nachsinterung verfälschen können. Ein Stirnabzugstest wird ebenfalls als Messmethode ausgeschlossen. Durch das Aufkleben des Stempels mit einem Zweikomponentenkleber besteht die Möglichkeit, dass Teile des Klebers in die poröse Struktur einsickern. Das Messergebnis würde dadurch beeinflusst und nicht mehr aussagekräftig. Deshalb wird trotz der genannten Nachteile der Tape Test als Messmethode herangezogen.

Ein Tape 850 mit einer Linienkraft von 32 N/100 mm von 3M Deutschland GmbH wird nach dem Sinterprozess manuell auf die Rechtecke aufgeklebt

und mit einem Winkel von ungefähr 60° abgezogen, wie schematisch in Bild 39 dargestellt.

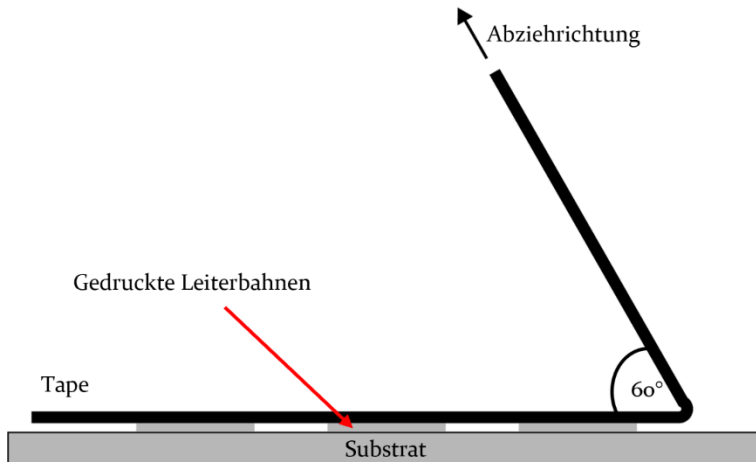


Bild 39: Schematische Darstellung des Tape Tests auf gedruckten Strukturen mit einem Abziehwinkel von 60°

Anschließend erfolgt die Evaluierung der Oberfläche unter Verwendung des Leica Digitalmikroskops DVM6. Die Haftfestigkeit wird gemäß den Richtlinien der DIN EN ISO 2409 in die Kategorien 0 – 5 klassifiziert. Gemäß Norm sind diese Kategorien wie folgt definiert:

- Kategorie 0 = kein Abplatzen der Struktur erkennbar
- Kategorie 1 = 0,1 % – 5 % der Fläche sind abgeplatzt
- Kategorie 2 = 5 % – 15 % der Fläche sind abgeplatzt
- Kategorie 3 = 15 % – 35 % der Fläche sind abgeplatzt
- Kategorie 4 = 35 % – 65 % der Fläche sind abgeplatzt
- Kategorie 5 = 65 % – 100 % der Fläche sind abgeplatzt

In Bild 40 sind die Ergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchung nach Substrat und Sintermethode dargestellt und in die Kategorien 0 – 5 eingeteilt. Eindeutig kann hier eine Abhängigkeit vom ausgewählten Substrat und Tinte festgestellt werden. Auf LCP lässt sich mit Ausnahme der UV-Sinterung keine Haftfestigkeit erzielen. Die gedruckten Flächen werden vollständig abgezogen, was einer Haftfestigkeit der Kategorie 5 entspricht. Eine Ausnahme bildet die Sinterung mit UV auf LCP. Nur 10 % der Proben lassen sich vollständig entfernen. Neben der gedruckten Struktur befinden sich auch oberflächliche Reste des Substratmaterials am Klebeband, was auf

eine schlechte Güte der Substrate schließen lässt und als mögliche Ursache für die schlechte Haftfestigkeit ebenfalls in Betracht gezogen werden muss.

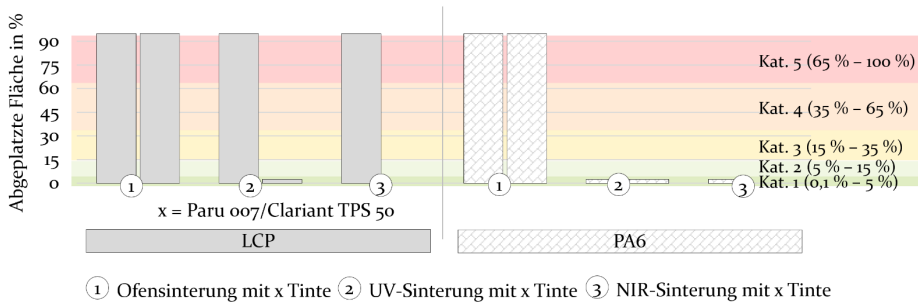


Bild 40: Messergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchung eingeteilt in Kategorien auf LCP (links) und PA6 (rechts)

Werden die Ergebnisse auf PA6 analysiert, zeigt sich, dass die verwendete Sintermethode die maßgebliche Einflussgröße auf die Haftfestigkeit darstellt. Während sich die ofengesinterten Proben vollständig abziehen lassen (Kategorie 5), sind nur <5 % der Fläche der NIR und UV gesinterten Proben abgeplatzt (Kategorie 1).

Klimatische Temperaturwechselprüfung zur Lebensdauercharakterisierung

Für den Einsatz im industriellen Umfeld werden mit den gedruckten Strukturen klimatische Lebensdauertests durchgeführt. Zur Prüfung der Qualität werden die Merkmale elektrische Leitfähigkeit, mechanische Haftfestigkeit und geometrische Maßhaltigkeit definiert.

Da es bisher keine expliziten Normen für Zuverlässigkeitsuntersuchungen für die gedruckte Elektronik gibt, findet eine Adaption und moderate Anpassung der hinsichtlich der Temperatur der deutschen Norm DIN EN 60068-2-14 [118] statt. Als Prüfspezifikation werden die Vorgaben aus der Automobilbranche (L 124) gewählt.

Konkret wird der Temperaturwechseltest mit folgenden Einzelbestimmungen durchgeführt:

1. Kühlen mit 3K/min bis -20 °C
2. 10 Minuten Halten bei -20 °C
3. Heizen mit 3K/min bis 80 °C
4. 10 Minuten Halten bei 80 °C
5. Kühlen mit 3K/min bis 22 °C

Die Gesamtdauer eines Zyklus beträgt 90 Minuten und mit insgesamt 500 Zyklen erstreckt sich die Versuchsdauer über 750 Stunden. Das verwendete Temperaturprofil ist schematisch in Bild 41 dargestellt.

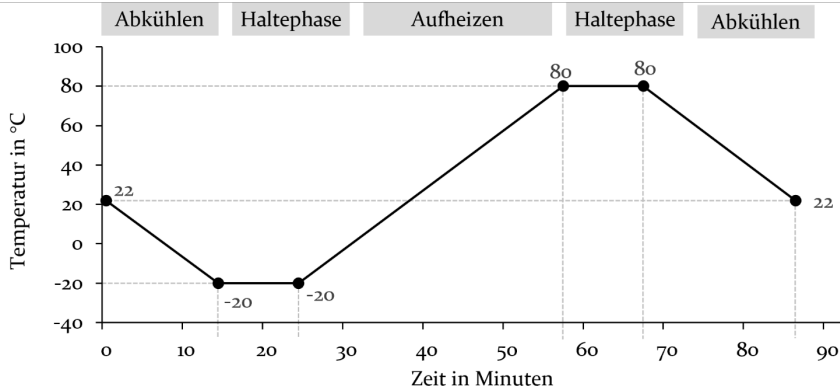


Bild 41: Schematische Darstellung des Temperaturprofils für den Temperaturwechseltest mit einer Zyklusdauer von 90 Minuten

Während der Laufzeit findet zu definierten Zeitpunkten eine Entnahme und Untersuchung der Proben statt. Zur Qualifikation der elektrischen Leitfähigkeit und der geometrischen Maßhaltigkeit werden jeweils fünf Proben mit sechs Linien nach 50, 100, 250 und 500 Zyklen untersucht. Für die mechanische Haftfestigkeit werden nach 100 sowie 500 Zyklen Proben entnommen. Insgesamt wird der Temperaturwechseltest mit einem Versuchsumfang von 20 Proben je Substrat und Tinte durchgeführt. Bei den untersuchten Strukturen konnte keine maßgebliche Veränderung in der Geometrie festgestellt werden. Dies ist auf das bereits vollständige Verdampfen der enthaltenen Lösemittel bei niedrigen Temperaturen zurückzuführen, weshalb eine genauere analytische Betrachtung nicht vorgenommen wird. Es ist davon auszugehen, dass Temperaturen $> 200\text{ °C}$ zu einer Reduktion der Schichtdicke aufgrund weiterer Ausgasungen führen könnte. Anhand dieser Versuche kann gezeigt werden, dass die Geometrie der gedruckten Struktur durch das Umgebungsklima nicht beeinflusst wird. Die Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit nach 50 durchgeführten Zyklen unterscheidet sich fundamental in Abhängigkeit der Tinten-Substrat-Kombination sowie der verwendeten Sintermethode. Die Tinte Clariant lässt sich nach der Ofensinterung auf beiden Substraten auf nur einer Probe messen, ab 100 Zyklen ist durch das Abplatzen der Struktur bereits vor oder während des Aufsetzens der Messspitzen keine Messung der Leitfähigkeit mehr möglich.

3 Qualifizierung von NIR und UV zur alternativen photonischen Sinterung gedruckter Elektronik

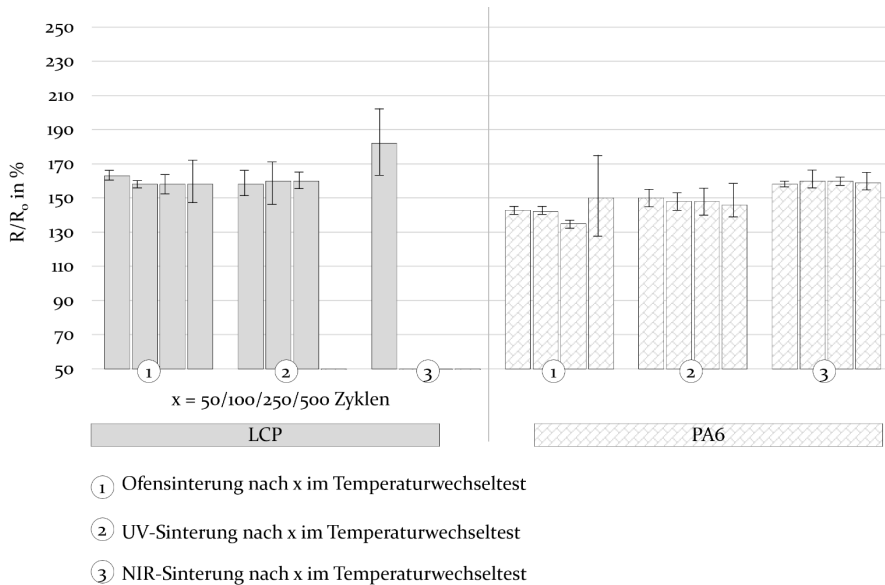


Bild 42: Gegenüberstellung der Leitfähigkeitsergebnisse pro Substrat für die Tinte Paru 007 nach dem Temperaturwechseltest

Bei den UV gesinterten Proben kommt es ab 250 Zyklen zu ersten Ausfällen. Dies ist ein weiterer Beleg dafür, dass die Anwendung von UV-Strahlung zur Sinterung gedruckter Strukturen deutliche Vorteile gegenüber der Ofensinterung aufweist. Im Vergleich zu Clariant TPS50 zeigen sich bei der Verwendung von Paru, je nach Substrat und Sintermethode, unterschiedliche Ausfallzeitpunkte. Nach 500 Zyklen ist eine Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei der Kombination Paru-LCP-UV nicht mehr möglich. Die Paru-LCP-NIR-Prüflinge sind bereits nach 100 Zyklen nicht mehr charakterisierbar. Bei den Paru-PA6-NIR und Paru-PA6-UV-Prüflingen sind nach 500 Zyklen alle Proben auswertbar. Die Ergebnisse der Paru-Tinte auf beiden Substraten sind in Bild 42 dargestellt.

Die Übertragung der Ergebnisse auf die vorhandene Literatur ist nicht vollständig gegeben, da es bereits beim Standardsinterprozess mittels Konvektion, je nach verwendetem Substrat und Tintenmaterial, deutliche Unterschiede gibt. Die erhaltenen Werte sollen als Ausgangsbasis für künftige Forschungsaktivitäten bei der Verwendung materialtechnisch ähnlicher Werkstoffe im Bereich der gedruckten Elektronik dienen.

Grundsätzlich lässt die große Streuung der Ausfallrate nach dem Temperaturwechseltest keine wissenschaftlich fundierte Aussage über die Zuverlässigkeit der gedruckten Strukturen zu. Aufgrund mangelnder Referenzwerte für gedruckte Elektronik und bisher in der Literatur gezeigten Unter-

suchungen kann jedoch festgestellt werden, dass durch die Verwendung photonischer Sintermethoden bis zu 50 Zyklen, und somit deutlich mehr als in der Norm angegebene zwei Zyklen, möglich sind.

Aufzeigen möglicher Fehlerbilder und potenzieller Lösungsstrategien

Eine Zusammenfassung der möglichen auftretenden Fehlerbilder und Strategien, wie diese vermieden werden können, sollen künftigen Anwendern eine Hilfestellung geben, schnell auf Unregelmäßigkeiten reagieren zu können. In Bild 43 sind die während des Sinterprozesses aufgetretenen Fehlerbilder zusammengefasst.

Das Schmelzen des Substrats ist bei der Verwendung von NIR-Strahlern häufig zu beobachten. Durch eine vorhergehende Analyse der Materialeigenschaften hinsichtlich Temperaturbeständigkeit in Verbindung mit der Ermittlung der Absorptionsrate des Substrats kann hier zu einer deutlichen Minimierung der Substratbeschädigung führen.

Das vollständige oder teilweise Abblättern der Struktur nach dem Sinterprozess ist auf einen zu hohen Energieeintrag zurückzuführen. Grundsätzlich gibt es zwei Lösungsstrategien, welche angewendet werden können. Die erste augenscheinlich triviale Lösung ist die Reduktion der eingebrachten Strahlungsleistung bei gleichzeitiger Verlängerung der Bestrahlungsdauer. Die zweite, auf den ersten Blick nicht ersichtliche Lösungsstrategie ist das Vortrocknen der gedruckten Strukturen. Einige wenige Minuten sind ausreichend, um das enthaltene Lösungsmittel teilweise zu verdampfen und dadurch den Effekt des Abblätterns zu minimieren. Das explosionsartige Verdampfen der Lösemittel, welches oft die Ursache für ein Abplatzen der Struktur ist, kann dadurch vermieden werden.

Rissbildungen sind in der Regel ebenso auf einen zu hohen Energieeintrag zurückzuführen. Vor allem an flächigen Strukturen mit unregelmäßigen Schichtdicken treten Risse häufig auf. Überwiegend bei der Verwendung photonischer Sinterverfahren ist dieses Fehlerbild charakteristisch. Häufig wirken sie sich nicht auf die elektrische Leitfähigkeit aus, solange sie auf der Oberfläche auftreten. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich Risse negativ auf die Zuverlässigkeitseigenschaften der Proben auswirkt. Fremdkörper-einschlüsse in der gedruckten Struktur gehen direkt mit vorhandenen Verschmutzungen einher. Diese können während des Druckens eingebracht werden oder auch bereits vor dem Druckprozess vorhanden sein. Grundsätzlich führt eine vorhergehende Reinigung des Substrats und das Arbeiten in möglichst staubfreier Umgebung zu deutlicher Reduktion der

Verschmutzung. Kurze Wege zwischen der Druck- und Sinteranlage und kurze Wartezeiten zwischen den beiden Prozessen führen ebenso zur Vermeidung dieses Fehlerbildes.

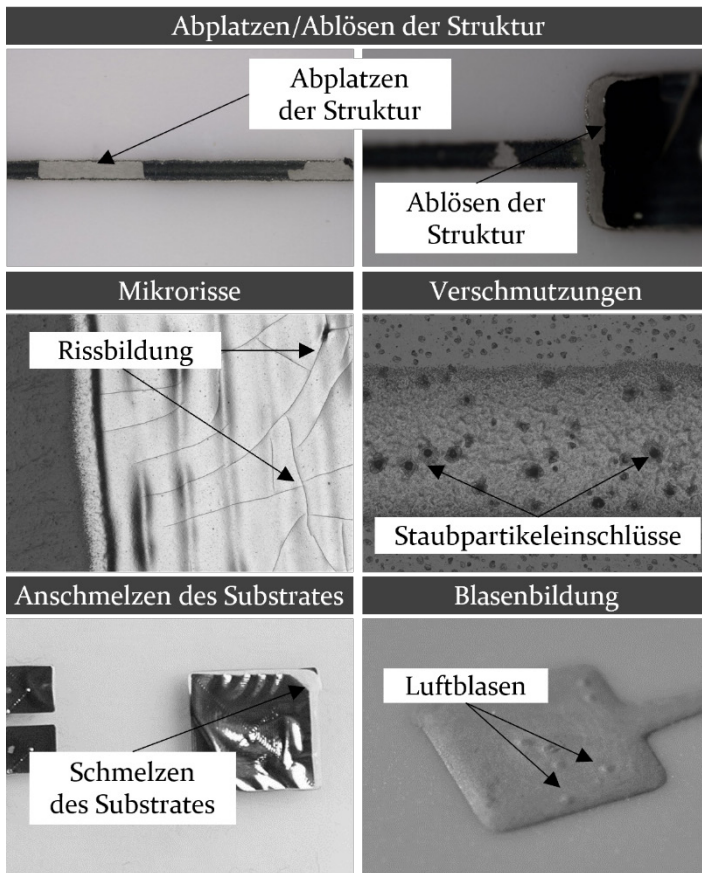


Bild 43: Fehlerbilder nach der Sinterung gedruckter Strukturen, eigene Aufnahmen

3.3 Empfehlungen der Nutzung von UV und NIR zur photonischen Sinterung Aerosol-Jet gedruckter Strukturen

Die Reduktion der Sinterzeit und -temperatur und den damit ermöglichten Einsatz von Niedertemperatursubstraten sind wesentliche Voraussetzungen für die weitere wirtschaftliche Verbreitung gedruckter Elektronik. Die dargestellten Forschungsarbeiten liefern einen wichtigen Beitrag, NIR und UV als photonische alternative Sinterverfahren einzusetzen und Umge-

bungsbedingungen als externe Einflussfaktoren im Einsatz realistisch einzuschätzen.

Die Evaluierung der verwendeten Substrate und Tinten hinsichtlich ihrer Absorptionseigenschaften zeigt, dass die verwendeten Kombinationen für photonische Verfahren geeignet sind. Die vorgelagerte Analyse ist für alle zukünftigen Untersuchungen zwingend erforderlich, um bereits vor Versuchsbeginn mögliche Schäden am Substrat oder unnötiger Zeitverlust bei der Findung geeigneter Prozessparameter vorzubeugen. Die Anwendbarkeit beider Verfahren ist, je nach verwendeter Größe der Strahler, sehr flexibel und sowohl bei größeren als auch bei kleineren Probekörpern einsetzbar. Die wesentlichen Potenziale des Aerosol-Jet-Verfahrens in der gedruckten Elektronik liegen in der räumlichen Gestaltungsfreiheit. Beide Sinterverfahren bieten die Möglichkeit der direkten Integration in der Druckanlage und stehen somit der 3D-Fähigkeit nicht im Wege. Darüber hinaus stellen sich sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Versuchsvorbereitung vergleichsweise einfach dar. Einzig die notwendigen Sicherheitsvorschriften hinsichtlich der verwendeten Strahlung müssen Rechnung getragen werden. Durch die gezielte Einstellung der Strahlungsintensität und -leistung kann eine Schädigung des Substrats vermieden werden. Eine pauschale Bewertung beider Sinterverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz bei Aerosol-Jet gedruckten Strukturen kann der hohen Individualität gedruckter Elektronik nicht in vollem Maße gerecht werden. Speziell bei Strukturen, deren Geometrien, Schichtdicken und Substratmaterialeigenschaften abweichen, muss kritisch hinterfragt werden, ob und gegebenenfalls in welchem Umfang UV und NIR als Sinterverfahren verwendet werden können. Nichtsdestotrotz erweisen sich beide Verfahren für die Sinterung gedruckter Elektronik auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen als überaus empfehlenswert. [P5]

Die wesentlichen Einflussgrößen, die maßgeblich den Erfolg der photonischen Sinterung beeinflusst, sind die Absorptionseigenschaften der verwendeten Silbernanopartikeltinte und des Substratmaterials. Dunkel gefärbte Substrate weisen im Spektrum beider Strahlungen eine höhere Absorption auf und tragen somit positiv zur indirekten Sinterung bei. Hierbei ist die Temperatursensitivität der Substrate zu beachten. Für temperaturempfindliche Substrate ist eine helle Färbung und damit weniger Absorption und Wärmebildung zu empfehlen. Durch die Verwendung anderer Wellenlängen, wie beispielsweise Eisenstrahler anstelle einzelner UV-LEDs, welcher über einen Bereich von 250 μm bis 450 μm mehrere Emissionspeaks aufweist, kann auf die Absorptionseigenschaften verschiedener Tinten eingegangen werden.

Neben den direkten und zu beherrschenden Faktoren spielen auch das Druckbild und die Druckqualität eine entscheidende Rolle. Vor allem flächige Strukturen und unterschiedliche Schichtdicken aufgrund schwankender Gasströme während des Druckprozesses beeinflussen das Sinterergebnis signifikant. Somit können die gefundenen und funktionierende Sinterparameter als Anhaltspunkt für eine erste Abschätzung der Prozessparameter herangezogen werden, müssen jedoch für jede neue Tinten-Substrat-Kombination evaluiert werden.

Im realen Anwendungsbereich muss mit zunehmender Einsatzdauer eine Reduzierung der Haftfestigkeit in Kauf genommen werden. Temperaturwechsel beeinträchtigen die Haftung der Metall-Kunststoff-Verbindungen erheblich und führen letztendlich zum vollständigen Ablösen der Metallschicht. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Reaktion entscheidend von den drei Faktoren Sintermethode, Druckmedium und Substrat abhängt. Während der PA6-Kunststoff in Kombination mit der Tinte Paru 007 ein weitestgehend robustes Verhalten gegenüber den Belastungen des durchgeführten Umwelttests aufweist, lässt die Haftfestigkeit bei LCP und Clariant TPS 50 erheblich nach bzw. ist diese nicht mehr bestimmbar.

Ebenso verhält es sich mit der elektrischen Leitfähigkeit. Während der Umweltbelastung verändert sich diese unabhängig vom verwendeten Sinterverfahren, ausgewähltem Substrat und Druckmedium um mehr als 150 % in positive und negative Richtung. Dies deutet sowohl auf ein Nachsintern und weitere Ausdampfung noch vorhandener Lösemittel hin als auch auf mögliche Rissbildungen, die die Leitfähigkeit beeinflussen. Eine allgemeingültige Prognose zum Verhalten gedruckter Elektronik bei Umweltbelastungen ist nicht möglich, weshalb sich je nach Anwendungsfall material-spezifische Analysen zur Gewährleistung einer ausreichenden Haftfestigkeit empfehlen. Eine mögliche, während der Durchführung dieser Forschungsergebnisse nicht angewendete Option, ist das Nachbehandeln der gedruckten und gesinterten Strukturen mit einer Schutzschicht. Durch das Aufbringen von beispielsweise Klarlack können äußere Einflussfaktoren minimiert werden. Die sich daraus ergebenden Herausforderungen, wie unterschiedliche Materialeigenschaften, müssen im Einzelfall untersucht und evaluiert werden.

4 Neuartige Charakterisierungsmethode zur Bewertung der Qualität der Sinterung

Im folgenden Kapitel wird, abgeleitet von den vorherigen Ergebnissen, die Notwendigkeit einer neuen elektrischen Charakterisierungsmethode für die gedruckte Elektronik vorgestellt. Im Fokus stehen die Grundlagen der Hochfrequenztechnik und das entwickelte numerische Modell, das im Rahmen des BMWi/IGF-Projekts „Charakterisierungsverfahren zur Bestimmung der Sinterereigenschaften gedruckter mikro- und nanopartikelhaltiger Tinten und ihr Einfluss auf die Homogenität der Leitfähigkeit und Zuverlässigkeit (SIMONE)“ [P6] in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik entstanden ist.

4.1 Evaluierung von Analyseverfahren zur Bestimmung der Qualität gedruckter Strukturen

Zur Analyse der Qualität, insbesondere der elektrischen Leitfähigkeit gedruckter Elektronik, werden konventionelle Messverfahren, die in der Elektronikfertigung eingesetzt werden, adaptiert und verwendet. Eine Auswertung der vorhandenen Literatur zeigt, dass zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit die Vier-Punkt-Methode zur Berechnung des Flächenwiderstands, die Vier-Leiter-Messung oder die 2-Punkt-Messung herangezogen werden. Alle Messverfahren haben, wie bereits in Abschnitt 2.5 gezeigt, den Nachteil, dass die elektrische Leitfähigkeit gemittelt über den Querschnitt und die Länge stattfindet. Bei photolithographisch hergestellten Leiterbahnen, die eine homogene innere Struktur aufweisen, sind diese Messmethoden uneingeschränkt nutzbar. Eine Verwendung der elektrischen Messmethoden bei der gedruckten Elektronik führt aufgrund der inhomogenen Materialcharakteristik zwar zu Orientierungswerten, jedoch nicht zu einer vollständigen elektrischen Charakterisierung der Strukturen. [119] Zunächst werden daher weitere bekannte optische Prüfmethode hinsichtlich ihrer Eignung für ihren Einsatz unter den speziellen Voraussetzungen Aerosol-Jet gedruckter Strukturen qualifiziert. Im Weiteren wird eine neue Charakterisierungsmethode auf Basis der Hochfrequenztechnik vorgestellt und für die Anwendung auf gedruckte Elektronik evaluiert.

4.1.1 Schliffpräparation

Neben den in der Literatur vorhandenen elektrischen Charakterisierungsmethoden bietet die Verwendung optischer Analyseverfahren durch Schliffpräparation oder Rasterelektronenmikroskopie eine weitere Möglichkeit für die qualitative Analyse.

Die Schliffpräparation ist seit Henry Clifton Sorby, der 1863 den ersten Einblick in das Feingefüge von Metallen ermöglichte, ein Standardverfahren zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften metallischer Bauteile. Vor der eigentlichen mikroskopischen Untersuchung findet das Einbetten der Probe in Epoxidharze statt. Hierbei stehen das Warmeinbetten als auch das Kalteinbetten als Möglichkeiten zur Verfügung. Beim Warmeinbetten werden die Probekörper Temperaturen von über 200 °C für mehr als 60 Minuten ausgesetzt und auch beim Kalteinbetten werden durch die Polymerisation kurzzeitig Temperaturen von über 120 °C erreicht. Im Anschluss daran wird durch das Schleifen und Polieren der Probe mit unterschiedlich gekörnten Schleifpapieren eine möglichst ebene Oberfläche erreicht. Als letzter Schritt kann die mikroskopische Untersuchung der Probe durchgeführt werden. [120–122]

Bei der Verwendung von Silbernanopartikel in der gedruckten Elektronik, kann diese Standarduntersuchung nur bedingt eingesetzt werden. Die Ursache dafür liegt im bei der Präparation entstehenden Wärmeeintrag. Durch diesen kann es zu einem nachträglichen An- und Verschmelzen der Nanopartikel kommen, was eine Aussage über die Effektivität der Sintermethode nachträglich verfälschen würde. Durch das Schleifen und Polieren besteht die zusätzliche Gefahr von Verschmierungen der vergleichsweise weichen Kanten, was die Aussagekraft der mikroskopischen Untersuchung deutlich vermindert. Die hohe Porosität der dünnen Metallschichten führt dazu, dass die Leiterbahnen unter der mechanischen Beanspruchung reißen können, was zu Fehlinterpretationen hinsichtlich der primären Ursache führt. Generell lassen sich mit herkömmlichen Lichtmikroskopen keine Auflösungen im Nanometerbereich erzielen, wodurch zwar eine Analyse der Schichtdicke möglich ist, jedoch keine detaillierte Aufnahme des Querschnitts und der Sinterhalse zwischen den einzelnen Nanopartikeln.

In Bild 44 sind beispielhaft Schliffpräparationen von gesputterten Aluminium- und Kupfer-Proben sowieso einer Aerosol-Jet gedruckten Probe auf PI ersichtlich. Eine eindeutige Analyse der Schichtdicke ist kritisch zu hinterfragen, da die Kanten aufgrund auftretender Verschmierungen nicht klar abzugrenzen sind und die Dicke vor allem bei Flächen Schwankungen

unterliegt. Als eine erste Orientierung können sie jedoch bedenkenlos herangezogen werden.

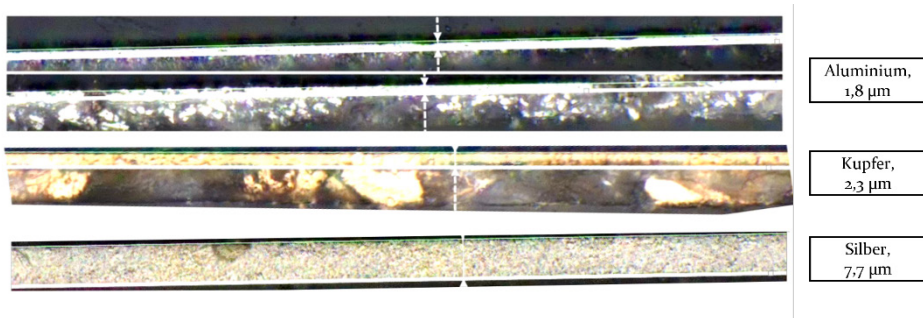


Bild 44: Schliffbild von gesputterten Aluminium (oben) und Kupfer (mittig) Proben sowie mit dem Aerosol-Jet hergestellte Leiterbahnen (unten) [P6]

4.1.2 Focused-Ion-Beam-Rasterelektronenmikroskopie

Eine Alternative zur Schliffpräparation ist die optische Analyse mittels des Focused Ion Beam Rasterelektronenmikroskops (FIB-REM). Mit dem fokussierten Ionenstrahl lassen sich gezielt Materialien abtragen und Querschnitte erstellen, während eine gleichzeitige Betrachtung auf Nanometerebene durch den Elektronenstrahl möglich ist. [123] Das erste Rasterelektronenmikroskop ist 1937 durch Manfred von Ardenne erfunden und in den 50er Jahren durch den Cambridge Professor Charles Oatley weiterentwickelt und kommerzialisiert worden. Heutzutage erreichen diese High-Tech-Geräte eine Auflösung von < 1 nm. Parallel ist die Idee der Oberflächenmodifikation durch Ionen zur Analyse der Oberflächenzusammensetzung entstanden. Seliger berichtet 1978 über die ersten Versuche mit einer Gallium Ionenquelle.

Heute dominieren noch immer galliumbasierte FIBs den Markt. Aufgrund der Reaktivität des Galliums kann es bei dem Beschuss der Probe mit Gallium-Ionen zu einer Verunreinigung der Probe kommen, weswegen in jüngster Zeit vermehrt Edelgase wie Xenon verwendet werden. Die Kombination der höheren Sputterraten und der hohen Aufprallenergie der schweren Xe-Ionen führt zu deutlich schnelleren Abtragungsraten und somit zu einer schnelleren Probenbearbeitung. [124]

Vor allem für die gedruckte Elektronik erweist sich das FIB-REM als bestes optisches Charakterisierungsverfahren. In Bild 45 sind beispielhaft die Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Aerosol-Jet gedruckten Strukturen auf PI dargestellt. Die linke Seite der Abbildung zeigt eine Quer-

schnittsaufnahme einer im Ofen gesinterten Probe (1 h bei 120 °C). Die Partikel liegen dicht beieinander und stehen am Anfangsstadium der Ausbildung von Sinterhälsen. Im Gegensatz dazu zeigt die mit UV-Strahlung gesinterte Probe eine vollständige Verdichtung und lose Partikel sind nicht mehr zu erkennen. Die mit NIR-Strahlung gesinterte Probe zeigt die Ausbildung erster Sinterhälse zwischen den Partikeln bei gleichzeitig hoher Porosität der Struktur.

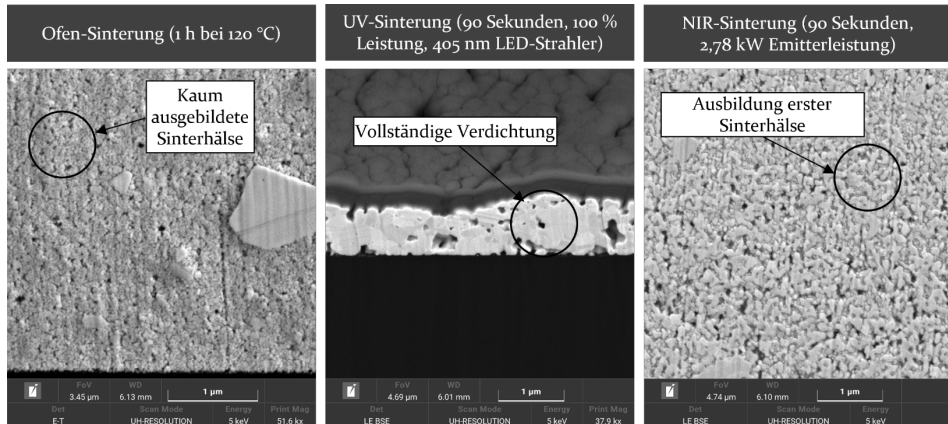


Bild 45: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Aerosol-Jet gedruckten Strukturen auf PI nach der Sinterung im Ofen und der Bestrahlung mit UV und NIR (von links nach rechts)

Weitergehende Analysen der Struktur können beispielsweise durch ein EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) erfolgen. Die Anregung der Atome durch einen Elektronenstrahl führt zur Aussendung von Röntgenstrahlung einer für das jeweilige Element spezifischen Energie. Dadurch lässt sich eine genaue chemische Charakterisierung von Füllstoffen und Einschlüssen durchführen. Eine Auswertung des noch vorhandenen organischen Coatings oder von Lösemittel ist jedoch nicht möglich.

In Bild 46 ist exemplarisch das EDX-Spektrum einer Leiterbahn nach der Ofensinterung dargestellt. Die ausgeprägten Peaks befinden sich an der für Silbernanopartikel charakteristischen Stelle bei ~ 3 keV. Der Siliziumpeak bei 1,80 keV stammt von der Probenpräparation. Mit Hilfe eines Siliziumwafers wird die Oberfläche der gedruckten Struktur geschützt und eine scharfe Kante für das Abtragen mit dem Ionen-Strahl ermöglicht. Geringe Mengen der Silizium-Atome sind während des Prozesses in die Silberschicht eingedrungen und werden dadurch detektiert.

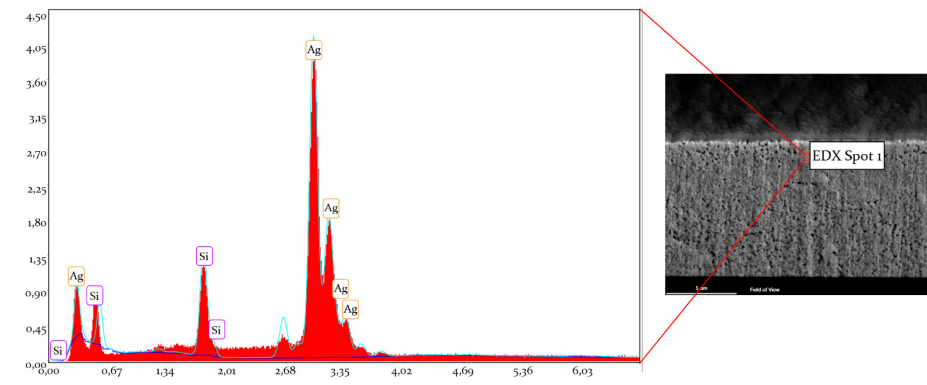


Bild 46: Exemplarische EDX-Analyse einer Aerosol-Jet gedruckten Struktur auf PI nach der Ofensinterung

Der wesentliche Nachteil der optischen Analyse mittels FIB-REM ist die aufwendige Probenpräparation, verbunden mit einer sehr langen Analysezeit und hohen Kosten. Zur Vermeidung unerwünschter elektrostatischer Aufladung der Probenoberflächen müssen, die bei der gedruckten Elektronik hauptsächlich eingesetzten Kunststoffsubstrate speziell behandelt werden. Durch einen vorgelagerten Sputterprozess oder einer Kohlenstoffbedampfung kann die statische Aufladung vermieden werden. Die Durchführung eines korrekten Schnitts durch die Probe zur Querschnittsanalyse kann je nach gewünschter Größe und Feinheit mehrere Stunden bis Tage in Anspruch nehmen und Bedarf einem hohen Expertenwissen im Bereich der Rasterelektronmikroskopie und insbesondere der FIB-REM-Anwendung.

Zusammenfassen lassen sich die Nachteile der FIR-REM-Analyse wie folgt:

1. Aufwendige Probenpräparation und somit nicht für die Serien-Produktion geeignet
2. Lange Schnitt- und Analysezeiten
3. Enormes Expertenwissen bei der Anwendung notwendig
4. Hohe Kosten
5. Zerstörendes Verfahren
6. Qualitative optische Analyse ohne Aussage zu den elektrischen und mechanischen Eigenschaften

Daher wird erneut die Notwendigkeit einer neuen, elektrischen und nicht zerstörenden Charakterisierungsmethode für die gedruckte Elektronik hervorgehoben.

4.2 Ausnutzung von Hochfrequenzeffekten zur Strukturcharakterisierung

Zur Erstellung eines elektrischen Charakterisierungsmodells wird auf das in der Hochfrequenztechnik als Skin-Effekt bezeichnete Phänomen zurückgegriffen. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Metallen dient als Basis für das Modell. Deren Verwendung zur Analyse der Strukturbeschaffenheit bei leitfähigen dünnen Schichten, ist in der Wissenschaft bis dato einmalig, wenn auch HF-Effekte bereits in unterschiedlichen Quellen zur Analyse eingesetzt wurden, wie beispielsweise zur Analyse von Kabeln [125]. Im Rahmen der Forschungsarbeiten liegt der Fokus auf den Besonderheiten gedruckter Elektronik, die sich aus Druckprozessunregelmäßigkeiten und unterschiedlicher Sinterqualität im Inneren der Struktur ergeben. Im Vordergrund steht dabei eine schnelle und reproduzierbare Analyse der elektrischen Leitfähigkeit zu ermöglichen. Zu Beginn erfolgt eine eingehende Erläuterung sowohl des Skin-Effekts als auch der Streuparameter und deren Verkettung. Im Anschluss daran wird das aufgestellte Modell detailliert erläutert, wobei besonderes Augenmerk auf den Messaufbau der durchgeführten Versuche gelegt wird. Die Abbildung des Messaufbaus in einem analytischen Modell vermittelt ein tiefgehendes Prozessverständnis.

Transmission elektromagnetischer Wellen im Metall und Dielektrikum

Der erste wesentliche Effekt, welcher für die Modellentwicklung notwendig ist, ist die Transmission elektromagnetischer Wellen. Bei der elektromagnetischen Welle, wie in Bild 47 schematisch dargestellt, handelt es sich im physikalischen Sinne um sich ausbreitende Schwingungen des elektromagnetischen Feldes. Bei ebenen (transversalen) Wellen stehen hier das magnetische (graue Kurve) und elektrische (schwarze Kurve) Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aufeinander. Während sich elektromagnetische Wellen im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ungehindert ausbreiten können, werden sie von Metallen, welches aus gebundenen Ionen und frei beweglichen elektrischen Ladungsträgern besteht, beeinflusst.

Transversale elektromagnetische Wellen werden in Metallen stark gedämpft in Abhängigkeit der Leitfähigkeit und Schichtdicke der Metallschicht. Trifft eine Welle auf eine Metalloberfläche, dringt ein Teil der Welle in eine dünne Oberflächenschicht des Metalls ein, was als Skin-Effekt bezeichnet wird. Ein anderer Teil wird vom Metall reflektiert. [126] Findet die Betrachtung einer dielektrischen Schicht statt, wird die einfallende

Welle mit dem Reflexionsfaktor reflektiert und setzt sich anschließend mit dem Transmissionsfaktor gewichtet hinter der Schicht fort. [127]

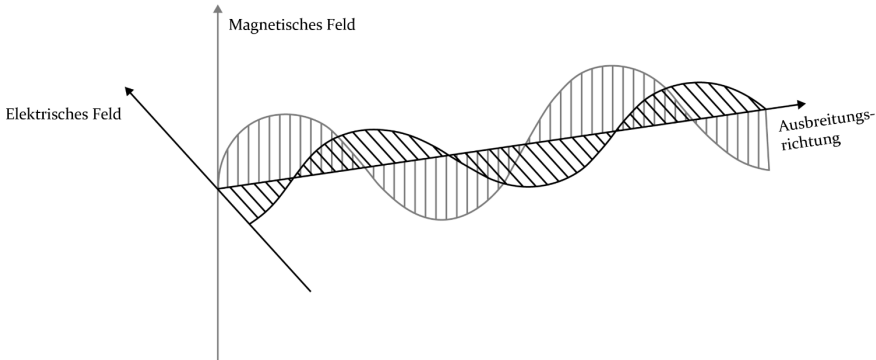


Bild 47: Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle und ihrer Ausbreitungsrichtung, in Anlehnung an [127]

Skin-Effekt

Unter Annahme einer ideal glatten Oberfläche nimmt innerhalb leitfähiger Materie die Amplitude einer harmonischen elektromagnetischen Welle und damit auch der Stromdichte J exponentiell mit dem Abstand z zur Oberfläche ab.

$$J(z, t) = \hat{j} e^{j\omega t} e^{-(1+j)\frac{z}{\delta_{skin}}} \quad (16)$$

Elektromagnetische Wellen dringen daher nur wenig ins Innere des Leiters ein, sondern nur in dessen „Haut“, weswegen dieses Phänomen als „Skin-Effekt“ bezeichnet wird. Das Gleiche gilt für die Stromdichte. Der aus dem exponentiellen Abfall resultierende Gesamtstrom ist dabei gleich dem Strom, der sich ergäbe, wenn der Scheitelwert \hat{j} der Stromdichte an der Oberfläche bis in die Tiefe δ_{skin} konstant vorläge und weiter im Leiterinneren Null wäre. Leiteroberflächen verhalten sich damit so, als bestünden sie nur aus der äquivalenten Leitschichtdicke δ_{skin} , die daher auch – etwas irreführend – als „Eindringtiefe“ oder „Skintiefe“ bezeichnet wird. [128]

Die Skintiefe δ_{skin} ergibt sich aus

$$\delta_{skin} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (27)$$

mit

ω Kreisfrequenz

μ magnetische Permeabilität als Produkt der Vakuumpermeabilität μ_0 und der relativen Permeabilität μ_r

σ spezifische Leitfähigkeit des Materials

Auf die mathematische Herleitung der Skintiefe aus der vektoriellen Helmholtz-Gleichung wird an dieser Stelle verzichtet und auf [128, 129] verwiesen.

Gleichung (27) beschreibt die Änderung der Eindringtiefe, welche mit zunehmender Frequenz, Permeabilität oder Leitfähigkeit des Materials abnimmt. [129–131] In Bild 48 ist die auf den Wert der Oberfläche normierte Feldstärke beziehungsweise Stromdichte in der Tiefe als ein Vielfaches von δ_{skin} aufgezeigt. Die schwarz gestrichelte Hüllkurve zeigt den Verlauf der Stromdichte nach (16).

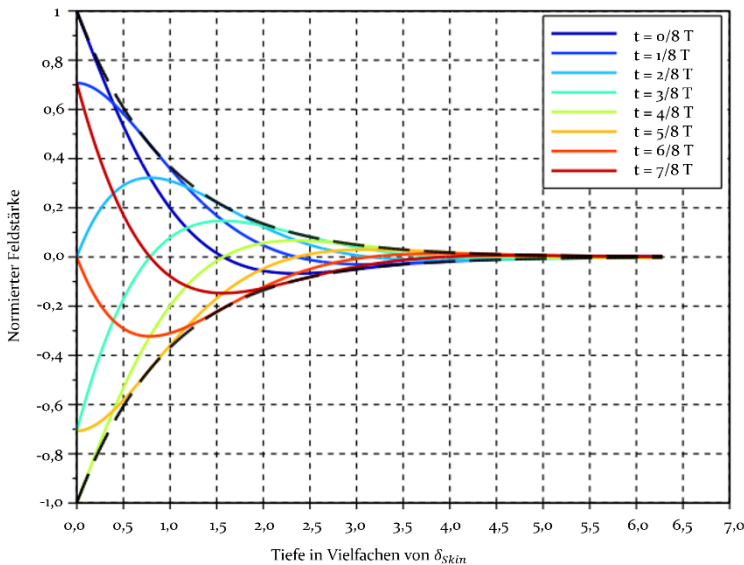


Bild 48: Magnetfeld und Stromdichte aufgrund des Skin-Effekts bei verschiedener Phasenlage, in Anlehnung an [128]

Relevant für die Nutzung des Skin-Effekts zur Analyse der Sinterung über den Leitungsquerschnitt ist die Eindringtiefe über der Frequenz, welche exemplarisch für verschiedenen Leitfähigkeiten in Bild 49 gezeigt wird.

Die grüne Kurve zeigt bei einer elektrischen Leitfähigkeit von 6 MS/m, was einer Leitfähigkeit von 10 % rel. zum Silbervollmaterial entspricht, eine Eindringtiefe von 10 µm bei 0,5 GHz. Grundsätzlich gilt, je besser die Leitfähigkeit, desto geringer ist die Eindringtiefe in den Leiter, wie die schwarze und blaue Kurve zeigen. So beträgt die Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes bei einer Leitfähigkeit von 30 MS/m bei 0,5 GHz noch 5 µm und bei 62 MS/m 3 µm.

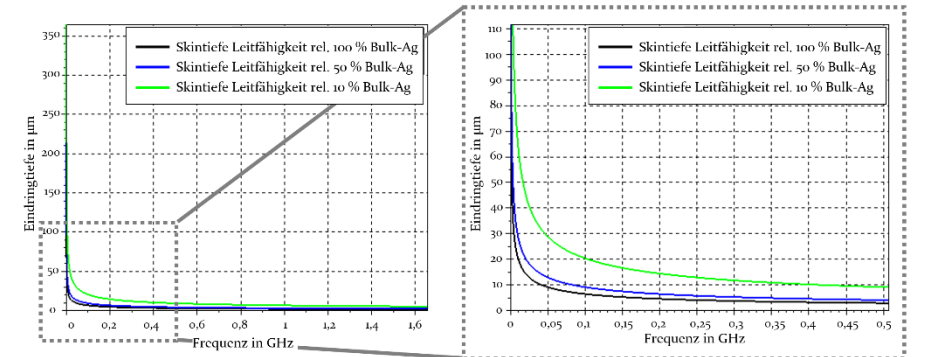


Bild 49: Darstellung der Eindringtiefe in Abhängigkeit der Leitfähigkeit des Leiters

Die Eindringtiefe bei Kupfer einer elektrischen Leitfähigkeit von 57 MS/m und einer Frequenz von 1 GHz beträgt 2,1 µm.

Streuparameter

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Leitungen und Bauelementen der Hochfrequenztechnik wird durch sogenannte Wellengrößen beschrieben. Diese sind definiert durch die Quadratwurzel der mit der Welle sich ausbreitenden Leistung, enthalten Betrag und Phase und sind daher im Allgemeinen komplexwertig. An jedem Anschluss („Tor“, ‘port’) einer Leitung oder eines Bauelements kann eine auf diesen einlaufende (‘advancing’, Wellengröße a) und eine von diesem rücklaufende (‘backscattered’, Wellengröße b) Welle vorliegen, wie schematisch in Bild 50 gezeigt. Das Verhalten von Leitungen und Bauelementen kann dann durch eine Streumatrix S beschrieben werden, deren Elemente sich aus den Wellengrößen an den einzelnen Toren ergeben:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (19)$$

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (20)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (21)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (22)$$

Wie folgt stellt sich die Bedeutung der einzelnen Streuparameter dar:

1. S_{12} heißt Rückwärtstransmissionsfaktor bei angepasstem Eingang
2. S_{11} heißt Eingangsreflexionsfaktor bei angepasstem Ausgang
3. S_{21} heißt Vorwärtstransmissionsfaktor bei angepasstem Eingang
4. S_{22} heißt Ausgangsreflexionsfaktor bei angepasstem Eingang

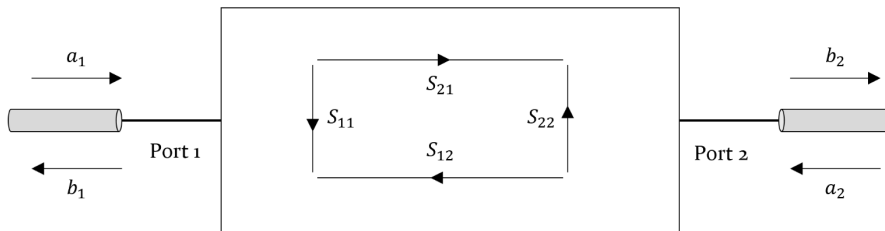


Bild 50: Darstellung der Streuparameter eines Zweitors, in Anlehnung an [127]

Die Reflexionsfaktoren S_{ii} werden oft als Rückflussdämpfung (RL) in dB dargestellt:

$$RL (dB) = 20 \log_{10} |S_{ii}| \quad (23)$$

Aus den Transmissionsfaktoren wird die Einfügedämpfung (IL) abgeleitet.

$$IL (dB) = 20 \log_{10} |S_{ij}| \quad (24)$$

4.3 Konzipierung einer neuartigen Charakterisierungsmethode zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit gedruckter Silbernanopartikelintinten

Im folgenden Abschnitt wird auf den neu entwickelten Messaufbau zur Versuchsdurchführung eingegangen. Im Anschluss daran werden die für das numerische Modell notwendigen mathematischen Grundlagen im Detail erläutert. Durch die Transmission der elektromagnetischen Welle durch Metall und das sich anschließende Dielektrikum, soll die Leitfähigkeit des gedruckten Leiters erstmalig auf diese Weise bestimmt werden.

4.3.1 Darstellung des realen Messaufbaus aus APC7-Verbindern und gedruckten leitfähigen Schichten

Zur Messung der Streuparameter wurde ein E5061B Vektornetzwerkanalysator (VNA) der Firma Keysight verwendet. Der Frequenzbereich liegt zwischen 5 Hz und 3 GHz aufgrund der niedrigen Transmission durch Metall, mit einer Bandbreite von 100 Hz zur Reduzierung des Messrauschens. Da die zu charakterisierende Probe als flache Scheibe zwischen die koaxialen Messtore des Netzwerkanalysators eingefügt werden soll, kann kein koaxiales Stecker-/Buchseverbindersystem verwendet werden, sondern es muss ein geschlechtsloser Koaxialverbinderstandard eingesetzt werden. Die Kalibrierung des Netzwerkanalysators zur Systemfehlerkorrektur für den gesamten verwendeten Messbereich wird daher mit dem koaxiale Kalibriersatz für APC7-Verbindern vorgenommen. Hierin sind drei unterschiedliche Kalibrierstandards enthalten:

1. Open (Leerlauf)
2. Short (Kurzschluss)
3. Match (Abschluss)

Mit diesen und der Durchverbindung (Through) wird die TOSM-Kalibrierung (Through-Open-Short-Match) durchgeführt, für welche insgesamt sieben Kalibrierungsschritte notwendig sind. Die Systemfehlerkorrektur eliminiert den Einfluss der Messleitungen bis zur sogenannten Referenzebene der eingesetzten Kalibrierstandards. Die Messung liefert somit nur die Eigenschaften der zwischen den geschlechtslosen Verbindern eingelegten Proben.

In Bild 51 ist links der verwendete APC7-Verbinder mit vergoldetem Innen- und Außenleiter abgebildet. Die kreisförmigen Aerosol-Jet gedruckten Proben werden mit der Silberschicht Richtung Port 1 des Netzwerkanalysators zwischen die beiden Verbinder eingelegt. Die Polyimidfolie zeigt dementsprechend Richtung Port 2 des Netzwerkanalysators.

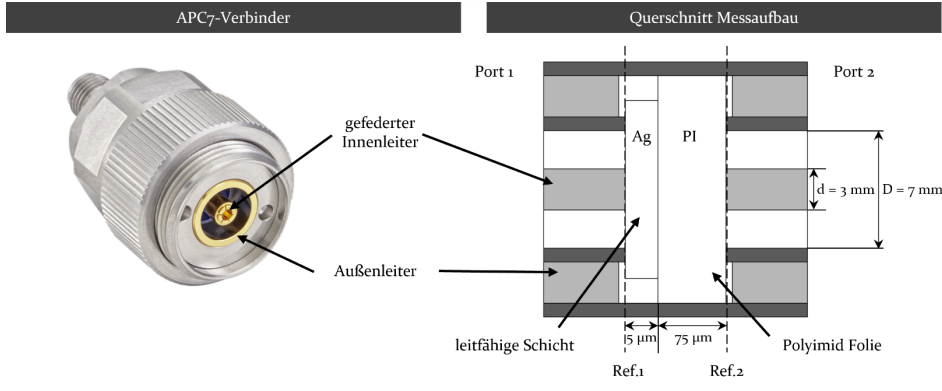


Bild 51: Bild des verwendeten APC7-Verbinders (links) und schematische Querschnittsdarstellung (nicht maßstabsgetreu) des Messaufbaus innerhalb zweier APC7-Verbinders (rechts)

Die Silberschicht weist erwartungsgemäß Schichtdicken von einigen Mikrometern auf; ihre Leitfähigkeit kann im Bereich von wenigen MS/m bis einige 10 MS/m liegen. Beide Größen sollen durch die Messung bestimmt werden.

Als Substratmaterial wird eine temperaturbeständige Polyimidfolie mit einer Stärke von 75 µm verwendet. Die folgenden Materialparameter werden anhand des Datenblattes ins Modell übertragen:

1. $\epsilon_r = 3,5$ relative Permittivität
2. $\tan \delta = 0,004$ dielektrischer Verlustfaktor
3. $\sigma = \frac{1}{1,4} \cdot 10^{-17}$ MS/m spezifische Leitfähigkeit

Rechts im Bild 51 ist der zu Grunde liegende Aufbau des Modells zum detaillierteren Verständnis schematisch dargestellt. Er besteht aus einer gedruckten Silberschicht (Ag) und dem Dielektrikum (PI) zwischen den geschlechtslosen Koaxialverbindern, deren Stirnflächen nach der Kalibrierung die Referenzebenen bilden.

Die Schichtdicken beider Materialien liegen im Mikrometerbereich und sind damit wesentlich kleiner als die relevanten Querabmessungen (7 mm und 3 mm) der Koaxialverbinder.

4.3.2 Mathematisches Modell des Messaufbaus

Die Transmission der elektromagnetischen Welle durch Materie sowie die Reflexion und Transmission an Grenzflächen zwischen Materialien unterschiedlicher Ausbreitungseigenschaften kann durch S-Matrizen beschrieben werden. Die Ausbreitungseigenschaft im Dielektrikum einer Zweileiteranordnung, wie der hier verwendeten Koaxialleitung, wird üblicherweise beschrieben durch ihren Leitungswellenwiderstand Z_L . Dieser ist bei der Koaxialleitung gegeben durch

$$Z_L = \frac{Z_{F,0}}{n} \cdot \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad (25)$$

Darin ist:

$Z_{F,0} = \mu_0 c_0$ der Feldwellenwiderstand des Vakuums

n die Brechzahl des Materials

D der Innendurchmesser des Außenleiters der Koaxialleitung

d der Außendurchmesser des Innenleiters der Koaxialleitung

Während der Feldwellenwiderstand des Vakuums durch allgemeine Konstanten gegeben ist, beschreibt die Brechzahl n die Materialeigenschaft des Ausbreitungsmediums und der anschließende Faktor die Geometrie der Leitung.

Dabei lassen sich sowohl nicht oder schlecht leitende Materialien (Dielektrika) als auch leitende Materialien einheitlich durch eine komplexe Brechzahl n nach [128] beschreiben:

$$n = n_R - jn_I = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \sqrt{1 - j \tan \delta_\mu} \sqrt{1 - j(\tan \delta_\varepsilon + \tan \delta_\sigma)} \quad (26)$$

Sie beinhaltet die relative Permittivität ε_r , die relative Permeabilität μ_r , den magnetischen Verlustfaktor $\tan \delta_\mu$, den dielektrischen Verlustfaktor $\tan \delta_\varepsilon$ sowie den Verlustfaktor $\tan \delta_\sigma$, der die ohmschen Verluste aufgrund der Leitfähigkeit σ beschreibt:

$$\tan \delta_\sigma = \frac{\mu_0 c_0^2 \sigma}{\varepsilon_r \omega} \quad (27)$$

Da hier nur Materialien mit vernachlässigbaren magnetischen Eigenschaften betrachtet werden, gilt $\mu_r = 1$ und $\tan \delta_\mu = 0$ wodurch Formel (26) wie folgt angepasst werden kann:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \sqrt{1 - j(\tan \delta_\varepsilon + \tan \delta_\sigma)}} \quad (28)$$

Beim Übergang vom Koaxialverbinder in die Silberschicht ändert sich die Brechzahl des Materials von 1 (Luft zwischen Innen- und Außenleiter) auf die von den Materialeigenschaften des Metalls abhängige Brechzahl. Dadurch wird ein Teil der Wellenenergie reflektiert und der andere Teil in das Metall transmittiert. Das Verhältnis der Amplituden von reflektierter und einlaufender Welle ist gegeben durch den Reflexionsfaktor

$$r = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (29)$$

Darin bedeuten Z_0 und n_0 den Wellenwiderstand und die Brechzahl des Materials, aus dem die einlaufende Welle kommt und Z_1 und n_1 den Wellenwiderstand und die Brechzahl des Materials, in das sie transmittiert wird.

Die Streumatrix eines solchen Wellenwiderstandssprungs ist nach [132]

$$S_Z = \begin{pmatrix} r & t \\ t & -r \end{pmatrix} \quad (30)$$

mit

$$t = \sqrt{1 - r^2} \quad (31)$$

Die Ausbreitung der in das Metall transmittierten Welle durch eine Schicht der Dicke l_t wird durch folgende Streumatrix modelliert nach [132]:

$$S_T = \begin{bmatrix} 0 & e^{-jkl_t} \\ e^{-jkl_t} & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Darin ist $k = k_R - jk_I$ die komplexe Wellenzahl. Sie ist in guten Leitern ($\varepsilon_r = 1$, $\tan \delta_\sigma \gg 1 \gg \tan \delta_\varepsilon$) gegeben nach [128]:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{\omega}{c_0} n \approx \frac{\omega}{c_0} \sqrt{-j \tan \delta_\sigma} = (1 - j) \frac{1}{\delta_{Skin}} \quad (33)$$

Die S-Matrix beschreibt damit sowohl die beim Durchgang durch die Metallschicht auftretende Phasenverschiebung (beschrieben durch $Re\{k\}$) als auch die darin stattfindende Dämpfung (beschrieben durch $Im\{k\}$) aufgrund des Skineffekts. Die Metallschichtdicke l_t ist hier in der Größenordnung einiger Mikrometer, ebenso die Eindringtiefe δ_{Skin} und damit auch die Wellenlänge $\lambda = 2\pi\delta_{Skin}$. Die Feldverteilung im Metall ändert sich

daher nahezu nicht gegenüber der in der Koaxialleitung, jedoch müssen Phasenverschiebung und Dämpfung durch die Streumatrix nach Formel (32) berücksichtigt werden.

Der Impedanzsprung vom Metall in die PI-Folie wird wiederum durch eine Streumatrix gemäß Formel (30) beschrieben.

In der PI-Folie ist $\epsilon_r = 3,5$ und $\tan \delta_\sigma \ll \tan \delta_\epsilon = 0,004 \ll 1$. Damit wird

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{\omega}{c_0} n \approx \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\epsilon_r} \quad (34)$$

rein reell, da die Dämpfung (beschrieben durch $\tan \delta_\epsilon$) vernachlässigt werden kann. Die Wellenlänge $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ ist hier in der Größenordnung 10 cm und damit wesentlich größer als die Schichtdicke. Auch hier ändert sich die Feldverteilung nahezu nicht gegenüber der in der Koaxialleitung. Anders als in der Metallschicht muss keine Phasenverschiebung berücksichtigt werden und die PI-Folie kann durch die Streumatrix eines konzentrierten Bauelements beschrieben werden. Da die PI-Folie die leitende Verbindung zum folgenden Koaxialverbinder unterbricht, verhält sie sich wie eine verlustbehaftete Serienkapazität der Impedanz

$$Z_S = \frac{1}{j\omega C(1 - j \tan \delta_\epsilon)} \quad (35)$$

Diese Längsimpedanz verbindet die Metallschicht mit der Referenzebene des zweiten Koaxialverbinders. Ihre Streumatrix ist nach [132] gegeben als

$$S_{Z_S} = \frac{1}{Z_S + 2Z_0} \begin{pmatrix} Z_S & 2Z_0 \\ 2Z_0 & Z_S \end{pmatrix} \quad (36)$$

Das aufgestellte Modell beinhaltet die Impedanzsprünge sowie die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle innerhalb der leitfähigen Schicht und durch das Substrat:

1. $S_{Z, Z_0 \rightarrow Z_{LS}}$ ist die Streumatrix des Wellenimpedanzsprungs beim Übergang des APC7-Verbinders zur Metallschicht
2. $S_{T, LS}$ ist die Streumatrix der Transmission der elektromagnetischen Welle im Metallgefüge
3. $S_{Z, Z_{LS} \rightarrow Z_0}$ ist die Streumatrix des Wellenimpedanzsprungs beim Übergang von der metallischen Schicht zum Dielektrikum
4. S_{Z_S} ist die Streumatrix der PI-Folie, welche die Metallschicht mit der Referenzebene des zweiten Koaxialverbinders verbindet

Vollständig lässt sich das Modell für den Versuchsaufbau, wie in Bild 52 schematisch gezeigt, darstellen.

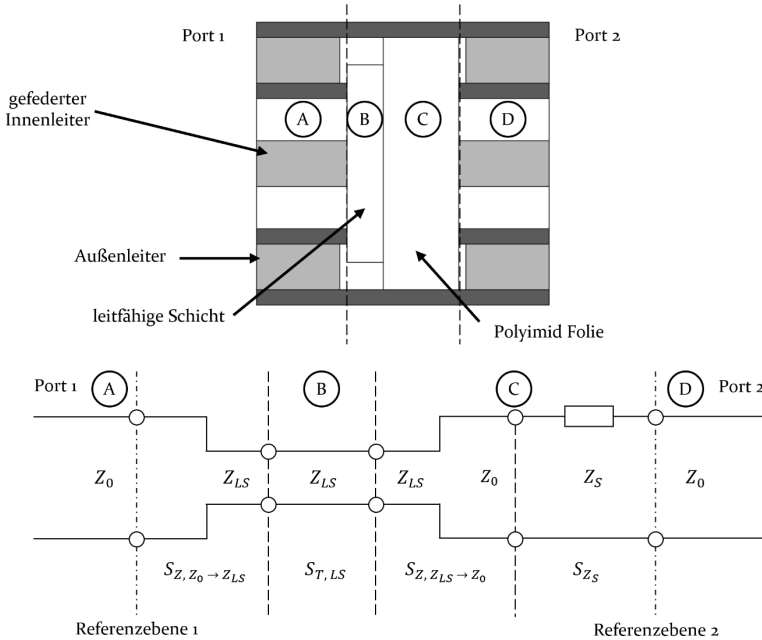


Bild 52: Schematische Darstellung des mathematisch vollständig beschriebenen Messaufbaus

Die Streumatrix S des gesamten mathematischen Modells ergibt sich durch Verkettung der einzelnen Streumatrizen. Für die Verkettung zweier Streumatrizen S_A und S_B wird dabei folgende Gleichung nach [132] verwendet:

$$S_{AB} = \frac{1}{1 - S_{A22}S_{B11}} \cdot \begin{pmatrix} S_{A11} - \det(S_A) \cdot S_{B11} & S_{A12}S_{B12} \\ S_{A21}S_{B21} & S_{B22} - \det(S_B) \cdot S_{A22} \end{pmatrix} \quad (37)$$

Mit dieser Verkettung werden auch die auftretenden Mehrfachreflexionen zwischen den einzelnen Übergängen erfasst.

In Bild 53 sind exemplarisch die Beträge der an einer Messprobe gemessenen S-Parameter dargestellt, wobei S_{11} und S_{22} die Reflexion an den jeweiligen Ports beschreiben und S_{12} und S_{21} die Transmission. Der unterschiedliche Verlauf von S_{11} und S_{22} ergibt sich aus der Reflexion der Silberschicht gefolgt von der PI-Folie an Port 1 und der umgekehrten Reihenfolge an Port 2, während die Transmissionsparameter in beiden Richtungen erwartungsgemäß gleich sind („lineare passive und isotrope Zweitore sind reziprok“).

4.3 Konzipierung einer neuartigen Charakterisierungsmethode zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit gedruckter Silbernanopartikelinten

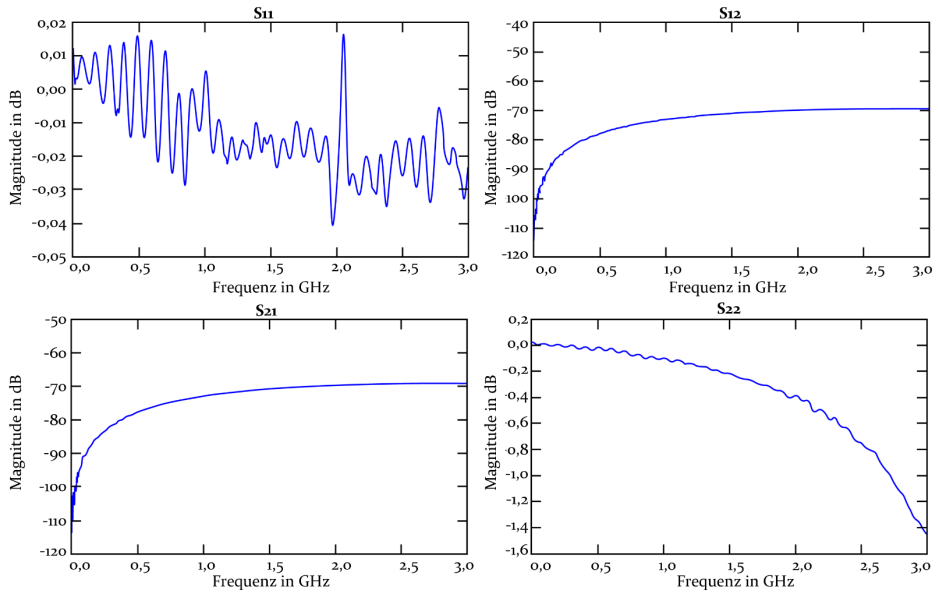


Bild 53: Exemplarische Darstellung der Streuparameter einer Messprobe, die für die Berechnung herangezogen werden

Die hier interessierenden Parameter Leitfähigkeit und Schichtdicke können zusammen mit n (26), $\tan \delta_\sigma$ (27), r (29) und k (33) aus den Elementen der Streumatrizen S_T und S_Z bestimmt werden, während Z_S aus der Streumatrix S_Z, S_{22} bestimmt werden kann. Um an die einzelnen Streumatrizen zu gelangen, gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Grundsätzlich kann Z_S in guter Näherung aus S_{22} ermittelt werden. Genauer gelingt dies aber durch eine Messung der unbedruckten PI-Folie, wodurch S_Z allein gemessen wird. Mit dem bekannten Z_S kann nun aus S_{22} der Gesamtstreumatrix auf die zu bestimmenden Parameter Leitfähigkeit und Schichtdicke der Metallschicht zurückgerechnet werden.

In diesen Forschungsarbeiten wird die Newton-Raphson-Methode zur Bestimmung der Leitfähigkeit gewählt. Durch die Subtraktion der berechneten S-Parameter von den gemessenen Werten ($S_{21}m$) und die Variation der Modellleitfähigkeiten ($S_{21}(\sigma)$), findet eine schrittweise Annäherung der Kurven bis zum Erreichen einer minimalen Abweichung statt, wie folgt mathematisch beschrieben [P6, P7]:

$$|S_{21}m - S_{21}(\sigma)| = 0 \quad (38)$$

Alternativ kann die Schichtdicke auch durch mechanische oder optische Messungen ermittelt werden.

4.3.3 Verifizierung des analytischen Modells mittels CST-Feldsimulation

Zur Überprüfung des analytischen Modells findet mittels der Software CST Studio Suite die Simulation der Feldverteilung des Messaufbaus am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik statt. Die Probe wird durch eine leitfähige sowie nichtleitende Schicht modelliert. Damit eine vollmetrische Gitternetzstruktur erzwungen wird, ist die Auswahl der Materialtypen in der Software auf „normal“ zu setzen. Dadurch wird die Berechnung der magnetischen und elektrischen Felder auch innerhalb der metallischen Bereiche ausgeführt und eine repräsentative Darstellung des realen Messaufbaus ist möglich.

Die Simulation der APC7-Verbinder und der Messprobe ist in Bild 54 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Koaxialstruktur mit Innen- und Außenleiter als Verbindung zum Messgerät, die notwendig ist, um die Feldverteilung zu erzeugen sowie eine Simulation der Messprobe zwischen den beiden APC7-Verbindern.

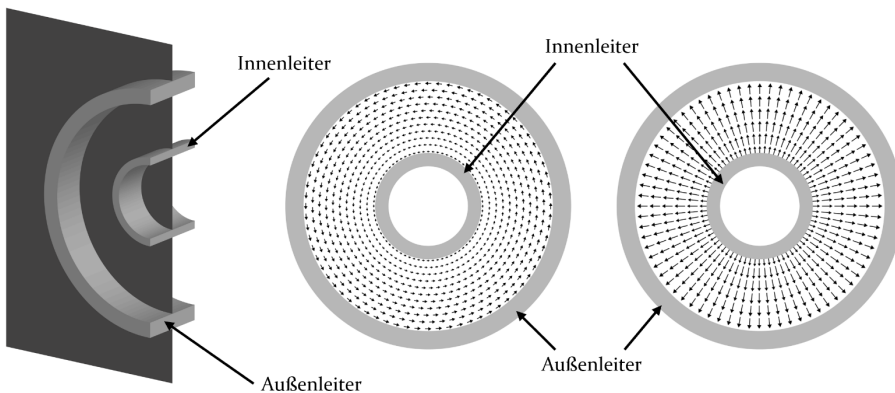


Bild 54: CST-Simulation des verwendeten APC7-Verbinders mit Messprobe (links) und resultierendes zirkular um die Mittelachse verlaufendes Magnetfeld (Mitte) und radial verlaufendes elektrisches Feld (rechts) zwischen Innen- und Außenleiter

Mittig im Bild dargestellt, ist das zirkular verlaufende magnetische Feld zwischen Innen- und Außenleiter, die rechte Darstellung zeigt das radial verlaufende Feld. Die Referenzebene wird analog zur realen messtechnischen Kalibrierung an das Ende des APC7-Verbinders gelegt. Somit bleibt

die Feldverteilung erhalten, während der Einfluss der beiden Verbindern auf die Simulation der Messprobe verschwindet. Es gilt zu beachten, dass die Simulationssoftware nicht auf eine detaillierte Analyse des Strukturinneren des Metalls ausgelegt ist. Da die Wellenlänge im Dielektrium viel größer als im Metall ist, kann als Folge hiervon keine Simulation der gesinterten Schicht stattfinden, was erneut die Notwendigkeit eines analytischen Modells hervorhebt. Die CST-Simulation stellt jedoch detailliert das erzeugte elektromagnetische Feld des Messaufbaus dar, weshalb grundlegende Fehler im Modell somit ausgeschlossen werden können.

5 Elektrische Charakterisierung des Sinterergebnisses mittels Hochfrequenztechnik

In den nächsten Abschnitten wird die Anwendung des elektrischen Charakterisierungsverfahrens auf Aerosol-Jet gedruckte Probekörper beschrieben. Hauptaugenmerk liegt auf der Verwendung des Standardsinterprozesses mittels Konvektion bei unterschiedlichen Sintertemperaturen und dem Xe-Blitzlichtsintern als alternative Sintermethode zur Gegenüberstellung der Ergebnisse.

5.1 Herstellung der Aerosol-Jet gedruckten Strukturen

Die Aerosol-Jet gedruckten Proben werden mit den in Kapitel 3.2.1 aufgezeigten Standardparametern sowie der Tinte Paru 007 hergestellt. Es werden Kreise mit einem Durchmesser von 10 mm spiralförmig auf das Substrat (\varnothing 14 mm) aufgebracht. Die Druckrichtung findet von innen nach außen statt, um einen kontinuierlichen Druckprozess zu ermöglichen, wie schematisch in Bild 55 gezeigt. Der aus dieser Druckstrategie resultierende negative Effekt des Oversprays, welcher durch den auftreffenden Sheath-Gasstrom entsteht, kann bei den Messungen vernachlässigt werden, da er sich im Messaufbau außerhalb des Messbereichs befindet. Somit wird eine Verfälschung der Messergebnisse ausgeschlossen.

Eine umgekehrte Druckrichtung (von außen nach innen) hätte den negativen Effekt einer ungleichmäßigen Schichtdicke im Kreismittelpunkt im Bereich des Innenleiters des APC7-Verbinders zur Folge, was einen gravierenden Einfluss auf das Messergebnis hat. Ursache für eine größere Schichtdicke im Mittelpunkt im Vergleich zu den Rändern der Messprobe ist ein kurzzeitig erhöhter Materialauftrag aufgrund verzögerter Shutterzeiten. Wird der Shutter zur Unterbrechung des Aerosolflusses betätigt, findet einige wenige Millisekunden nachlaufend weiter Materialauftrag statt, bevor dieser vollständig unterbrochen ist. Aus prozesstechnischer Sicht ist der nachlaufende Aerosolfluss zwar zu kontrollieren, er kann jedoch nicht vollständig vermieden werden.

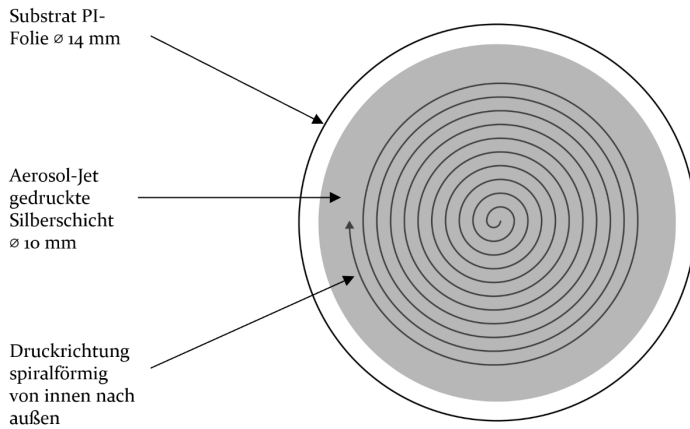


Bild 55: Schematische Darstellung einer Messprobe mit der Druckrichtung von innen nach außen

Bild 56 zeigt eine gedruckte und eingelegte Probe in den APC7-Verbinder, welche im Messaufbau verwendet wird. Der Durchmesser der Messproben von 14 mm stellt das exakte Positionieren der Probe in den APC7-Verbinder sicher. Während des Messvorgangs ist das Verrutschen der Probe im Verbinder somit ausgeschlossen.

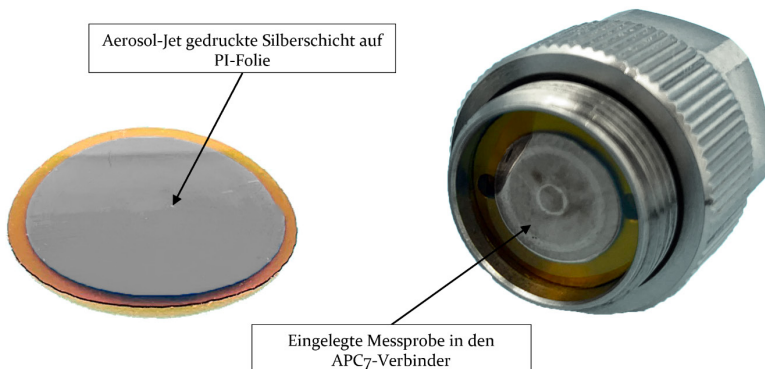


Bild 56: Aerosol-Jet gedruckte Silbernanopartikelschicht auf Polyimid (links) und eingelegte Messprobe in den APC7-Verbinder (rechts)

5.2 Anwendung der HF-Messung zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit

Nach dem Aerosol-Jet-Druck der Messproben findet die Sinterung der gedruckten Probekörper statt. Für die Anwendung und Validierung des Messverfahrens werden das konventionelle Ofensintern sowie das Xe-Blitzlichtsintern herangezogen.

5.2.1 Standardsinterprozess: Wärmebehandlung im Ofen

Die Proben werden nach dem Bedrucken im Konvektionsofen Binder FD 53 für 30 Minuten bei 80 °C, 120 °C, 160 °C und 200 °C verdichtet. Durch die unterschiedlichen Sintertemperaturen werden verschiedene Leitfähigkeiten der Silberschicht ausgebildet, welche im neuen Messverfahren dargestellt werden. Ziel der Sinterung ist nicht das Finden der idealen Prozessparameter, sondern die Herstellung von Messproben, die hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit deutliche Unterschiede aufweisen und diese messtechnisch ausgewertet werden können.

Vorab wird an jeweils einer Probe eine optische Analyse mittels Focused-Ion-Beam (FIB) Rasterelektronenmikroskop (REM) Analyse durchgeführt. Verwendet wird hierbei das FIB-REM Amber X der Firma Tescan. Es handelt sich um ein mit Xenon betriebenes Hochpräzisions-Analysegerät, mit dem Schnitte bis zu 1 mm möglich sind.

Die Ergebnisse der optischen Analyse sind in Bild 57 dargestellt.

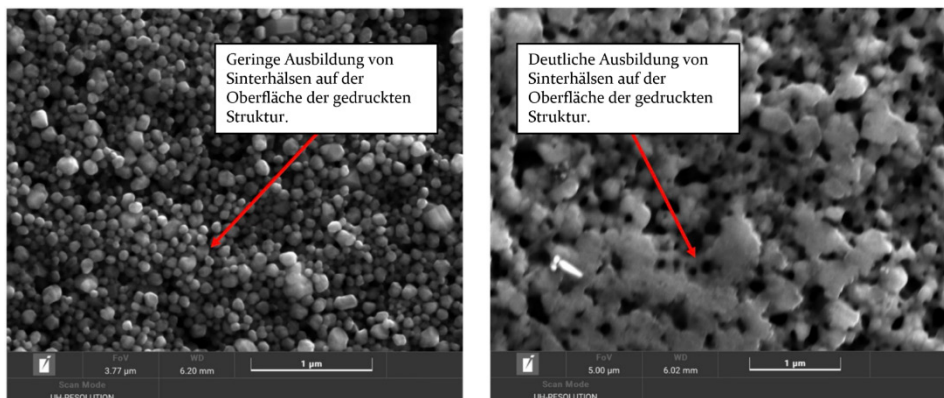


Bild 57: Rasterelektronenaufnahme der Oberfläche der Aerosol-Jet gedruckten Proben bei einer Sintertemperatur von 160 °C (links) und 200 °C (rechts)

Deutlich sichtbar ist die unterschiedliche Ausbildung von Sinterhalsen an der Oberfläche der gedruckten Struktur der bei 160 °C (links) und bei 200 °C (rechts) gesinterten Messproben. So befinden sich auf der Oberfläche der 160 °C verdichteten Probe die einzelnen Nanopartikel lose nebeneinander. Eine Ausbildung von Sinterhalsen hat zu diesem Zeitpunkt nur vereinzelt stattgefunden. Ein vergleichbares Bild zeigt sich ebenfalls bei den bei 80 °C und 120 °C gesinterten Messproben. Wird die Oberflächenstruktur der 200 °C analysiert, sind deutliche Sinterhalse und ein Verschmelzen der Silbernanopartikel erkennbar. Die runde Form der Partikel hat sich vollständig aufgelöst. Wird der Maßstab auf weiter reduziert, wie in der Aufnahme in Bild 58 gezeigt, lässt sich der unterschiedliche Sintergrad auf der Oberfläche beider Proben noch deutlicher erkennen.

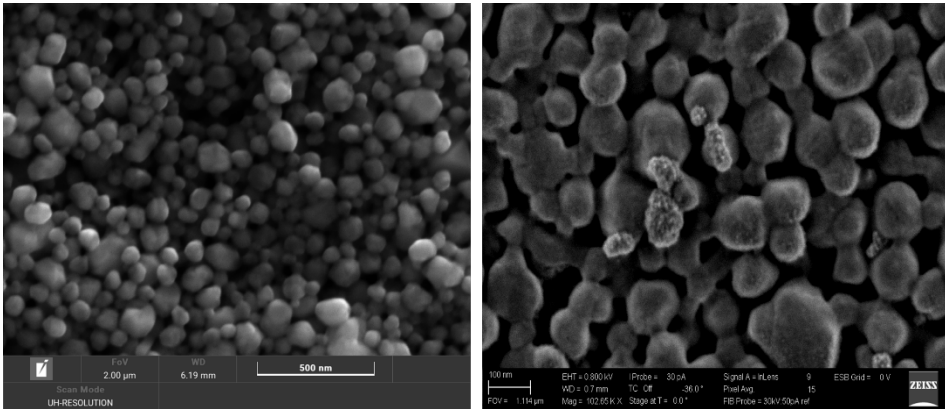


Bild 58: Rasterelektronenaufnahme der Oberfläche mit einer Vergrößerung von 500 nm bei einer Sintertemperatur von 160 °C (links) und 100 nm bei 200 °C (rechts)

In der rechten Oberflächenaufnahme der 160 °C Probe ist die beginnende Sinterung erkennbar. Würde der Trocknungsprozess nicht nach 30 Minuten beendet werden, würden sich auch bei dieser Temperatur die Sinterhalse vergleichbar zur 200 °C Probe ausbilden, was ebenfalls durch die TGA-Analyse bestätigt wurde.

Wird der Querschnitt in Bild 59 der jeweiligen Proben analysiert, lassen sich ebenfalls Unterschiede des Sintergrades innerhalb der Struktur feststellen. Diese sind jedoch nicht so signifikant wie an der Oberfläche. Zurückzuführen ist dies darauf, dass der Sinterprozess schneller voranschreitet, je mehr Möglichkeiten die einzelnen Nanopartikel zur Verbindung haben. Im Inneren der Struktur liegt ein Gleichgewicht der Kräfte vor, die auf die einzelnen Partikel wirken und so den Sinterprozess vorantreiben. An

der Oberfläche unterliegen die Partikel nicht allseitig gleichmäßigen Kräfteinwirkungen, was zu einer Verlangsamung des Prozesses führt.

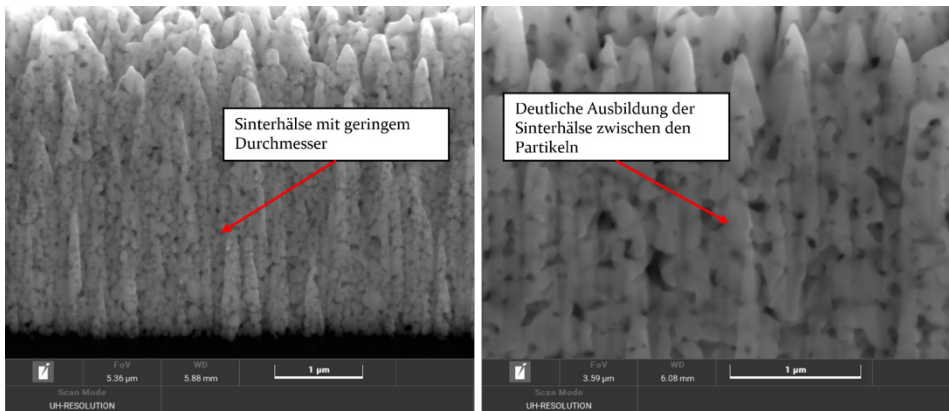


Bild 59: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen des Probenquerschnitts bei einer Sinter-temperatur von 160 °C (links) und 200 °C (rechts)

Nach der Sinterung werden die Proben mit dem Netzwerkanalysator und den APC7-Verbindern vermessen. In Bild 60 sind die jeweiligen Messkurven der unterschiedlichen Sintertemperaturen dargestellt. Das PI Substrat (blaue Kurve) als Vergleich zeigt eine sehr geringe Dämpfung, welche typisch für dielektrische Materialien ist. Der Verlauf der bei 80 °C gesinterten Proben (grüne Kurve) gleicht dem Dielektrikum, was auf keine Sinterung der Struktur und somit ebenso keiner elektrischen Leitfähigkeit schließen lässt. Ab 120 °C findet eine Sinterung der Nanopartikel und eine Ausbildung der elektrischen Leitfähigkeiten statt, welche sich in den unterschiedlichen Einfügedämpfungen (S_{12}) erkennen lässt. Hierbei gilt, je größer die Einfügedämpfung, desto besser die Sinterung der gedruckten Struktur und somit die elektrische Leitfähigkeit. Die Dämpfung bei 120 °C beträgt ca. -40 dB, bei 160 °C ca. -70 dB und bei 200 °C mit der besten elektrischen Leitfähigkeit -90 dB.

Der Anstieg der Einfügedämpfung bis ca. 0,5 GHz ist auf die Serienkapazität der PI-Folie zurückzuführen. Die APC7-Verbindere sind durch das dielektrische Substratmaterial nichtleitend getrennt, wodurch eine Kapazität in Reihe mit den Verbindern und der Metallschicht entsteht. Grundsätzlich gilt, dass eine Auswertung unterhalb von 0,5 GHz aufgrund des Serienkapazitätseffekts nicht sinnvoll ist. Um ein Leitfähigkeitsprofil aus dem Modell zu generieren, wird in einem ersten Schritt die Messung der Schichtdicke mittels einer Mikrometerruhr herangezogen, um die Schichtdicke als erste der beiden verbleibenden Unbekannten zu ermitteln. Somit ist im

Modell nur noch die elektrische Leitfähigkeit als letzte Unbekannte vorhanden.

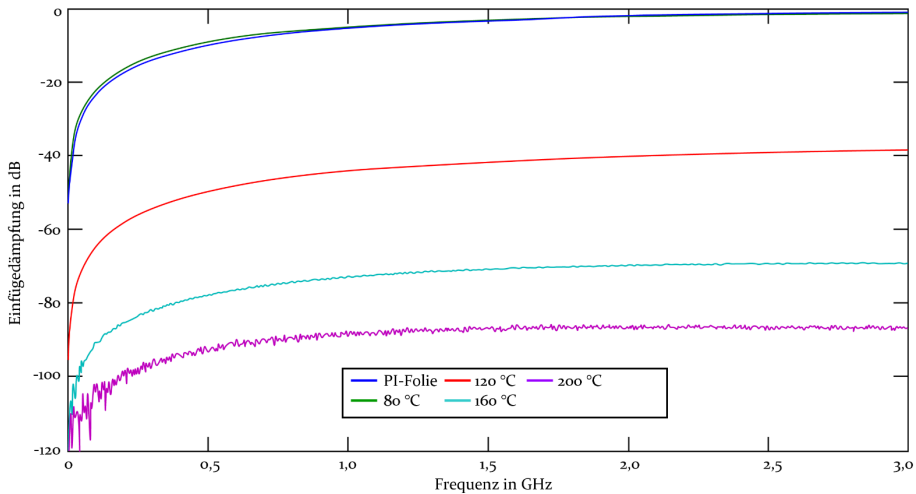


Bild 60: Messergebnisse der Einfügedämpfung in Abhängigkeit der verwendeten Sinter-temperatur aus [P6]

Bild 61 zeigt die mit dem Messverfahren ermittelten elektrischen Leitfähigkeitswerte bei einer gemessenen Schichtdicke von $4,1 \mu\text{m}$ bei $160 \text{ }^\circ\text{C}$ und $5,1 \mu\text{m}$ bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Zu beachten gilt hier, dass die Messung mit der Mikrometermessuhr mit Messunsicherheiten von $\pm 2 \mu\text{m}$ behaftet ist. Da die Schichtdicke essenziell bei der Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit ist, besteht die Gefahr der Fehlerfortpflanzung. Alle Proben sind mit denselben Parametereinstellungen gedruckt worden und sollten somit vergleichbare Schichtdicken besitzen. In der Theorie wäre eine geringere Schichtdicke bei höheren Sintertemperaturen eine logische Konsequenz, da bereits mehr Lösemittel verdampft ist. Die erreichten Schichtdickenmesswerte sind somit kritisch zu betrachten, weshalb die direkte Berechnung der Schichtdicke aus dem Modell vorzuziehen ist.

Die mit der Messmethode ermittelte Leitfähigkeit bei den für 30 Minuten bei $160 \text{ }^\circ\text{C}$ gesinterten Proben bewegt sich zwischen $2,7 \text{ MS/m}$ und $3,4 \text{ MS/m}$. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich bei den für 30 Minuten bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ gesinterten Proben, welche eine elektrische Leitfähigkeit von $11,9 - 14,7 \text{ MS/m}$ aufweisen. Die bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ gesinterten Proben sind nicht messbar, während sich bei den für 30 Minuten bei $120 \text{ }^\circ\text{C}$ gesinterten Proben eine Leitfähigkeit von $< 1 \text{ MS/m}$ ergibt. Vor allem bei den Hochtemperatur gesinterten Proben sind Unterschiede der Leitfähigkeit der einzelnen

Proben über den Frequenzverlauf sichtbar, welche sich in einem Bereich zwischen 0,5 – 1,0 MS/m bewegen. Hieraus lässt sich auf Unregelmäßigkeiten innerhalb der Struktur schließen. Es kann nicht mit abschließender Sicherheit belegt werden, dass diese Unterschiede auf eine ungleichmäßige Sinterung des Strukturinneren zurückzuführen ist oder auf unterschiedliche Schichtdicken, weshalb es hierzu weiterer gezielter Forschungsarbeiten bedarf.

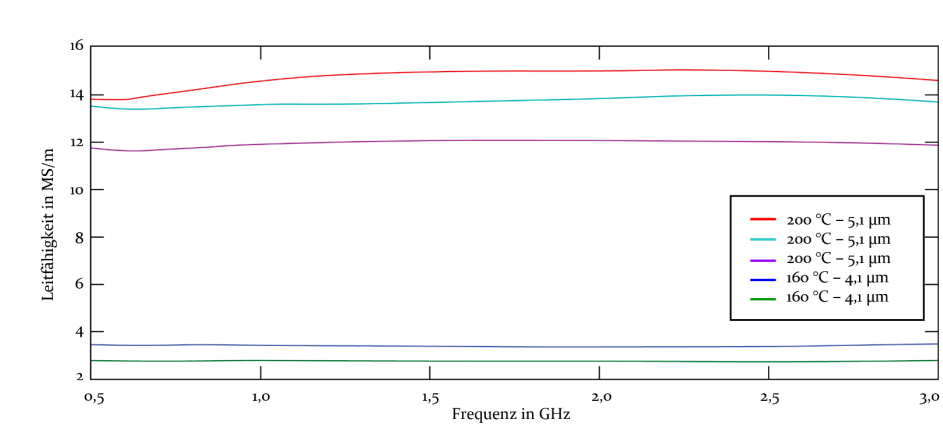


Bild 61: Aus dem Modell extrahierte Leitfähigkeiten der gemessenen Proben in Abhängigkeit der Frequenz aus [P6]

Wie bereits erwähnt, ist die mechanische Ermittlung der Schichtdicke mittels Mikrometermessuhr als unzureichend anzusehen.

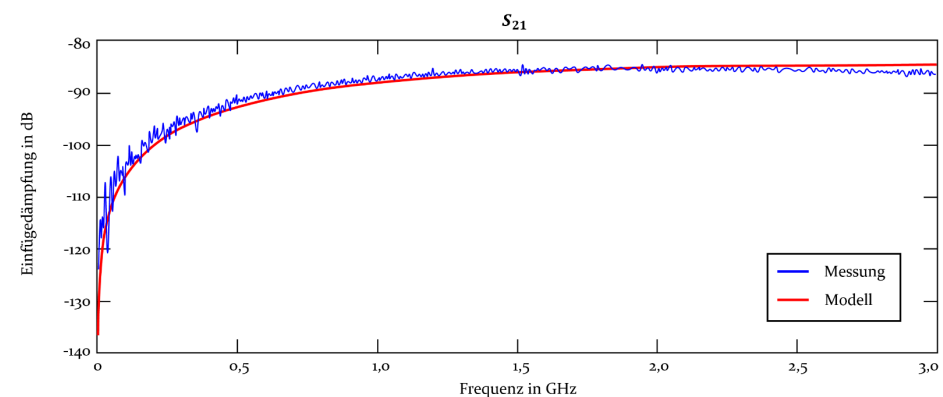


Bild 62: Vergleich der Einfügedämpfung einer realen Messprobe und der berechneten Kurve des Modells aus [P6]

Die Schichtdicke der 200 °C ofengesinterten Probe wird daher im Modell in mehreren Iterationen so lange angepasst, bis sowohl die Einfügedämpfung – also der Betrag von S_{21} – als auch die Phase von S_{21} mit der Messung übereinstimmt. Bild 62 zeigt die Einfügedämpfung der Messung, dargestellt durch die blaue Kurve, einer bei 200 °C gesinterten Ofenprobe und der Vorhersage (rote Kurve) durch das aufgestellte Modell.

Die minimalen Abweichungen ab 2,5 GHz stammen aus der Annahme im Modell einer homogenen Leitfähigkeit innerhalb der Struktur. Vor allem im Bereich unterhalb von 2,5 GHz verlaufen beide Kurven fast identisch, womit eine Validierung der Messmethode erzielt ist.

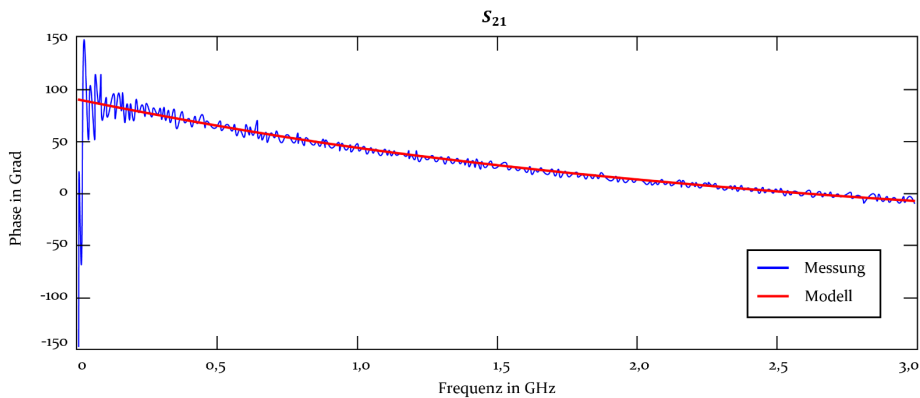


Bild 63: Phasenverlauf einer realen Messprobe im Vergleich zum mathematischen Modell aus [P6]

Bild 63 zeigt den Phasenverlauf der gemessenen Probe durch die blaue Kurve sowie des Modells (rote Kurve) bei einer berechneten Schichtdicke von 2,0 μm . Beide Kurven laufen bei dieser Schichtdicke identisch.

Im Anschluss findet die neue Berechnung mit aktualisierter Schichtdicke der Leitfähigkeit für ausgewählte Frequenzpunkte statt. Diese wird gemittelt und als Diagramm ausgegeben. Es ergibt sich eine Leitfähigkeit von 39 MS/m, welche sehr gut mit der konventionellen durchgeführten 4-Punkt-DC-Messung übereinstimmt. Das detaillierte Leitfähigkeitsdiagramm über den Frequenzverlauf der bei 200 °C für 30 Minuten gesinterten Probe ist in Bild 64 dargestellt. Unter der Beachtung der geringeren Eindringtiefe bei steigender Frequenz lässt der Anstieg der Leitfähigkeit bei höheren Frequenzen den Schluss zu, dass die äußere Schicht eine bessere Sinterung aufweist als das Innere der Struktur. Die aus dem Modell berechneten Leitfähigkeiten mit den jeweils angeglichenen Schichtdicken sind in Bild 65 dargestellt.

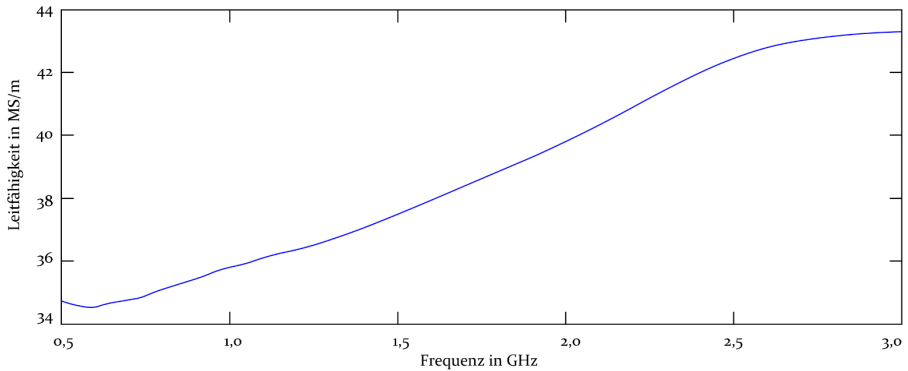


Bild 64: Leitfähigkeitsverlauf einer bei 200 °C für 30 Minuten gesinterten Messprobe mit einer berechneten Schichtdicke von 2,0 µm aus [P6]

Die bei 160 °C gesinterten Proben weisen eine elektrische Leitfähigkeit zwischen 1,2 – 4,6 MS/m auf, während die bei 200 °C gesinterten Proben eine Leitfähigkeit bis zu 38 MS/m erreichen, was 62 % rel. Leitfähigkeit zu Bulk-Ag entspricht. Den teilweise sehr deutlichen Unterschieden innerhalb einer Probenkategorie können diverse Ursachen zu Grund liegen. Sehr wahrscheinlich ist, dass die geringere Schichtdicke und damit hohe berechnete Leitfähigkeit auf Unregelmäßigkeiten im Aerosol-Jet Prozess zurückzuführen sind.

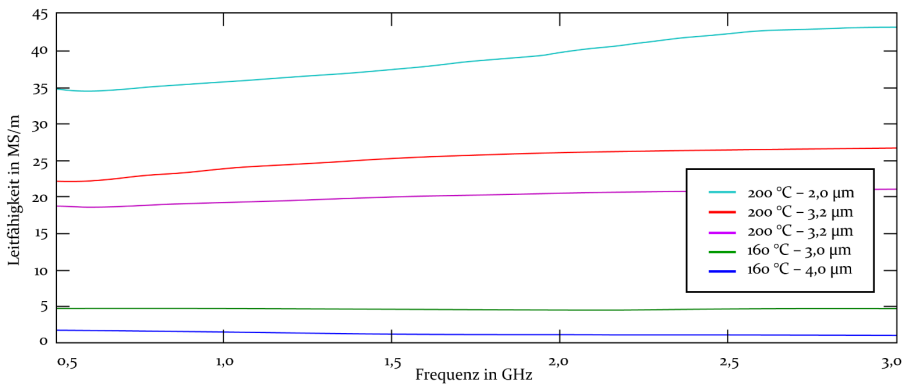


Bild 65: Berechnete Leitfähigkeitswerte ausgewählter Messproben bei unterschiedlich gesinterten Temperaturen im Konvektionsofen und kalkulierten Schichtdicken aus [P6]

Trotz dieser generellen Unterschiede ist erneut ein Ansteigen der Leitfähigkeit entlang der Frequenz sichtbar. Es kann nicht abschließend geklärt

werde, woher die sich verändernde Leitfähigkeit stammt. Die wahrscheinlichste Erklärung liegt aber auch hier in einer inhomogen gesinterten Silberschicht, das heißt eine bessere Leitfähigkeit in den oberen Schichtdicken. Es könnten jedoch auch unterschiedliche Schichtdicken sowie Luft einschlüsse oder Verunreinigungen innerhalb der Struktur als mögliche Ursache, für eine geringere Leitfähigkeit im Strukturinneren in Betracht gezogen werden. Hierfür bedarf es in naher Zukunft weitergehende detaillierte Untersuchungen.

5.2.2 Photonisches Sinterverfahren mit Xenon-Blitzlicht

Wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben, gelten photonische Sinterverfahren als die schnellsten und effektivsten alternativen Verdichtungsverfahren für die gedruckte Elektronik. Vor allem im Rolle-zu-Rolle-Verfahren ermöglichen sie Sinterzeiten im Millisekunden Bereich und sind durch die geringe Zeiteinwirkung auch für temperaturempfindliche Substrate geeignet.

Als Alternative zum klassischen Konvektionsofen wird die PulseForge 1300 der Firma NovaCentrix für Xe-Blitzlicht Sinterversuche eingesetzt. Die Aerosol-Jet gedruckten Proben werden vor der photonischen Sinterung im Ofen für 10 Minuten bei 80 °C vorgetrocknet. Notwendig ist dieser Schritt, da es ansonsten zu einem explosionsartigen Ausdampfen des Lösemittels kommt, was erhebliche Auswirkungen auf die Qualität der Proben hat und zu klassischen Fehlerbildern, wie Anschmelzen des Substrates oder ein vollständiges Ablösen der Strukturen führt. Wie bereits vorhergehende Versuche gezeigt haben, findet bei einer Temperatur von 80 °C die Trocknung, aber keine Sinterung der Silbernanopartikel statt, was durch die TGA-Analyse bestätigt wurden. Somit ist sichergestellt, dass es zu keinem Verfälschen der Sinterergebnisse kommt.

In Bild 66 sind die gemessenen Einfügedämpfungen nach durchgeführter photonischer Sinterung dargestellt. Die blaue Kurve zeigt die Einfügedämpfung nach einem Einzelpuls von 560 µs bei 400 V. Deutlich zu erkennen ist hier, dass der Verlauf der reinen PI-Folie gleicht und somit keine beziehungsweise nur eine sehr geringe Sinterung stattgefunden hat. Wirken statt eines Einzelimpulses mehrere kürzere Impulse auf die gedruckte Struktur ein, steigt die Einfügedämpfung deutlich an, was analog zu einer Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit der gedruckten Proben gesehen werden kann. Die roten und türkisfarbenen Kurven zeigen eine so starke Dämpfung der elektromagnetischen Welle, dass diese im Rauschen verschwinden und somit nicht mehr messtechnisch fehlerfrei ausgewertet werden können. Im Umkehrschluss bedeutet dies eine fast vollständige

Sinterung der gedruckten Proben, welche mit den jeweiligen Parameter-einstellung erreicht werden konnte. Eine Aussage hinsichtlich der mecha-nischen Eigenschaften der Proben, wie die Haftfestigkeit, lässt sich aus den Ergebnissen nicht ableiten.

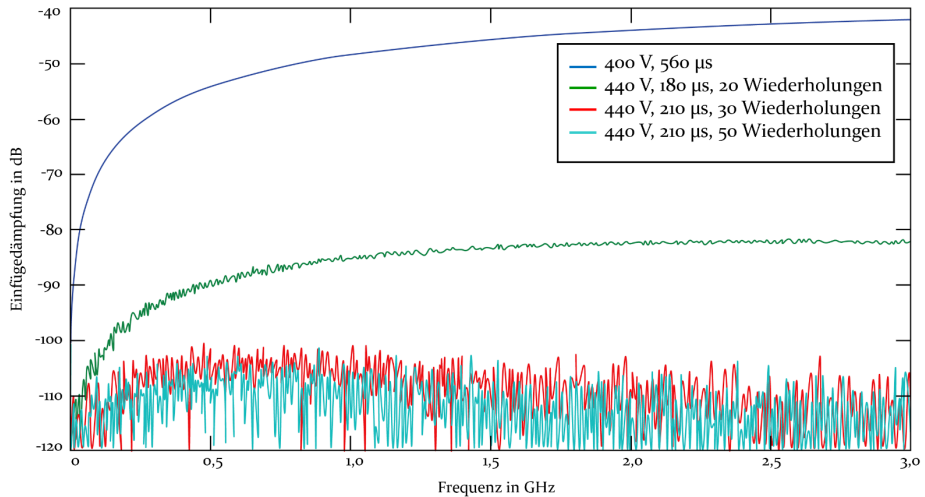


Bild 66: Einfügedämpfung ausgewählter Messproben nach photonischer Sinterung mit exemplarischen Parametereinstellungen aus [P6]

In Tabelle 6 werden die erzielten Leitfähigkeiten der PulseForge-Proben zusammengefasst. Die Leitfähigkeitsuntersuchungen sind mit der konventionellen 4-Punkt-Methode durchgeführt worden.

Tabelle 6: Erzielte Leitfähigkeitswerte nach der photonischen Sinterung unter der Verwendung von Multiimpulsen

| Bestrahl-dauer | 20 Impulse | 30 Impulse | 50 Impulse |
|----------------|------------|------------|------------|
| 150 µs | n/a | 17,4 MS/m | 21,4 MS/m |
| 180 µs | 16,8 MS/m | 17,4 MS/m | n/a |
| 210 µs | n/a | 28,6 MS/m | 29,3 MS/m |

Eine Auswertung mit dem neuen Charakterisierungsverfahren ist aufgrund der unzureichenden Probenqualität (stellenweises Abplatzen der Silberschicht) nicht möglich gewesen. Zu erkennen ist jedoch, dass eine erhöhte Anzahl von Impulsen zu verbesserten elektrischen Leitfähigkeiten führt. Ab einer Einwirkzeit von 210 μs kann jedoch auch eine größere Anzahl an Wiederholungen keine deutliche Verbesserung der Leitfähigkeit mehr erzielen.

5.2.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Trotz teilweise aufgrund der schlechten Probenqualität bei der Xe-Blitzlichtsinterung nicht exakt durchführbaren hochfrequenztechnische Messungen können einige generelle Aussagen zur Verwendung des Messverfahrens auf Aerosol-Jet gedruckte Proben getroffen werden. Diese erlauben es bei zukünftigen Auswertungen grundlegende Zusammenhänge zwischen Einfügedämpfung und elektrischer Leitfähigkeit abzuleiten. Folgende Aussagen können anhand der erzielten Ergebnisse getroffen und gegenüber dem Stand der Forschung folgende neue Erkenntnisse generiert werden:

1. Bei Aerosol-Jet gedruckten und mit dem Konvektionsofen gesinteren Proben ist die Verwendung des Messverfahrens uneingeschränkt nutzbar.
2. Hohe Einfügedämpfungen (-100 dB) spiegeln eine sehr gute Leitfähigkeit wider.
3. Hohe Einfügedämpfungen und somit sehr gute elektrische Leitfähigkeiten lassen keinen Rückschluss auf die Qualität der gedruckten Probe zu.
4. Bei Xe-Blitzlichtsinterung liefern für die hergestellten Proben auf PI-Folie die Einstellung von 440 V, 30 – 50 Impulse und 180 – 210 μs die besten Leitfähigkeitswerte.
5. Je höher die Sintertemperatur im Konvektionsofen ist, desto besser ist die elektrische Leitfähigkeit.
6. Die Qualität des Druckprozesses hat einen gravierenden Einfluss auf das Sinterergebnis.
7. Eine zerstörungsfreie elektrische Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Schichtdicke ist mit Hilfe des neu entwickelten Messverfahrens in wenigen Sekunden möglich.

Die durchgeführten Versuche zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit Aerosol-Jet gedruckter Proben führen zu einem gesteigerten Prozessverständnis, welches wiederum zu verbesserten Sinterergebnissen und

reduzierten Messaufwand führt. So kann zukünftig der Mehraufwand durch eine getrennte Messung von Schichtdicke und elektrischer Leitfähigkeit reduziert und die idealen Parameter für den jeweiligen Sinterprozess deutlich schneller gefunden werden.

5.3 Erschließung weiterer Anwendungsfelder durch den Einsatz bei alternativen Dünnschichtstrukturen

Die neue Charakterisierungsmethode soll im folgenden Abschnitt auf weitere Dünnschichtstrukturen angewendet werden und so neben der Validierung der Funktionsfähigkeit auch das Potenzial für weitere Anwendungsfelder aufzeigen. Der limitierende Faktor bei der Anwendung des Messverfahrens, stellt lediglich die Dicke des Substrates und der leitfähigen Schicht dar. Hierbei ist zu beachten, dass ein komplettes Schließen der beiden APC7-Verbinder möglich sein muss, um keine Messfehler zu erzeugen. Insgesamt dürfen die Proben eine Dicke von 1 Millimeter nicht überschreiten.

Herstellung von Probekörpern durch Sputtern

Für die erste Anwendung des Messverfahrens auf alternative Dünnschichtstrukturen und im weiteren Verlauf als Vergleich zu den gedruckten Proben werden gesputterte Probekörper, die am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik hergestellt wurden, auf PI-Folie verwendet.

Die wesentlichen Vorteile dieses konventionellen Herstellungsverfahrens sind:

1. die homogene Schichtdicke über den gesamten Kreisdurchmesser und somit die Reduktion möglicher Fehlinterpretationen sowie
2. die homogene Leitfähigkeit über die gesamte Schichtdicke

Als Materialien sind Kupfer und Aluminium verwendet worden. Insgesamt werden 21 Proben besputtert, welche wie in Bild 67 gezeigt, angeordnet sind. Die Schichtdicken werden messtechnisch mittels Schliffbild und einer nachfolgenden Analyse mittels Laser-Scan-Mikroskopie bestimmt.

Beim Sputterprozess befindet sich das Target mittig über der Gitteranordnung. Als Konsequenz weisen die in der Mitte liegenden Proben 22, 23, 24, 32, 33, 34, 42, 43 und 44 eine größere Schichtdicke auf als die sich am Rand befindlichen Proben.

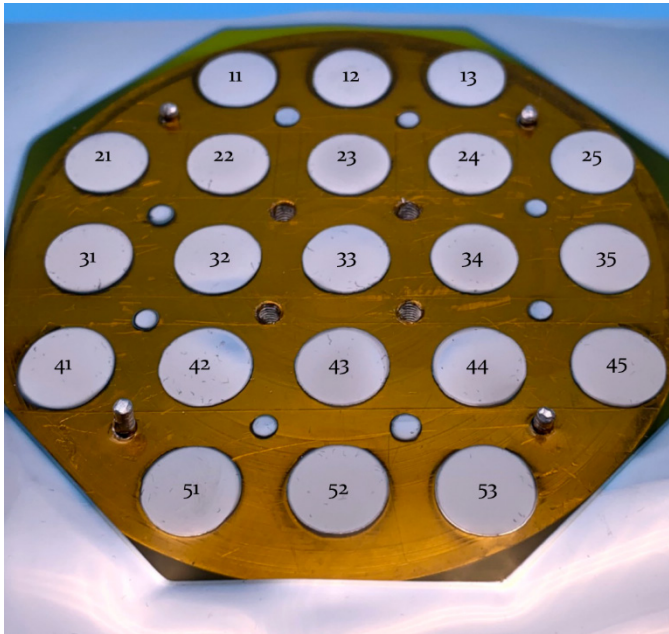


Bild 67: Mit Aluminium gesputterte Messproben zur Anwendung des Messverfahrens auf alternative Dünnschichtproblematiken aus [P6]

Für die verwendeten Materialien sind aus der Literatur die folgenden Leitfähigkeitswerte für die jeweiligen Bulk-Materialien bekannt:

- Kupfer, 58 MS/m
- Aluminium, 37 MS/m

Bevor ein Angleich von Dämpfung und Phase mittels des Charakterisierungsmodells stattfindet, wird zum Vergleich die Messung der Schichtdicke mit Hilfe von Schliffbildern (siehe Bild 44) durchgeführt. Die Schichtdicke für Aluminium beträgt ca. 1,8 μm , für Kupfer ergibt sich ein gemessener Wert von 2,3 μm .

Anwendung des neuen Charakterisierungsverfahrens

Bild 68 und Bild 69 zeigen den Leitfähigkeitsverlauf und die mittels des Messverfahrens ermittelten Schichtdicken der gesputterten Kupfer- und Aluminiumproben. Beide Proben zeigen einen sehr homogenen Leitfähigkeitsverlauf mit Unterschieden < 1 MS/m, welches eine gleichmäßige Leitfähigkeit über den Querschnitt impliziert. Die minimalen Abweichungen über den Frequenzverlauf und die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Proben sind auf die Anordnung im Gitter zurückzuführen.

Der Verlauf unterhalb von 0,5 GHz kann aufgrund des Kapazitätseffekts der PI-Folie nicht als aussagekräftig ausgewertet werden.

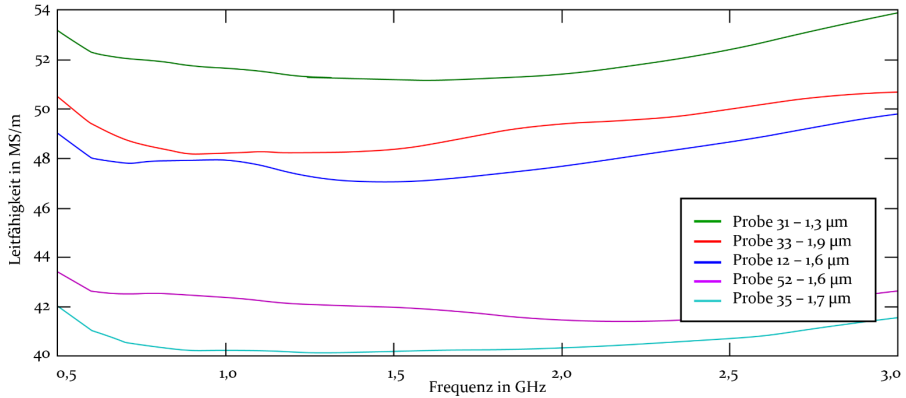


Bild 68: Mit dem Messverfahren ermittelten Leitfähigkeitswerte ausgewählter gesputterter Proben mit Kupfer aus [P6]

Für die gesputterten Kupferproben zeigt sich, dass die Schichtdicke deutlich variiert, je nach Position der einzelnen Probe. Die Probe 33 zeigt die höchste Schichtdicke, da sie sich zentral unter dem Sputtertarget befunden hat. Abhängig von der Schichtdicke zeigen sich Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeit von $\pm 0,5 - 1$ MS/m. Grundsätzlich gilt bei gesputterten Proben, je größer die Dichte ist, desto höher die erzielte elektrische Leitfähigkeit.

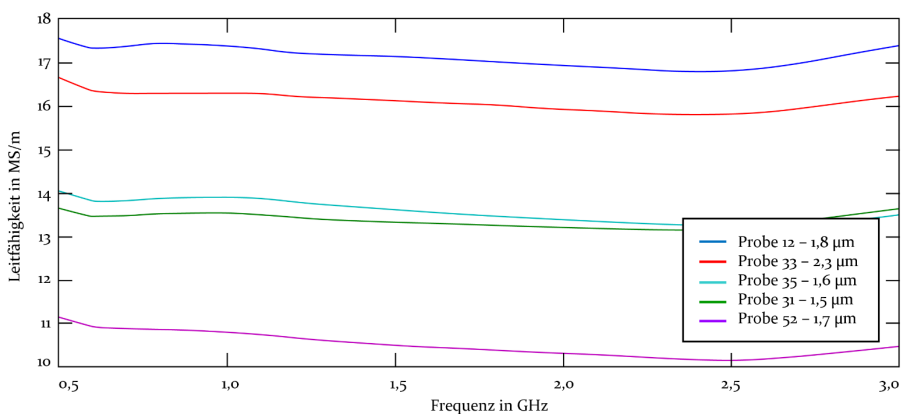


Bild 69: Mit dem Messverfahren ermittelten Leitfähigkeitswerte ausgewählter gesputterte Proben mit Aluminium aus [P6]

Gleiches Verhalten ist bei den mit Aluminium gesputterten Proben zu sehen. Die sich in der Mitte des Targets befindlichen Proben weisen die höchste Schichtdicke mit $2,3 \mu\text{m}$ auf, während die sich am Rand befindenden Proben nur eine Schichtdicke von $< 1,5 \mu\text{m}$ besitzen. Ebenso wie bei den Kupferproben zeigt sich anhand des Diagramms eine Schwankung der elektrischen Leitfähigkeit $\pm 0,5 - 1 \text{ MS/m}$.

Zur Evaluierung der Messergebnisse wurden die Probekörper mittels DC-Messung und der Standardgleichung vermessen. Die Ergebnisse sind in Bild 70 dargestellt. Die mittels Vier-Punkt-Methode ermittelten Leitfähigkeitswerte stimmen sehr gut mit den Ergebnissen des Modells über ein. Die Leitfähigkeitswerte bewegen sich bei den mit Kupfer gesputterten Proben zwischen $40 - 50 \text{ MS/m}$ mit einer Abweichung von $\pm 3 \text{ MS/m}$ je nach Lage der Proben unter dem Sputtertarget.

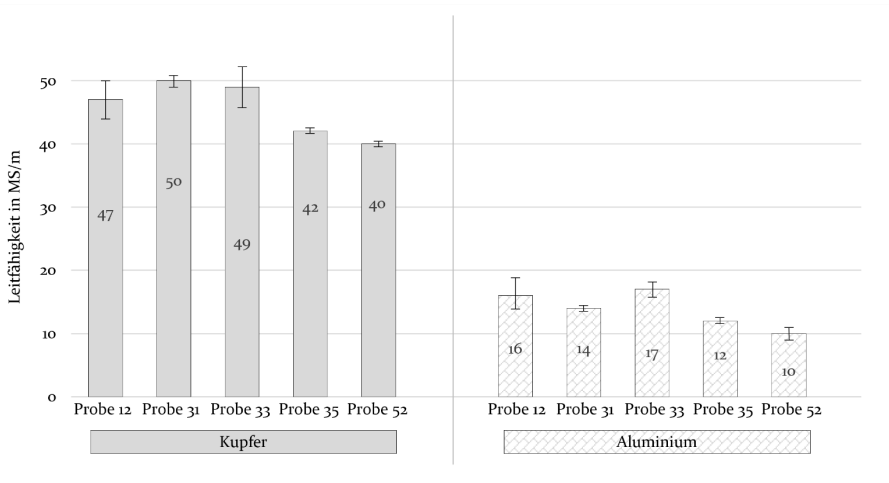


Bild 70: Leitfähigkeitswerte der DC-Messung von gesputterten Probekörper mit Kupfer und Aluminium

Ein vergleichbares Bild ergibt sich auch nach der Vier-Punkt-Messung der Aluminiumproben. Die erzielten Leitfähigkeitswerte variieren zwischen $10 - 17 \text{ MS/m}$ je nach Lage der Probe in der Gitteranordnung. Auch hier sind die konventionell gemessenen Ergebnisse mit denen des analytischen Modells vergleichbar, wodurch eine Verifizierung des Modells sichergestellt wurde.

Diskussion der Ergebnisse und weiteres Potenzial

Die Anwendung des Charakterisierungsverfahrens auf weitere Dünnschichttechnologien zeigt das Potenzial der Messmethode auf. Es kann nachgewiesen werden, dass die zerstörungsfreie elektrische Charakteri-

sinterung auf dünnen, metallischen Proben angewendet werden kann. Die einzige Einschränkung stellt die Gesamtschichtdicke dar, welche durch den Messaufbau und das Verbinden der beiden APC7-Verbinder limitiert ist. Die Materialauswahl sowohl des Substrates als auch der metallischen Schicht und das Herstellungsverfahren haben keinen Einfluss auf das Messverfahren.

Folgende grundsätzliche Aussagen können getroffen werden, welche zu einer Optimierung weiterer Druck- und Dünnschichttechnologien führt:

1. Ein gleichbleibender Leitfähigkeitskurvenverlauf über der Frequenz zeigt eine homogene Verdichtung im Probenquerschnitt, Abweichungen von $< 3\%$ werden als Messungenauigkeit toleriert und als homogen angesehen.
2. Eine Messung der Schichtdicke mittels mechanischer und/oder optischer Messverfahren ist nicht mehr zwingend notwendig. Das Messverfahren ist aufgrund des einfachen Messaufbaus sehr gut als Offline-Messung möglich.
3. Der Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit bei allen gemessenen Proben ab 2,5 GHz deutet auf einen systematischen Messfehler hin, weshalb in erster Linie der Bereich zwischen 0,5 GHz und 2,5 GHz als aussagekräftig angenommen wird. Eine weitere Erhöhung der Frequenz ist aufgrund der zu geringen Eindringtiefe nicht mehr zielführend.

5.4 Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen der Qualität der Sinterung und Zuverlässigkeit

Um eine Aussage zwischen der Qualität der Sinterung und der Zuverlässigkeit zu ermöglichen und somit auch die mechanischen Eigenschaften mit einzubeziehen, werden zusätzlich Klimauntersuchungen durchgeführt. Aufgrund des möglichen Einsatzes gedruckter Elektronik im industriellen Umfeld werden die Klimatest nach möglichen zukünftigen Anforderungen ausgewählt:

1. Temperaturschocktest -40 °C und 140 °C für 336 Zyklen (Verweildauer bei oberer/unterer Temperatur 15 Minuten, Überföhungsdauer < 30 Sekunden)
2. Feuchteklimatest bei 85 °C und 85% relativer Luftfeuchte für 7 Tage

Grundsätzlich gilt es ebenso, wie für die Zuverlässigkeitstests in 3.2.3 beschrieben, dass zum heutigen Zeitpunkt noch keine spezifischen Normen für die gedruckte Elektronik vorliegen.

Für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen werden Proben herangezogen, welche zuvor 30 Minuten lang bei 80 °C, 120 °C, 160 °C und 200 °C im Konvektionsofen gesintert wurden. Durchgehend alle gedruckten Proben, die bei 80 °C und 120 °C gesintert worden sind, können aufgrund des vollständigen Abplatzens der Silberschicht nach den Zuverlässigkeitsuntersuchungen nicht ausgewertet werden. In Bild 71 sind die Proben nach dem Feuchte-Wärmetest nach sieben Tagen gezeigt.



Bild 71: Aufnahme der Messproben nach dem Feuchte-Wärme-Test mit vollständig zerstörten Proben nach 120 °C Sinterung (links) und messtechnisch auswertbaren Proben nach einer Sinterung bei 160 °C (mittig) und 200 °C (rechts)

Wie bereits beschrieben, können neben den 80 °C Proben auch keine der 120 °C Proben ausgewertet werden, was deutlich in der Abbildung links zu sehen ist. Das Abplatzen der Silberschicht findet bei allen Proben in der Mitte der kreisförmigen Struktur statt. Als Ursache hierfür werden zwei Punkte identifiziert. Als erstes führt die Belastung aufgrund des vorab durchgeführten Messverfahrens zu einem Abzeichnen des Aufsetzpunkts des Innenleiters bei allen Proben, was in Bild 71 zu erkennen ist. Daraus ergibt sich bei den schwach gesinterten Proben eine Sollbruchstelle, welche den Belastungen der Klimatests nicht standhält. Kombiniert mit einem minimal höheren ($\sim 1 - 2 \mu\text{m}$) Materialauftrag in der Kreismitte und einer dadurch unregelmäßigen Sinterung bei niedrigeren Temperaturen im Kreismittelpunkt kommt es zu einer geringeren Belastbarkeit.

Die 160 °C und 200 °C gesinterten Proben können hingegen nach dem Feuchte-Wärme-Test vollständig ausgewertet werden. Die Farbunterschiede der beiden Proben sind auf die unterschiedliche Sintertemperatur zurückzuführen. Je höher die Temperatur, desto mehr verfärben sich die

Silberschichten. Nach dem Temperaturschocktest konnten nur noch die 200 °C Proben vollständig ausgewertet werden. Die 160 °C Proben sind bereits zu stark beschädigt oder werden während des Einlegens in den APC7-Verbinder aufgrund der Porosität beschädigt, wodurch keine Messung mehr möglich ist.

Bild 72 zeigt die Proben nach dem durchgeführten Temperaturwechseltest.

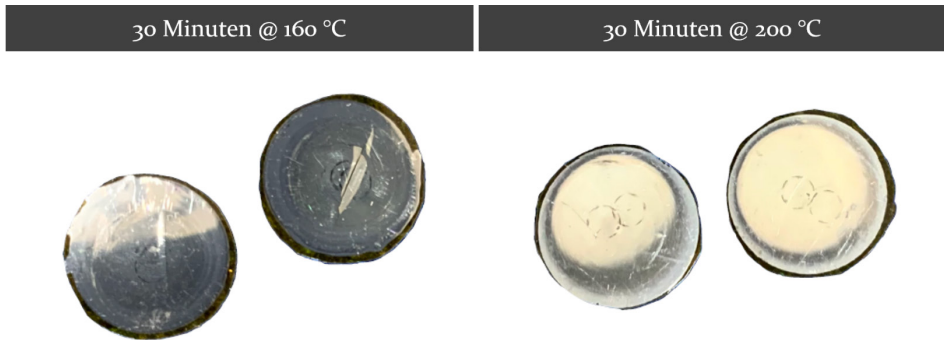


Bild 72: Aufnahme der Messproben nach dem Temperaturschocktest nach einer Sinterung bei 160 °C (links) und 200 °C (rechts)

Bild 73 zeigt die Ergebnisse der Hochfrequenzmessung der 160 °C Proben vor und nach sieben Tage Feuchte-Wärme-Tests. Die blaue Kurve zeigt die Einfügedämpfung vor dem Umwelttest (links), ebenso wie in der Phasenbetrachtung (rechts). Die grüne Kurve zeigt die Ergebnisse der Messung nach dem Zuverlässigkeitstest.

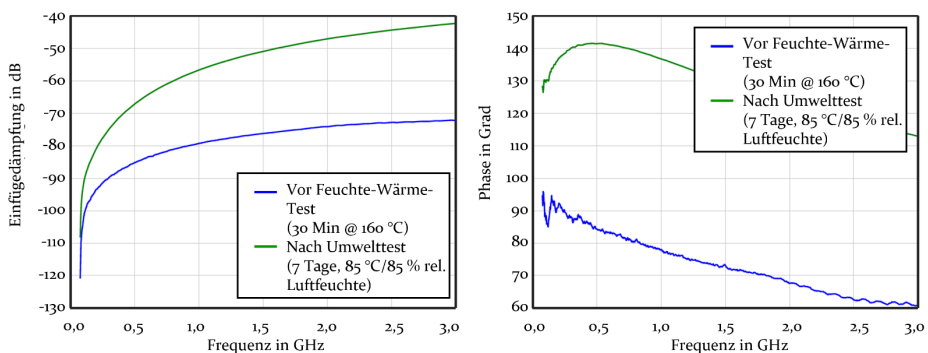


Bild 73: Hochfrequenztechnische Untersuchung der Aerosol-Jet gedruckten Proben nach dem Feuchte-Wärme-Test und einer Sinterung bei 160 °C aus [P6]

Deutlich zu erkennen ist ein Unterschied von über 20 dB in der Einfügedämpfung, was einer geringeren Leitfähigkeit entspricht. Durch den

Feuchte-Wärme-Test gelangt vermehrt Feuchtigkeit in die poröse Struktur, welche zu einer Reduzierung der Leitfähigkeit führt. Ebenfalls ist eine Zunahme der Oxidation der gedruckten Struktur aufgrund der Feuchtigkeit anhand der sich verändernden Farbe sichtbar, die ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Leitfähigkeitswerte hat. In Bild 74 werden die Messergebnisse der bei 200 °C gesinterten Proben gezeigt. Die Kurven der Einfügedämpfung verlaufen sowohl vor als auch nach dem Umwelttest identisch, was darauf hinweist, dass der Test keinen Einfluss auf die Leitfähigkeit der Proben hat. Die geringfügige Abweichung der grünen Kurve zwischen 2 GHz und 2,7 GHz in der Einfügedämpfung sowie bei der Phasenbetrachtung ist auf Messungenauigkeiten zurückzuführen und kann daher vernachlässigt werden.

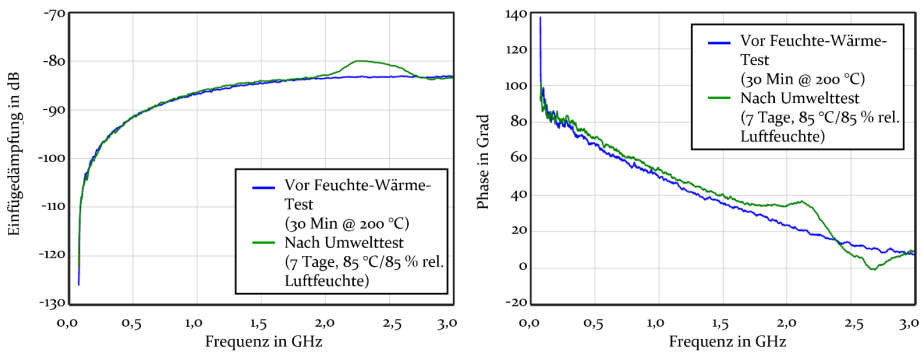


Bild 74: Hochfrequenztechnische Untersuchung der Aerosol-Jet gedruckten Proben nach dem Feuchte-Wärme-Test und einer Sinterung bei 200 °C aus [P6]

In Bild 75 sind die HF-Messergebnisse nach dem Temperaturschocktest für die Proben, die 30 Minuten lang bei 200 °C gesintert wurden, dargestellt. Ebenso wie bereits bei den vorherigen Auswertungen, stellt die blaue Kurve die gemessene Einfügedämpfung vor dem Zuverlässigkeitstest dar, während die grüne Kurve den Verlauf der Einfügedämpfung nach dem Test zeigt. Der Verlauf beider Kurven kann als ähnlich interpretiert werden und liegt im Rahmen der angenommenen Messungenauigkeit. Konkret bedeutet dies, dass es zu keiner Veränderung der Leitfähigkeit der 200 °C Proben nach dem Temperaturschocktest kommt. Nachsintern, also eine Verbesserung der Leitfähigkeit, kann ebenso ausgeschlossen werden wie eine negative Beeinflussung der Leitfähigkeit aufgrund der Beanspruchung der Proben. Ähnlich wie bei den Ergebnissen des Feuchte-Wärme-Tests liegt auch beim Temperaturschocktest ein Messfehler zwischen 2,0 GHz und 2,7 GHz vor, der aufgrund der Messungenauigkeit vernachlässigt werden kann.

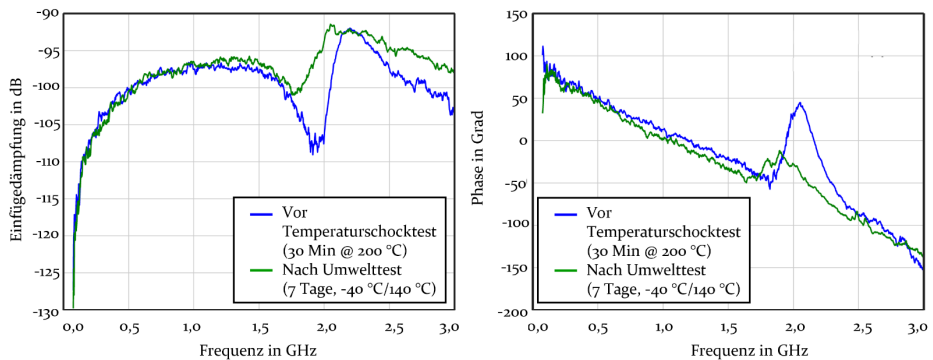


Bild 75: Hochfrequenztechnische Untersuchung der Aerosol-Jet gedruckten Proben nach dem Temperaturschocktest und einer Sinterung bei 200 °C aus [P6]

Zusammenfassen lassen sich die wichtigsten Erkenntnisse aus den Zuverlässigkeitsuntersuchungen wie folgt:

1. Alle bei 80 °C oder 120 °C gesinterten Proben werden bei den Zuverlässigkeitstests so stark beschädigt, dass eine Auswertung nicht mehr möglich ist.
2. Trotz guter elektrischer Leitfähigkeit (160 °C gesinterten Proben) hat der Feuchte-Wärme-Test einen Einfluss auf gedruckte Proben in Form einer verringerten Leitfähigkeit oder mechanischen Beschädigungen. Alle der 14 Proben weisen deutliche Unterschiede der Einfügedämpfung und der Phase auf.
3. Keine der bei 160 °C gesinterten Proben kann nach dem Temperaturschocktest ausgewertet werden, da es bereits vor oder während des Einlegens in den APC7-Verbinder zu einem Ablättern der gedruckten Struktur kommt.
4. Proben, welche für 30 Minuten bei 200 °C gesintert werden, überstehen den Feuchte-Wärme-Test und können vollständig ausgewertet werden. Der Zuverlässigkeitstest hat keinen Einfluss auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften, was in der Einfügedämpfung sichtbar gemacht wird.
5. Nach dem Temperaturschocktest sind nur zwei der 14 Proben (bei 200 °C gesintert) auswertbar. Diese weisen keine Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit auf, was durch die Einfügedämpfung gezeigt werden kann.

6 Zusammenfassung

Der weltweit zunehmende Bedarf an elektrischen Systemen und die Nutzung digitaler Daten treiben die Forderung nach kostengünstiger, flexibler und grüner Elektronik immer weiter voran. In keiner Branche wird es zukünftig einen Weg vorbei geben an der Industrie 4.0, vernetzten und lückenlos nachvollziehbaren Transportwegen, der ständigen Anbindung an das Internet und sogar der Anwendung elektrischer Systeme in der Medizin, wie der permanenten Überwachung wichtiger Körperfunktionen durch Sensoren. Die gedruckte Elektronik bietet eine Lösung für eine Vielzahl der Anforderungen. Unsicherheiten bezüglich der Zuverlässigkeit und, im Wesentlichen, lange Prozesszeiten aufgrund des langen Nachbehandlungsprozesses mittels Konvektion sowie ein mangelndes Grundverständnis der generell ablaufenden Prozesse hemmen oft die weitere Verbreitung.

Die hier durchgeführte Forschungsarbeit setzt an dieser Stelle an und vermittelt ein grundlegendes Prozessverständnis der Sinterung gedruckter Elektronik mit alternativen photonischen Verfahren, um der Anforderung „kostengünstig“ vor allem aus wirtschaftlicher Sicht Rechnung zu tragen. Die mit Hilfe von NIR und UV als photonische Sinterverfahren erzeugten leitfähigen Strukturen erreichen mit über 10 MS/m in durchschnittlich weniger als 120 Sekunden vergleichbare und sogar bessere Ergebnisse als mit der herkömmlichen Konvektionssinterung. Aufgrund der Komplexität der Sinterung gedruckter Elektronik erfolgt eine detaillierte Analyse der Theorie sowie der relevanten Einflussfaktoren, gefolgt von einer Gegenüberstellung möglicher alternativer (chemisch, elektrisch, photonisch) Sinterverfahren. Im Anschluss daran wird auf die Vorteile von NIR und UV als kostengünstige alternative Sinterverfahren mit großem Anwendungspotenzial für Aerosol-Jet gedruckte Strukturen eingegangen. Die durchgeführten Forschungsarbeiten resultieren in der Identifikation der geeigneten Prozessparameter (UV: 405 nm, 100 % Leistung, 60 – 180 Sekunden; NIR: 58 % – 85% Leistung, 2,3 – 5 Sekunden) durch vorherige Analyse der Tinten- und Materialeigenschaften (Reflexionsmessung, TGA-Analyse) sowie Qualifizierungsmethoden (Mikroskopie, Umweltversuche, Haftfestigkeitstests, elektrische Charakterisierung). Zur Überwindung der Fehleranfälligkeit herkömmlicher Messmethoden zur Identifikation der elektrischen Leitfähigkeit wird ein neues auf Hochfrequenzeffekten basierendes Modell entwickelt, welches die zerstörungsfreie elektrische Analyse ermöglicht.

Das Aerosol-Jet-Verfahren zur Herstellung gedruckter Elektronik wird als digitales Druckverfahren ausgewählt, um Silbernanopartikelintinten auf

kostengünstige Polymersubstrate aus LCP und PA6 aufzubringen. Das ausgewählte Layout besteht aus Linien zur elektrischen Charakterisierung (Länge: 10 mm) und Flächen (2 x 2 mm) zur Charakterisierung der Haftfestigkeit. NIR- und UV-Bestrahlung werden anhand ihrer ermittelten Absorptionseigenschaften als geeignete Verfahren ausgewählt. Dem Zusammenspiel der Absorptionseigenschaften zwischen Substratmaterial und Tintenwerkstoff kommt eine entscheidende Bedeutung für die spätere Sinterung zu. Ausschlaggebend für ein gutes Ergebnis ohne Schädigung des Substrats ist eine starke Absorption der Silbernanopartikel-tinte bei nur leichter Erwärmung des Substratmaterials. Die Untersuchungsergebnisse zeigen erzielte Leitfähigkeiten in Abhängigkeit der verwendeten Tinte und Substrat von mehr als 10 MS/m bei Sinterzeiten von weniger als zwei Minuten. In Bezug auf das Ausmaß, in dem der Materialverbund auf Umwelteinflüsse reagiert, zeigt sich die starke Abhängigkeit der Kombination aus verwendetem Tintenwerkstoff, Substratmaterial und Sintermethode. Belastbare wissenschaftliche Aussagen über die Qualität der Sinterung mit alternativen Verfahren erfordern folglich applikationsspezifische Betrachtungen, die sowohl die Materialauswahl als auch die Anwendungsumgebung berücksichtigen.

Die Herausforderung der Zuverlässigkeit gedruckter Elektronik in Hinblick auf ihren späteren Einsatzbereich und ein grundlegendes Verständnis zwischen elektrischen und mechanischen Eigenschaften konnten durch thermische Umweltbelastungstests verdeutlicht werden. Diese Tests betonen die Bedeutung aufeinander abgestimmter Materialien und Sinterverfahren. Proben, die mit alternativen Verdichtungsverfahren gesintert wurden, weisen eine deutlich höhere Robustheit bei verschiedenen Temperatur- und Feuchtigkeitsbelastungen auf als konventionell gesinterte Proben. Auch starre Substratmaterialien zeigen im Vergleich zur Polyimidfolie bessere Ergebnisse. Grundsätzlich lässt sich nicht automatisch von einer sehr guten elektrischen Leitfähigkeit (Proben gesintert bei 160 °C) auf ihre mechanischen Eigenschaften schließen. Im Zweifel bieten etwaige Nachbehandlungsmethoden, wie das Überziehen der gedruckten Struktur mit Schutzlack, eine Möglichkeit, die Langzeitzuverlässigkeit zu verbessern.

Die Herausforderung in der korrekten messtechnischen Charakterisierung gedruckter Strukturen liegt vor allem in Unregelmäßigkeiten der Schichtdicke sowie insbesondere in unterschiedlichen Sintergraden im Inneren der Struktur. Herkömmliche Messmethoden wie die DC 4-Punkt-Methode tragen dieser Tatsache keine Rechnung und messtechnisch ermittelte Dicken spiegeln in der Regel gemittelte Durchschnittswerte wider. Weitere optische und zerstörende Messverfahren wie die Schliiffpräparation oder

der Einsatz eines Focused-Ion-Beam-Rasterelektronenmikroskops sind aufgrund der Feinheit nicht für den Einsatz an nanopartikelhaltigen Strukturen geeignet (Schliffbild) oder aufwendig und kostenintensiv (FIB-REM). Anhand der Entwicklung einer neuartigen Charakterisierungsmethode mittels Hochfrequenztechnik unter Anwendung des Skin-Effekts und der leitfähigkeitsabhängigen Transmission der elektromagnetischen Welle im Metall ist es gelungen, einen neuen Ansatz der elektrischen Charakterisierung zu finden.

Der einfache Messaufbau, bestehend aus einem Netzwerkanalysator und zwei APC7-Verbindern, erfordert keine langwierige Probenpräparation. Anhand von Messproben, die bei verschiedenen Temperaturen (80 °C – 200 °C) für 30 Minuten gesintert wurden, konnten unterschiedliche Leitfähigkeiten der Proben generiert werden, die zur Validierung des Modells dienten. Durch die Anpassung des Modells an die gemessenen Einfügedämpfung und Phase konnte neben der elektrischen Leitfähigkeit auch die Schichtdicke berechnet werden. Die Anwendung des Messverfahrens auf mit Xe-Blitzlicht Impulsen gesinterten Strukturen zeigt ebenfalls die Anwendbarkeit der neuen Charakterisierungsmethode.

Im wachsenden Bereich der Elektronikproduktion im Allgemeinen sind die Einsatzmöglichkeiten des entwickelten Modells nicht allein auf die gedruckte Elektronik beschränkt, sondern können auch auf jegliche Dünnschichtproblematiken transferiert werden. Unter der Verwendung von gesputterten Probekörpern wurde die Funktionalität der Messmethode bei der Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Schichtdicke gezeigt. Die durchgeführten Forschungsarbeiten bieten eine fundierte Ausgangsbasis für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten. Diese können darauf ausgerichtet sein, das aufgestellte Modell weiter zu optimieren und die Unsicherheiten bezüglich der Ursache der Leitfähigkeitsänderung in Abhängigkeit der Frequenz zu forcieren. Hauptaugenmerk sollte hier der Einfluss von Schichtdickenänderungen auf das Modell sein. Ebenso kann mit einem gezielten Schichtaufbau aus unterschiedlichen Materialien das Modellverständnis erweitert werden. Die Verwendung des analytischen Modells bei alternativen Sinterverfahren schafft eine Möglichkeit, diese hinsichtlich optimaler Sinterparameter in Abhängigkeit der verwendeten Materialien, zu analysieren. In material- und prozessbezogenen Entwicklungsarbeiten können die identifizierten Einflussgrößen auf die Qualität der Sinterung konsequent optimiert werden.

7 Summary

The increasing global demand for electrical systems and the use of digital data are driving the demand for cost-effective, flexible and green electronics ever further. In the future, there will be no way around Industry 4.0, networked and seamlessly traceable transportation routes, constant connection to the Internet and even the use of electrical systems in medicine, such as the permanent monitoring of important bodily functions by sensors. Printed electronics offer a solution for a wide range of requirements. Uncertainties regarding reliability and, essentially, long process times due to the long post-treatment process using convection as well as a lack of basic understanding of the general processes involved often hinder further dissemination.

The research work carried out here starts at this point and provides a basic understanding of the process of sintering printed electronics with alternative photonic processes, thus meeting the requirement of "cost-effectiveness", especially from an economic point of view. The conductive structures produced using NIR and UV as photonic sintering processes, achieve comparable and better results than conventional convection sintering with > 10 MS/m in less than 120 seconds on average. Due to the complexity of sintering printed electronics, a detailed analysis of the theory, the relevant influencing factors, and a comparison of possible alternative (chemical, electrical, photonic) sintering processes is presented. Subsequently, the advantages of NIR and UV as cost-effective alternative sintering processes with great application potential for aerosol-jet printed structures are discussed. The research work carried out results in the identification of suitable process parameters (UV: 405 nm, 100 % power, 60 – 180 seconds; NIR: 58 – 85 % power, 2,3 – 5 seconds) through the prior in-depth analysis of ink and material properties (reflectance measurement, TGA analysis) and qualification methods (microscopy, environmental tests, adhesion tests, electrical characterization). To overcome the error-proneness of conventional measurement methods for electrical conductivity identification, a new model based on high-frequency effects is developed, which enables the decomposition-free electrical analysis.

The Aerosol-Jet process for the fabrication of printed electronics is selected as a digital printing process to deposit silver nanoparticle inks on low-cost polymer substrates made of LCP and PA6. The selected layout consists of lines for electrical characterization (length: 10 mm) and areas (2 x 2 mm)

for adhesion characterization. NIR and UV irradiation were selected as suitable methods based on their determined absorption properties. The interaction of the absorption properties between substrate material and ink material is of decisive importance for the subsequent sintering. A strong absorption of the silver nanoparticle ink with only slight heating of the substrate material is decisive for good results without damaging the substrate. The test results show that conductivities of more than 10 MS/m were achieved with sintering times of less than two minutes, depending on the ink and substrate used. The extent to which the material composite reacts to environmental influences is strongly dependent on the combination of ink material, substrate material and sintering method. Reliable scientific statements on the quality of sintering with alternative methods therefore require application-specific considerations that take both the material selection and the application environment into account.

The challenge of reliability of printed electronics in view of their later application and a fundamental understanding between electrical and mechanical properties could be clarified based on thermal environmental stress tests the importance of mutually matched materials and sintering processes. Samples sintered with alternative densification methods show significantly higher robustness under various temperature and humidity loads than conventionally sintered samples. Rigid substrate materials also show better results compared to polyimide film. In principle, it is not possible to automatically conclude from a very good electrical bond strength (samples sintered at 160 °C) to their mechanical properties. In case of doubt, possible post-treatment methods, such as coating the printed structure with protective lacquer, offer a possibility to improve the long-term reliability.

The simple measurement setup consisting of a network analyzer and two APC7 connectors does not require any lengthy sample preparation. Using samples sintered at different temperatures (80 °C – 200 °C) for 30 minutes, it was possible to generate different conductivities of the samples, which served to validate the model. By adapting the model to the measured insertion loss and phase, it was possible to calculate not only the electrical conductivity but also the layer thickness. The application of the measurement method to structures sintered with Xe flash pulses also demonstrates the applicability of the new measurement method.

In the growing field of electronics production in general, the potential applications of the developed model are not limited to printed electronics but can also be transferred to any thin-film problem. The functionality of the

measurement method in determining electrical conductivity and layer thickness was demonstrated using sputtered test specimens. The research work carried out provides a sound basis for further scientific work. This work can be aimed at further optimizing the model that has been set up and to force the uncertainties regarding the cause of the change in conductivity as a function of frequency. The focus here should be on the influence of layer thickness changes on the model. The understanding of the model can also be expanded with a targeted layer structure of different materials. The use of the analytical model for alternative sintering processes makes it possible to analyze them regarding optimal sintering parameters depending on the materials used. In material and process-related development work, the identified influencing variables on the quality of sintering can be consistently optimized.

Literaturverzeichnis

- [1] KÄSTNER, I. *Johannes Gutenberg*. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1978. Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner. 37. ISBN 9783663104292
- [2] MEGGS, P.B. *A history of graphic design*. 3. Auflage. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998. ISBN 9780442022785
- [3] SUGANUMA, K. *Introduction to printed electronics*. New York: Springer New York, 2014. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. 74. ISBN 978-1-4614-9625-0
- [4] CUI, Z. *Printed electronics. Materials, technologies and applications*. Singapore: Wiley Higher Education Press, 2016. ISBN 9781118920923
- [5] ORGANIC AND PRINTED ELECTRONICS ASSOCIATION. *So erobert gedruckte Elektronik den Alltag* [online]. Verfügbar unter: <https://lopec.com/de/entdecken/branchen-themen/gedruckte-elektronik/>
- [6] GLOBAL BUSINESS DEVELOPMENT TEAM. *Printed Electronics Market Revenue to Total USD 75.2 Billion by 2032 | Amid Rising Demand for IoT Devices*, 11. Dezember 2023
- [7] OE-A VDMA. *Roadmap for Organic and Printed Electronics, 2020*
- [8] HEACOCK, M. und ANDERE. E-Waste and Harm to Vulnerable Populations: A Growing Global Problem [online]. *Environmental health perspectives*, 2016, 124(5), S. 550-555. Verfügbar unter: doi:10.1289/ehp.1509699
- [9] WIKLUND, J. und ANDERE. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts [online]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2021, 5(3), S. 89. Verfügbar unter: doi:10.3390/jmmp5030089
- [10] ISMAIL, H. und M.M. HANAFIAH. A review of sustainable e-waste generation and management: Present and future perspectives [online]. *Journal of environmental management*, 2020, 264, S. 110495. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jenvman.2020.110495

- [11] KUNNARI, E., J. VALKAMA, M. KESKINEN und P. MANSIKKAMÄKI. Environmental evaluation of new technology: printed electronics case study [online]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(9), S. 791-799. ISSN 09596526. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jclepro.2008.11.020
- [12] IACOPI, F. und F. BALESTRA. *More-than-Moore Devices and Integration for Semiconductors*. Cham: Springer International Publishing, 2023. ISBN 978-3-031-21609-1
- [13] ZHANG, Y., C. LIU und D. WHALLEY. Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: A review of current state-of-the-art technologies. In: *2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*: IEEE, 10. August 2009 - 13. August 2009, S. 497-503. ISBN 978-1-4244-4658-2
- [14] ROBERTSON, C.T. *Printed circuit board. Designer's reference, basics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2004. Prentice Hall modern semiconductor design series. ISBN 9780130674814
- [15] CLARK, R.H. *Handbook of Printed Circuit Manufacturing*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985. ISBN 9789401170123
- [16] WEI, W. *Printed Electronics Technologies*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2022. ISBN 978-1-78801-415-1
- [17] PIQUÉ, A. und D.B. CHRISEY. *Direct-write technologies for rapid prototyping applications. Sensors, electronics and integrated power sources*. San Diego, Calif.: Acad. Press, 2002. ISBN 9780121742317
- [18] LEWIS, J.A. und G.M. GRATSON. Direct writing in three dimensions [online]. *Materials Today*, 2004, 7(7-8), S. 32-39. ISSN 13697021. Verfügbar unter: doi:10.1016/S1369-7021(04)00344-X
- [19] FISHER, C., L.N. SKOLROOD, K. LI, P.C. JOSHI und T. AYTUG. Aerosol-Jet Printed Sensors for Environmental, Safety, and Health Monitoring: A Review [online]. *Advanced Materials Technologies*, 2023. ISSN 2365709X. Verfügbar unter: doi:10.1002/admt.202300030
- [20] NI, Y., R. JI, K. LONG, T. BU, K. CHEN und S. ZHUANG. A review of 3D-printed sensors [online]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2017, 52(7), S. 623-652. ISSN 0570-4928. Verfügbar unter: doi:10.1080/05704928.2017.1287082

- [21] LIU, H. und ANDERE. 3D Printed Flexible Strain Sensors: From Printing to Devices and Signals [online]. *Advanced Materials*, 2021, **33**(8), S. e2004782. ISSN 0935-9648. Verfügbar unter: doi:10.1002/adma.202004782
- [22] LIU, X. und ANDERE. Recent Progress on Smart Fiber and Textile Based Wearable Strain Sensors: Materials, Fabrications and Applications [online]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, **4**(3), S. 361-389. ISSN 2524-7921. Verfügbar unter: doi:10.1007/s42765-021-00126-3
- [23] JIANG, Y. und ANDERE. Recent Advances in 3D Printed Sensors: Materials, Design, and Manufacturing [online]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, **8**(2). ISSN 2365709X. Verfügbar unter: doi:10.1002/admt.202200492
- [24] DYSON, M. *Printed and Flexible Sensors 2022-2032: Technologies, Players Markets*, 2022
- [25] LOMAKIN, K., G. GOLD, S. HEROLD, L. RINGEL, J. RINGEL, D. SIMON, M. SIPPEL, A. SION, M. VOSSIEK und K. HELMREICH. SLA-Printed 3-D Waveguide Paths for E-Band Using Electroless Silver Plating [online]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, **9**(12), S. 2476-2481. ISSN 2156-3950. Verfügbar unter: doi:10.1109/tcpmt.2019.2927671
- [26] LOMAKIN, K., M. SIPPEL, K. HELMREICH und G. GOLD. Design and Analysis of 3D Printed Slotted Waveguides for D-Band using Stereolithography and Electroless Silver Plating. In: *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*: IEEE, 2020
- [27] LOMAKIN, K., T. PAVLENKO, M. SIPPEL, G. GOLD, T. WEIDNER, K. HELMREICH, M. ANKENBRAND und J. FRANKE. 3D Printed Helix Antenna. In: *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*: Institution of Engineering and Technology, 2018
- [28] LOMAKIN, K., M. SIPPEL, I. ULLMANN, K. HELMREICH und G. GOLD. 3D Printed Helix Antenna for 77GHz. In: *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*: IEEE, 2020

- [29] HOFMANN, A., K. LOMAKIN, M. SIPPEL und G. GOLD. Additively Manufactured Broadwall Waveguide Couplers for V-Band Applications. In: *2022 14th German Microwave Conference (GeMiC)*, S. 1-4
- [30] FRANKE, J. *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger*. München: Hanser, 2013. ISBN 978-3-446-43441-7
- [31] PACKHAM, D. Surface energy, surface topography and adhesion [online]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2003, 23(6), S. 437-448. ISSN 01437496. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0143-7496(03)00068-X
- [32] NISATO, G., D. LUPO und S. GANZ. *Organic and Printed Electronics. Fundamentals and Applications*: Pan Stanford Publishing, 2016. ISBN 9789814669740
- [33] HARTEN, U. *Physik. Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 6. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2014. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-642-53853-7
- [34] BISCHOF, C. ND-Plasmatechnik im Umfeld der Haftungsproblematik bei Metall-Polymer-Verbunden [online]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 1993, 24(2), S. 33-41. ISSN 0933-5137. Verfügbar unter: doi:10.1002/mawe.19930240208
- [35] HABENICHT, G. *Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6. Aufl. 2009. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-85264-3
- [36] BISCHOF, C. und W. POSSART. *Adhäsion: Theoretische und experimentelle Grundlagen*. Berlin: Akademie-Verlag, 1982
- [37] HO, C.Y. und R.E. TAYLOR. *Thermal Expansion of Solids*: ASM International, 1998. ISBN 9781615032150
- [38] MARTINS, P., N. PEREIRA, A.C. LIMA, A. GARCIA, C. MENDES-FILIFE, R. POLICIA, V. CORREIA und S. LANCEROS-MENDEZ. Advances in Printing and Electronics: From Engagement to Commitment [online]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(16). ISSN 1616-301X. Verfügbar unter: doi:10.1002/adfm.202213744

- [39] GOLD, G., K. LOMAKIN, K. HELMREICH und U. ARZ. High-Frequency Modeling of Coplanar Waveguides Including Surface Roughness [online]. *Advances in Radio Science*, 2019, **17**, S. 51-57. Verfügbar unter: doi:10.5194/ars-17-51-2019
- [40] GOLD, G. und K. HELMREICH. A Physical Surface Roughness Model and Its Applications [online]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, **65**(10), S. 3720-3732. ISSN 0018-9480. Verfügbar unter: doi:10.1109/tmtt.2017.2695192
- [41] CANO-RAYA, C., Z.Z. DENCHEV, S.F. CRUZ und J.C. VIANA. Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics – A review [online]. *Applied Materials Today*, 2019, **15**, S. 416-430. ISSN 23529407. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apmt.2019.02.012
- [42] KIM, J., R. KUMAR, A.J. BANDODKAR und J. WANG. Advanced Materials for Printed Wearable Electrochemical Devices: A Review [online]. *Advanced Electronic Materials*, 2017, **3**(1), S. 1600260. ISSN 2199-160X. Verfügbar unter: doi:10.1002/aelm.201600260
- [43] PERELAER, J., P.J. SMITH, D. MAGER, D. SOLTMAN, S.K. VOLKMAN, V. SUBRAMANIAN, J.G. KORVINK und U.S. SCHUBERT. Printed electronics: the challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials [online]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, **20**(39), S. 8446. ISSN 0959-9428. Verfügbar unter: doi:10.1039/c0jm00264j
- [44] MAGDASSI, S., M. GROUCHKO und A. KAMYSHNY. Copper Nanoparticles for Printed Electronics: Routes Towards Achieving Oxidation Stability [online]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2010, **3**(9), S. 4626-4638. ISSN 1996-1944. Verfügbar unter: doi:10.3390/ma3094626
- [45] DIENDORF, J. *Silber-Nanopartikel – Synthese, Stabilität und biologische Wirkungen*, 2012
- [46] KAMYSHNY, A. Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics [online]. *The Open Applied Physics Journal*, 2011, **4**(1), S. 19-36. ISSN 18741835. Verfügbar unter: doi:10.2174/1874183501104010019
- [47] HANSEN, C.M. *The three dimensional solubility parameter and solvent diffusion coefficient: Their importance in surface coating formulation*: Danish Technical Press, 1967

- [48] TAN, H.W., T. TRAN und C.K. CHUA. Review of 3D printed electronics: metallic nanoparticles inks [online]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)*, 2018, S. 139-144. Verfügbar unter: doi:10.25341/D42S3G
- [49] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 16500: 2017, *Drucktechnik - Grundbegriffe*
- [50] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 16514: 2018, *Drucktechnik - Begriffe für den Hochdruck*
- [51] BÜHLER, P., P. SCHLAICH und D. SINNER. *Druck. Druckverfahren - Werkstoffe - Druckverarbeitung*. Berlin: Springer Vieweg, 2018. Bibliothek der Mediengestaltung. ISBN 978-3-662-54611-6
- [52] KHAN, S., L. LORENZELLI und R.S. DAHIYA. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review [online]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(6), S. 3164-3185. ISSN 1530-437X. Verfügbar unter: doi:10.1109/JSEN.2014.2375203
- [53] STAHL, S. *Einfluss der Druckform und der Fluidviskosität auf die Schichtdicke von im Tiefdruck hergestellten Funktionsschichten und deren Charakterisierung*. Dissertation. Darmstadt, 2013
- [54] BAUMANN, H. und H.-J. TIMPE. Chemical Aspects of Offset Printing [online]. *Journal für Praktische Chemie/Chemiker-Zeitung*, 1994, **336**(5), S. 377-389. ISSN 0941-1216. Verfügbar unter: doi:10.1002/prac.19943360502
- [55] HAGBERG, J., M. PUDAS, S. LEPPÄVUORI, K. ELSEY und A. LOGAN. Gravure offset printing development for fine line thick film circuits [online]. *Microelectronics International*, 2001, **18**(3), S. 32-35. ISSN 1356-5362. Verfügbar unter: doi:10.1108/13565360110405875
- [56] HYUN, W.J., S. LIM, B.Y. AHN, J.A. LEWIS, C.D. FRISBIE und L.F. FRANCIS. Screen Printing of Highly Loaded Silver Inks on Plastic Substrates Using Silicon Stencils [online]. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, **7**(23), S. 12619-12624. Verfügbar unter: doi:10.1021/acsami.5b02487

- [57] AHMED, Z., R. TORAH und J. TUDOR. Optimisation of a novel direct-write dispenser printer technique for improving printed smart fabric device performance. In: B. CHARLOT, Hg. *2015 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP 2015)*. Montpellier, France, 27 - 30 April 2015. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 1-5. ISBN 978-1-4799-8627-9
- [58] OTHMAN, N. *Entwicklung eines Verfahrens zum präzisen Punkt- und Linienauftrag von hochviskosem Leitleber mit einem geregelten Mikrodosiersystem*: Universität Stuttgart, 2005
- [59] EASTMAN KODAK COMPANY. *PROSPER 7000 Turbo Press* [online]. *The world's fastest inkjet press, 2022*. Verfügbar unter: <https://www.kodak.com/content/products-brochures/Print/KODAK-PROSPER-7000-Turbo-Press-datasheet-EN.pdf>
- [60] LU, S., X. CHEN, H. ZHENG, Y. ZHAO und Y. LONG. Simulation and Experiment on Droplet Volume for the Needle-Type Piezoelectric Jetting Dispenser [online]. *Micromachines*, 2019, **10**(9). ISSN 2072-666X. Verfügbar unter: doi:10.3390/mi10090623
- [61] SCOUTARIS, N., A. NION, A. HURT und D. DOUROUMIS. Jet dispensing as a high throughput method for rapid screening and manufacturing of cocrystals [online]. *CrystEngComm*, 2016, **18**(27), S. 5079-5082. Verfügbar unter: doi:10.1039/C6CE00664G
- [62] ANKENBRAND, M., Y. EICHE und J. FRANKE. Programming and Evaluation of a Multi-Axis/Multi-Process Manufacturing System for Mechatronic Integrated Devices. In: *2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2019)*. Venue: Toki Messe, Niigata, Japan : dates: April 17 (Wed.)-20 (Sat.). Piscataway, NJ: IEEE, 2019, S. 273-278. ISBN 978-4-9902-1887-4
- [63] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 3252, *Pulvermetallurgie - Begriffe (ISO 3252:2023)*
- [64] SCHATT, W. *Pulvermetallurgie. Technologien und Werkstoffe*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. VDI-Buch. ISBN 354023652X
- [65] ZAK FANG, Z., Hg. *Sintering of Advanced Materials*: Elsevier, 2010. ISBN 9781845695620
- [66] WERNER, C. *Untersuchung zur Sinterung Aerosol Jet und Ink Jet gedruckter Ag- und CuNiMn-Mikrostrukturen*, 5. Juni 2014

- [67] GERMAN, R.M. *Sintering theory and practice*. New York: Wiley, 1996. A Wiley interscience publication. ISBN 047105786X
- [68] THÜMMLER, F. und W. THOMMA. The sintering process [online]. *Metallurgical Reviews*, 1967, **12**(1), S. 69-108. ISSN 0076-6690. Verfügbar unter: doi:10.1179/mtlr.1967.12.1.69
- [69] KANG, S.-J. *Sintering. Densification, grain growth and micro-structure*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 9780080493077
- [70] GERMAN, R. *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*: Elsevier Reference Monographs, 2014. ISBN 9780124016828
- [71] RAHAMAN, M.N. Kinetics and mechanisms of densification. In: Z. ZAK FANG, Hg. *Sintering of Advanced Materials*: Elsevier, 2010, S. 33-64. ISBN 9781845695620
- [72] ZENG, P., S. ZAJAC, P. CLAPP und J. RIFKIN. Nanoparticle sintering simulations [online]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, **252**(2), S. 301-306. ISSN 09215093. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0921-5093(98)00665-0
- [73] FANG, Z.Z. und H. WANG. Densification and grain growth during sintering of nanosized particles [online]. *International Materials Reviews*, 2008, **53**(6), S. 326-352. ISSN 0950-6608. Verfügbar unter: doi:10.1179/174328008X353538
- [74] COUCHMAN, P.R. und W.A. JESSER. Thermodynamic theory of size dependence of melting temperature in metals [online]. *Nature*, 1977, **269**(5628), S. 481-483. ISSN 0028-0836. Verfügbar unter: doi:10.1038/269481a0
- [75] JIANG, Q. und F.G. SHI. Size-dependent Initial Sintering Temperature of Ultrafine Particles. *Journal of Materials Sciences & Technology*, 1998, **14**(2), S. 171-172
- [76] VOLKMAN, S.K., S. YIN, T. BAKHISHEV, K. PUNTAMBEKAR, V. SUBRAMANIAN und M.F. TONEY. Mechanistic Studies on Sintering of Silver Nanoparticles [online]. *Chemistry of Materials*, 2011, **23**(20), S. 4634-4640. ISSN 0897-4756. Verfügbar unter: doi:10.1021/cm202561u

- [77] MAGDASSI, S., M. GROUCHKO, O. BEREZIN und A. KAMYSHNY. Triggering the Sintering of Silver Nanoparticles at Room Temperature [online]. *ACS Nano*, 2010, **4**(4), S. 1943-1948. ISSN 1936-0851. Verfügbar unter: doi:10.1021/nn901868t
- [78] MOON, K.-S., H. DONG, R. MARIC, S. POTHUKUCHI, A. HUNT, Y. LI und C.P. WONG. Thermal behavior of silver nanoparticles for low-temperature interconnect applications [online]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**(2), S. 168-175. ISSN 1543-186X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11664-005-0229-8
- [79] FANG, Z.Z. und H. WANG. Sintering of ultrafine and nanosized particles. In: Z. ZAK FANG, Hg. *Sintering of Advanced Materials*: Elsevier, 2010, S. 434-473. ISBN 9781845695620
- [80] MAGDASSI, S. und A. KAMYSHNY, Hg. *Nanomaterials for 2D and 3D Printing*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. ISBN 9783527685790
- [81] CHOI, Y., K. SEONG und Y. PIAO. Metal–Organic Decomposition Ink for Printed Electronics [online]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, **6**(20), S. 1901002. ISSN 2196-7350. Verfügbar unter: doi:10.1002/admi.201901002
- [82] ALLEN, M.L., M. ARONNIEMI, T. MATTILA, A. ALASTALO, K. OJANPERÄ, M. SUHONEN und H. SEPPÄ. Electrical sintering of nanoparticle structures [online]. *Nanotechnology*, 2008, **19**(17), S. 175201. ISSN 0957-4484. Verfügbar unter: doi:10.1088/0957-4484/19/17/175201
- [83] WÜNSCHER, S., R. ABBEL, J. PERELAER und U.S. SCHUBERT. Progress of alternative sintering approaches of inkjet-printed metal inks and their application for manufacturing of flexible electronic devices [online]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, **2**(48), S. 10232-10261. ISSN 2050-7526. Verfügbar unter: doi:10.1039/C4TC01820F
- [84] ALLEN, M., A. ALASTALO, M. SUHONEN, T. MATTILA, J. LEPPANIEMI und H. SEPPÄ. Contactless Electrical Sintering of Silver Nanoparticles on Flexible Substrates [online]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, **59**(5), S. 1419-1429. ISSN 0018-9480. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMTT.2011.2123910

- [85] WERNER, C., D. GODLINSKI, V. ZÖLLMER und M. BUSSE. Morphological influences on the electrical sintering process of Aerosol Jet and Ink Jet printed silver microstructures [online]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2013, **24**(11), S. 4367-4377 [Zugriff am: 5. April 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10854-013-1412-y
- [86] WAKUDA, D., K.-S. KIM und K. SUGANUMA. Room-Temperature Sintering Process of Ag Nanoparticle Paste [online]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2009, **32**(3), S. 627-632. ISSN 1521-3331. Verfügbar unter: doi:10.1109/TCAPT.2009.2015874
- [87] WAKUDA, D., M. HATAMURA und K. SUGANUMA. Novel method for room temperature sintering of Ag nanoparticle paste in air [online]. *Chemical Physics Letters*, 2007, **441**(4-6), S. 305-308. ISSN 00092614. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cplett.2007.05.033
- [88] GROUCHKO, M., A. KAMYSHNY, C.F. MIHAILESCU, D.F. ANGHEL und S. MAGDASSI. Conductive inks with a "built-in" mechanism that enables sintering at room temperature [online]. *ACS Nano*, 2011, **5**(4), S. 3354-3359. ISSN 1936-0851. Verfügbar unter: doi:10.1021/nn2005848
- [89] LAYANI, M. und S. MAGDASSI. Flexible transparent conductive coatings by combining self-assembly with sintering of silver nanoparticles performed at room temperature [online]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, **21**(39), S. 15378. ISSN 0959-9428. Verfügbar unter: doi:10.1039/c1jm13174e
- [90] LAYANI, M., M. GROUCHKO, S. SHEMESH und S. MAGDASSI. Conductive patterns on plastic substrates by sequential inkjet printing of silver nanoparticles and electrolyte sintering solutions [online]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, **22**(29), S. 14349. ISSN 0959-9428. Verfügbar unter: doi:10.1039/c2jm32789a
- [91] LAYANI, M., M. GRUCHKO, O. MILO, I. BALBERG, D. AZULAY und S. MAGDASSI. Transparent conductive coatings by printing coffee ring arrays obtained at room temperature [online]. *ACS Nano*, 2009, **3**(11), S. 3537-3542. ISSN 1936-0851. Verfügbar unter: doi:10.1021/nn901239z

- [92] REINHOLD, I., C.E. HENDRIKS, R. ECKARDT, J.M. KRANENBURG, J. PERELAER, R.R. BAUMANN und U.S. SCHUBERT. Argon plasma sintering of inkjet printed silver tracks on polymer substrates [online]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, **19**(21), S. 3384. ISSN 0959-9428. Verfügbar unter: doi:10.1039/b823329b
- [93] WOLF, F.M., J. PERELAER, S. STUMPF, D. BOLLEN, F. KRIEBEL und U.S. SCHUBERT. Rapid low-pressure plasma sintering of inkjet-printed silver nanoparticles for RFID antennas [online]. *Journal of Materials Research*, 2013, **28**(9), S. 1254-1261. ISSN 0884-2914. Verfügbar unter: doi:10.1557/jmr.2013.73
- [94] WÜNSCHER, S., S. STUMPF, A. TEICHLER, O. PABST, J. PERELAER, E. BECKERT und U.S. SCHUBERT. Localized atmospheric plasma sintering of inkjet printed silver nanoparticles [online]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, **22**(47), S. 24569. ISSN 0959-9428. Verfügbar unter: doi:10.1039/c2jm35586h
- [95] MA, S., V. BROMBERG, L. LIU, F.D. EGITTO, P.R. CHIAROT und T.J. SINGLER. Low temperature plasma sintering of silver nanoparticles [online]. *Applied Surface Science*, 2014, **293**, S. 207-215. ISSN 01694332. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apsusc.2013.12.135
- [96] PERELAER, J., R. JANI, M. GROUCHKO, A. KAMYSHNY, S. MAGDASSI und U.S. SCHUBERT. Plasma and microwave flash sintering of a tailored silver nanoparticle ink, yielding 60% bulk conductivity on cost-effective polymer foils [online]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(29), S. 3993-3998. ISSN 0935-9648. Verfügbar unter: doi:10.1002/adma.201200899
- [97] MOORES, A. und F. GOETTMANN. The plasmon band in noble metal nanoparticles: an introduction to theory and applications [online]. *New Journal of Chemistry*, 2006, **30**(8), S. 1121. ISSN 1144-0546. Verfügbar unter: doi:10.1039/b604038c
- [98] KELLY, K.L., E. CORONADO, L.L. ZHAO und G.C. SCHATZ. The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment [online]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003, **107**(3), S. 668-677. ISSN 1520-6106. Verfügbar unter: doi:10.1021/jp026731y

- [99] LI, Y., T. VERBIEST, R. STROBBE und I.F.J. VANKELECOM. Silver nanoparticles as localized “nano-heaters” under LED light irradiation to improve membrane performance [online]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, **2**(9), S. 3182. ISSN 2050-7488. Verfügbar unter: doi:10.1039/c3ta14406b
- [100] POLZINGER, B., F. SCHOEN, V. MATIC, J. KECK, H. WILLECK, W. EBERHARDT und H. KUECK. UV-sintering of inkjet-printed conductive silver tracks. In: *2011 11th International Conference on Nanotechnology*, S. 201-204
- [101] SALEH, E., F. ZHANG, Y. HE, J. VAITHILINGAM, J.L. FERNANDEZ, R. WILDMAN, I. ASHCROFT, R. HAGUE, P. DICKENS und C. TUCK. 3D Inkjet Printing of Electronics Using UV Conversion [online]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, **2**(10), S. 1700134. ISSN 2365709X. Verfügbar unter: doi:10.1002/admt.201700134
- [102] NIITTYNEN, J., R. ABDEL, M. MÄNTYSALO, J. PERELAER, U.S. SCHUBERT und D. LUPO. Alternative sintering methods compared to conventional thermal sintering for inkjet printed silver nanoparticle ink [online]. *Thin Solid Films*, 2014, **556**, S. 452-459. ISSN 00406090. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tsf.2014.02.001
- [103] LEE, D.J., S.H. PARK, S. JANG, H.S. KIM, J.H. OH und Y.W. SONG. Pulsed light sintering characteristics of inkjet-printed nanosilver films on a polymer substrate [online]. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2011, **21**(12), S. 125023. ISSN 0960-1317. Verfügbar unter: doi:10.1088/0960-1317/21/12/125023
- [104] KANG, J.S., J. RYU, H.S. KIM und H.T. HAHN. Sintering of Inkjet-Printed Silver Nanoparticles at Room Temperature Using Intense Pulsed Light [online]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(11), S. 2268-2277. ISSN 0361-5235. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11664-011-1711-0
- [105] PAENG, D., J. YEO, D. LEE, S.-J. MOON und C.P. GRIGOROPOULOS. Laser wavelength effect on laser-induced photo-thermal sintering of silver nanoparticles [online]. *Applied Physics A*, 2015, **120**(4), S. 1229-1240. ISSN 0947-8396. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00339-015-9320-z

- [106] KRAVCHUK, O., Y. BOBITSKI und M. REICHENBERGER. Laser curing of inkjet printed strain gauge structures. In: *2016 MIXDES - 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*: IEEE, 23. Juni 2016 - 25. Juni 2016, S. 343-345. ISBN 978-83-63578-09-1
- [107] KIM, M.-K., J.Y. HWANG, H. KANG, K. KANG, S.-H. LEE und S.-J. MOON. Laser sintering of the printed silver ink. In: *2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*: IEEE, 17. November 2009 - 20. November 2009, S. 155-158. ISBN 978-1-4244-4627-8
- [108] KIM, M.-K., H. KANG, K. KANG, S.-H. LEE, J.Y. HWANG, Y. MOON und S.-J. MOON. Laser sintering of inkjet-printed silver nanoparticles on glass and PET substrates. In: *10th IEEE International Conference on Nanotechnology*: IEEE, 17. August 2010 - 20. August 2010, S. 520-524. ISBN 978-1-4244-7033-4
- [109] GU, W., W. YUAN, T. ZHONG, X. WU, C. ZHOU, J. LIN und Z. CUI. Fast near infrared sintering of silver nanoparticle ink and applications for flexible hybrid circuits [online]. *RSC Advances*, 2018, **8**(53), S. 30215-30222. Verfügbar unter: doi:10.1039/C8RA04468F
- [110] CHERRINGTON, M., T.C. CLAYPOLE, D. DEGANELLO, I. MABBETT, T. WATSON und D. WORSLEY. Ultrafast near-infrared sintering of a slot-die coated nano-silver conducting ink [online]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, **21**(21), S. 7562. ISSN 0959-9428. Verfügbar unter: doi:10.1039/c1jm10630a
- [111] DENNEULIN, A., A. BLAYO, C. NEUMAN und J. BRAS. Infra-red assisted sintering of inkjet printed silver tracks on paper substrates [online]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2011, **13**(9), S. 3815-3823. ISSN 1388-0764. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11051-011-0306-2
- [112] TOBJÖRK, D., H. AARNIO, P. PULKKINEN, R. BOLLSTRÖM, A. MÄÄTTÄNEN, P. IHALAINEN, T. MÄKELÄ, J. PELTONEN, M. TOIVAKKA, H. TENHU und R. ÖSTERBACKA. IR-sintering of ink-jet printed metal-nanoparticles on paper [online]. *Thin Solid Films*, 2012, **520**(7), S. 2949-2955. ISSN 00406090. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tsf.2011.10.017

- [113] PERELAER, J., B.-J. DE GANS und U.S. SCHUBERT. Ink-jet Printing and Microwave Sintering of Conductive Silver Tracks [online]. *Advanced Materials*, 2006, **18**(16), S. 2101-2104. ISSN 0935-9648. Verfügbar unter: doi:10.1002/adma.200502422
- [114] PERELAER, J., R. ABBEL, S. WÜNSCHER, R. JANI, T. VAN LAMMEREN und U.S. SCHUBERT. Roll-to-roll compatible sintering of inkjet printed features by photonic and microwave exposure: from non-conductive ink to 40% bulk silver conductivity in less than 15 seconds [online]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(19), S. 2620-2625. ISSN 0935-9648. Verfügbar unter: doi:10.1002/adma.201104417
- [115] LINK, S., Z.L. WANG und M.A. EL-SAYED. Alloy Formation of Gold-Silver Nanoparticles and the Dependence of the Plasmon Absorption on Their Composition [online]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1999, **103**(18), S. 3529-3533. ISSN 1520-6106. Verfügbar unter: doi:10.1021/jp990387w
- [116] SATAS, D. Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology [online], 1989.4
- [117] LACOMBE, R. *Adhesion measurement methods. Theory and practice*. Boca Raton: CRC Taylor & Francis, 2005. ISBN 9781420028829
- [118] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Din EN 60068-2-14, *Umweltprüfungen - Teil 2: Prüfverfahren - Prüfung N: Temperaturwechsel (IEC 60068-2-14:2009)*
- [119] RIETVELD, G., C. KOIJMANS, L. HENDERSON, M.J. HALL, S. HARMON, P. WARNECKE und B. SCHUMACHER. DC conductivity measurements in the van der pauw geometry [online]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, **52**(2), S. 449-453. ISSN 0018-9456. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIM.2003.809917
- [120] BOUSFIELD, B. Non Empirical Surface Preparation / Nicht-empirische Schliffpräparation [online]. *Practical Metallography*, 1992, **29**(7), S. 356-365. ISSN 0032-678X. Verfügbar unter: doi:10.1515/pm-1992-290704
- [121] PIERSIG, W. und H.C. SORBY. *Henry Clifton Sorby - Begründer der klassischen Metallographie*. München: Grin-Verlag, 2009. ISBN 9783640272655

- [122] VANDER VOORT, G. *Metallography: Principles and Practice*, 1999. ISBN 978-0-87170-672-0
- [123] PETERSEN, J. Focussed Ion Beam [online]. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 2018, **30**(1), S. 40-47. ISSN 0947076X. Verfügbar unter: doi:10.1002/vipr.201800670
- [124] PILLATSCH, L., F. ÖSTLUND und J. MICHLER. FIBSIMS: A review of secondary ion mass spectrometry for analytical dual beam focussed ion beam instruments [online]. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2019, **65**(1), S. 1-19. ISSN 09608974. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.pcrysgrow.2018.10.001
- [125] LENZ, P., P. BARON, A. WITTMANN und G. FISCHER. Wear-Induced Attenuation on Transmission Lines and Their Causes [online]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2023, **24**(1), S. 102-114. ISSN 1229-7607. Verfügbar unter: doi:10.1007/s42341-022-00423-7
- [126] MERTSCHING, J. Theorie elektromagnetischer Wellen in Metallen und ihrer Wechselwirkung mit Ultraschallwellen (I) [online]. *physica status solidi (b)*, 1966, **14**(1), S. 3-61. ISSN 03701972. Verfügbar unter: doi:10.1002/pssb.19660140102
- [127] GUSTRAU, F. *Hochfrequenztechnik. Grundlagen der mobilen Kommunikationstechnik*. 3., aktualisierte Auflage, 2019. ISBN 9783446459502
- [128] HELMREICH, K. *Elektromagnetische Felder II. Kap. 9 Elektromagnetische Wellen in homogenen Medien*. Unterlagen zur Vorlesung, 2023
- [129] HENKE, H. *Elektromagnetische Felder. Theorie und Anwendung*. 5., erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2015. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-662-46917-0
- [130] HELMREICH, K. *Entwurf und Analyse von Schaltungen für hohe Datenraten. ENAS*. Unterlagen zur Vorlesung, 2020
- [131] JOHNSON, H.W. und M. GRAHAM. *High-speed signal propagation. Advanced black magic*. 10. printing. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2008. Prentice Hall modern semiconductor design series. ISBN 9780130844088

- [132] MEINKE, H.H., F.W. GUNDLACH und K. LANGE, Hg. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. 5., überarb. Aufl. Berlin: Springer, 1992. ISBN 978-3-540-54716-7

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] NEERMANN, S., M. SCHEETZ, J. FRANKE, J. ROUDENKO, J. SCHIRMER und M. REICHENBERGER. Substrate Pretreatments: An Investigation of the Effects on Aerosol Jet Printed Structures. In: R. SCHMITT und G. SCHUH, Hg. *Advances in Production Research*. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 352-360. ISBN 978-3-030-03450-4
- [P2] ROUDENKO, J. und S. NEERMANN. *Alternative Verdichtungsverfahren für nanopartikelhaltige Tinten gedruckt mit digitalen Druckverfahren für planare MID (Averdi)*. Schlussbericht vom 31.12.2019
- [P3] ROUDENKO, J., S. NEERMANN, J. SCHIRMER, M. REICHENBERGER und J. FRANKE. Sintering of digitally printed silver nanoparticle inks on flexible and rigid substrates by NIR- and UVradiation. In: *2021 14th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*: IEEE, 8. Februar 2021 - 11. Februar 2021, S. 1-8. ISBN 978-1-7281-7509-6
- [P4] NEERMANN, S., J. FRANKE, M. SIPPEL, K. LOMAKIN und G. GOLD. RF Characterization of the Homogeneity of Sintered Micro- and Nanoparticle Silver Inks for Printed Electronics. In: *2021 14th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*: IEEE, 8. Februar 2021 - 11. Februar 2021, S. 1-6. ISBN 978-1-7281-7509-6
- [P5] NEERMANN, S., M. STEINDL, J. FRANKE, E. MAYER und M. SCHMIDT. Qualification of NIR, UV and Laser Irradiation as Alternative Photonic Sintering Methods for Printed Electronics. In: *2020 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*: IEEE, 10. Februar 2020 - 13. Februar 2020, S. 1-8. ISBN 978-1-944543-14-3
- [P6] EHRNGRUBER, M., S. NEERMANN und M. ANKENBRAND. *Charakterisierungsverfahren zur Bestimmung der Sintereigenschaften gedruckter mikro- und nanopartikelhaltiger Tinten und ihr Einfluss auf die Homogenität der Leitfähigkeit und Zuverlässigkeit (SIMONE)*. Schlussbericht vom 31.12.2022, 2022

- [P7] EHRNGRUBER, M., S. NEERMANN und G. GOLD. A Transmission Method for Conductivity Extraction of Printed Silver Ink. In: *2022 52nd European Microwave Conference. 27-29 September 2022, Milan, Italy*. Piscataway, NJ: IEEE, 2022, S. 1-4. ISBN 978-2-8748-7069-9

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] STEINDL, M. *Analyse alternativer Verdichtungsverfahren und deren Auswirkung auf die Leitfähigkeit und Haftfestigkeit gedruckter Strukturen*, 2019
- [S2] ZIRN, J.-M. *Gegenüberstellung alternativer Sinterverfahren für leitfähige Tinten zur Herstellung gedruckter Elektronik*, 2019
- [S3] STEINDL, M. *Untersuchung verschiedener Substratvorbehandlungen und ihr Einfluss auf gedruckte Strukturen*, 2019
- [S4] BOECK, N. *Untersuchung unterschiedlicher Substratvorbehandlungen und deren Auswirkung auf die Leitfähigkeit und Haftfestigkeit gedruckter Strukturen*, 2018
- [S5] HONG, Z. *Untersuchung alternativer Verdichtungsverfahren für gedruckte Silbernanopartikelintinten*, 2019

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2025):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

| | |
|--------------|--|
| FAPS | Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik |
| FMT | Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik |
| KTmfk | Lehrstuhl für Konstruktionstechnik |
| LFT | Lehrstuhl für Fertigungstechnologie |
| LGT | Lehrstuhl für Gießereitechnik |
| LPT | Lehrstuhl für Photonische Technologien |
| REP | Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen |

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hergestoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungs- und Fertigungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionsysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hilderling
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöllner
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethode zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 8 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J.**Schwarzer**

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage
menschlichen Interaktionsverhal-
tens zur Analyse der Mensch-
Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder,
10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlen-
stoffschichten zur Anpassung der
Reibungsbedingungen und zur
Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder,
9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbeglei-
tendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder,
13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der
Rotationsschneidtechnologie in
der Verarbeitung von metallischen
Funktionsfolien für
mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder,
7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und
Erarbeitung einer Methodik zur
Herstellung maßgeschneiderter
Halbzeuge auf Basis eines neuarti-
gen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder,
11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenana-
lyse alternativer Antriebskonzepte
für die individuelle Langstrecken-
mobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder,
38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engi-
neering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder,
13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation
taktiler, intelligenter und
kollaborativer Roboterfähigkeiten
in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder,
3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion
produktinduzierter Nutzerstigma-
tisierung durch Förderung einer
gleichermaßen gebrauchstaugli-
chen wie emotionalen
Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder,
44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System
Development for Complex Manu-
facturing Applying Blockchain and
Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder,
10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

**Band 417: Benjamin Lengen-
felder**
Remote photoacoustic sensing us-
ing speckle-analysis for biomedical
imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder,
10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwi-
schen dem tribochemischen Auf-
bau von Grenzschichten und der
Ausbildung von White Etching
Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder,
10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147- 621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Be-
schleunigung von Qualifizierungs-
untersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder,
7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kup-
fer auf Aluminiumoxid-Keramik
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bil-
der, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and
Process Zone Formation as a Basis
for Sensing Approaches within
PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder,
0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spec-
troscopy (LIBS) as a diagnostics
tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12
Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen
und Verstemmen von Stahlwerk-
stoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6
Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasier-
ten, strukturierten Metallisierung
thermoaktiver Oberflächen im in-
dustriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder,
11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des
Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder,
23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcha-
rakterisierung für die numerische
Auslegung von Blechumformpro-
zessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13
Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebe-
handlungsmethoden zur Verbesse-
rung des Umformverhaltens und
der Bauteileigenschaften von Alu-
miniumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1
Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtigte Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel

Lutz
Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte
KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian

Wiesenmayer
Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation
KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohrmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsi- cherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak

Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann

Beitrag zur Messunsicherheitser- mittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des vir- tuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vor- wärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus

Grundlagenwissenschaftliche Un- tersuchungen zum Kaltfließpres- sen kleinster metallischer Pin- Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth

Assessment of microcirculation by shifted position-diffuse reflectance imaging (SP-DRI) LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke

Methode zur Auswahl eines alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte Karosseriestrukturbau-
teile LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker

Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching

Numerische Optimierung von sekundären, geschmierten Punkt- und Ellipsenkontakten zur gezielten Auslegung von Rollenlagern KTmfk, xxv u. 206 Seiten, 70 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder, 4 Tab. 2024
ISBN: 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm

Kombinierte Material- und Energieflussimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder, 13 Tab. 2024
ISBN: 978-3-96147-770-8.

Band 452: Janik Schaude

Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4 Tab. 2024
ISBN: 978-3-96147-776-0.

Band 453: Philipp Bräuer

Nahinfrarot-Laser-Strukturierung und nasschemische Metallisierung von Aluminiumoxid mittels Laser-Absorptionsschicht FAPS, xx u. 152 Seiten, 55 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-780-7.

Band 454: Andreas Michael Müller

Definition and applications of the spatially discrete metrological descriptor framework for triangle mesh geometry data in 3D coordinate metrology FMT, x u. 220 Seiten, 75 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-782-1.

Band 455: Sina Martin

Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme mittels eines selektiven Druckverfahrens FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 76 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-789-0.

Band 456: Manuel Reck

Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinierten Umformprozess LFT, ix u. 170 Seiten, 83 Bilder, 10 Tab. 2025.
ISBN: 978-3-96147-798-2.

Band 457: Simone Neermann

Untersuchung photonischer Sinterverfahren und Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens zur Qualifizierung der Sinterung gedruckter Elektronik FAPS, xix u. 145 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2025.
ISBN: 978-3-96147-800-2

Abstract

The increasing global demand for electrical systems and the use of digital data are driving the need for cost-effective, flexible and green electronics. Printed electronics offer a solution for many of these requirements. Uncertainties regarding reliability and long process times due to the long post-treatment process using convection, as well as a lack of basic understanding of the general processes involved, often hinder its widespread use. Against this background, the basic principles and influencing factors of the sintering of printed electronics are explained at the beginning and photonic sintering processes are evaluated for their use in aerosol-jet printed structures based on targeted, systematic investigations. A further focus of the present work results from the lack of characterization methods, which make a meaningful electrical analysis of printed structures difficult. The development of a new electrical measurement method will enable the targeted analysis of electrical conductivity in the future, considering the special material characteristics of printed electronics.

Der weltweit zunehmende Bedarf an elektrischen Systemen und die Nutzung digitaler Daten treiben die Forderung nach kostengünstiger, flexibler und grüner Elektronik immer weiter voran. Die gedruckte Elektronik bietet hierbei eine Lösung für eine Vielzahl der Anforderungen. Unsicherheiten bezüglich der Zuverlässigkeit und lange Prozesszeiten aufgrund des langen Nachbehandlungsprozesses mittels Konvektion sowie ein mangelndes Grundverständnis der generell ablaufenden Prozesse hemmen oft die weitere Verbreitung. Vor diesem Hintergrund werden zu Beginn die wesentlichen Grundlagen und Einflussfaktoren der Sinterung gedruckter Elektronik erläutert und anhand gezielter, systematischer Untersuchungen photonische Sinterverfahren für deren Einsatz bei Aerosol-Jet gedruckten Strukturen evaluiert. Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ergibt sich aus den mangelnden Charakterisierungsmethoden, die eine aussagekräftige elektrische Analyse gedruckter Strukturen erschweren. Die Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens ermöglicht zukünftig die gezielte Analyse der elektrischen Leitfähigkeit unter Beachtung der speziellen Materialcharakteristik gedruckter Elektronik.

