

FAU Studien aus dem Maschinenbau 369

Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer
Oberflächen mittels prozessüberwachter
aerosolbasierter Drucktechnologie

Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels
prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 369

Herausgeber der Reihe:

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. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Daniel Gräf

**Funktionalisierung technischer
Oberflächen mittels
prozessüberwachter aerosolbasierter
Drucktechnologie**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)
Prof. Dr.-Ing. habil. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2021

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.

Bitte zitieren als

Gräf, Daniel. 2021. *Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 369. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-434-9.

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 den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

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

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-433-2 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-434-9 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-434-9

**Funktionalisierung technischer Oberflächen
mittels prozessüberwachter
aerosolbasierter Drucktechnologie**

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

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Daniel Gräf, M.Sc.

aus Burghausen, Oberbayern

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

Tag der mündlichen Prüfung: 20.04.2021

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil.
Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl, TU Hamburg

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr. Jörg Franke für sein Vertrauen, seine stetige Unterstützung meiner Forschungstätigkeiten, den zahlreichen wertvollen Diskussionen und schließlich der Möglichkeit zur Promotion. Weiterhin möchte ich mich für die gewährten Freiheiten bedanken, durch die ich meine Forschungsinteressen weiterverfolgen konnte.

Des Weiteren geht mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl danke ich für die Erstellung des zweiten Gutachtens und Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Helmreich für seine Bereitschaft den Prüfungsausschuss zu komplettieren.

Einen großen Dank richte ich darüber hinaus an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Lehrstuhl FAPS. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen Matthias Friedlein, Florian Hefner, Marlene Kuhn, Sebastian Reitelshöfer, Johannes Hörber, Markus Ankenbrand, Iris Wittl, Paul Heisler, Robert Süß-Wolf, Li Wang, Ping Xu, Dr.-Ing. Timo Kordass, Jan Fröhlich, Niklas Piechulek, Moritz Meiners, Simon Fröhlig, Lisbeth Silva, Huong Nguyen und so vielen mehr.

Ein herzlicher Dank gilt meiner gesamten Familie, die mich auf meinem Bildungsweg stets gefördert und bei der Umsetzung meiner Interessen unterstützt hat. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern Ingrid und Dieter sowie meiner Verlobten Eva, die mir bei der Anfertigung der Dissertation stets zur Seite standen.

Danke.

Bad Endorf, im Mai 2021

Daniel Gräf

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
Bildverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xxi
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Aerosolbasierte Drucktechnologien	3
2.2 Funktionsprinzip von Aerosol-Jet-Drucksystemen	5
2.3 Charakterisierung aerosolbasierter Drucktechnologien	7
2.3.1 Einflussgrößen auf die Druckqualität	7
2.3.2 Einflussgrößen auf den Aerosolstrahl.....	13
2.4 Technologischer Handlungsbedarf.....	18
3 Funktionalisierung von Verkleidungselementen im Bereich der Flugzeugkabine.....	21
3.1 Herstellung von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise	22
3.2 Auswahl geeigneter Substrate	24
3.3 Funktionalisierung mittels digitaler Drucktechnologien.....	26
3.4 Voruntersuchungen für aerosolbasierte Drucktechnologien.....	31
3.5 Anwendungen und Systemintegration.....	33
3.6 Zusammenfassung und Ausblick	35
4 Theoretische Grundlagen und Methodik zur Charakterisierung von Oberflächen und gedruckten Leiterbahnen	37
4.1 Methodik zur Charakterisierung von Substratoberflächen für aerosolbasierte Drucktechnologien	37
4.1.1 Benetzung: Kontaktwinkel und Oberflächenenergie	38
4.1.2 Messmethodik für die Oberflächenwechselwirkung.....	39
4.1.3 Oberflächenprofil: Form, Welligkeit und Rauheit.....	43
4.1.4 Spektrale Leistungsdichte (PSD).....	46
4.1.5 Messmethodik für die Oberflächentopographie.....	50
4.2 Methodik zur Charakterisierung von Leiterbahnen für aerosolbasierte Drucktechnologien	57
4.2.1 Bestimmung der Leiterbahnquerschnitte	63

4.2.2	Erfassung der Leiterbahnkontur.....	68
4.2.3	Definition des Oversprays.....	73
4.2.4	Differenzierung des spezifischen Widerstands	75
5	Quantitative Analyse und Evaluierung von Oberflächen und gedruckten Leiterbahnen.....	77
5.1	Analyse von Substratoberflächen für aerosolbasierte Drucktechnologien.....	78
5.1.1	Oberflächenwechselwirkung	79
5.1.2	Oberflächentopographie	81
5.2	Analyse von Leiterbahnen für aerosolbasierte Drucktechnologien ...	87
5.2.1	Berechnung der Leiterbahnquerschnitte	87
5.2.2	Bewertung der Leiterbahnkontur	100
5.2.3	Evaluierung des Oversprays.....	111
5.2.4	Ermittlung des spezifischen Widerstands	115
5.3	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
6	Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien mittels Laser-Transmissions-Messsystem	123
6.1	Entwicklung eines Laser-Transmissions-Messsystems	123
6.1.1	Motivation und Hintergrund.....	123
6.1.2	Funktionsweise und mathematische Beschreibung.....	125
6.1.3	Aufbau und Integrationsvarianten	130
6.2	Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien	133
6.2.1	Identifikation von Messstrategien.....	133
6.2.2	Detektion von Prozessschwankungen und Prozesseinbrüchen	135
6.2.3	Korrelation der Transmission mit dem Massenstrom und Prozessparametern	141
6.3	Zusammenfassung und Ausblick.....	146
7	Zusammenfassung und Ausblick	147
8	Summary and Outlook	151
9	Literaturverzeichnis	155

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis

a	μm	Pixelabstand
A	μm^2	Fläche (Area), Querschnittsfläche
A_e	μm^2	Effektiv leitfähige Querschnittsfläche
A_m, A_r	μm^2	Gemessene und reale Leiterbahnquerschnittsfläche
A_A	μm^2	Querschnittsfläche Aerosolstrahl
A_S	μm^2	Querschnittsfläche der gedruckten Struktur auf dem Substrat
C_E	μm^2	Extinktionsquerschnitt eines Aerosolpartikels
d	mm	Düsenabstand
d_A, d_L	μm	Durchmesser Aersolstrahl, Laserstrahl
d_Q	μm	Durchmesser Fluid, Druckdüse
d_S	μm	Fußbreite Transmissionssignal
f	μm^{-1}	Ortsfrequenz
h	μm	Höhe (height), Leiterbahnhöhe
h_i, h_{ij}, \bar{h}	μm	Höhe (Einzelwerte, Mittelwert)
$h(x)$	μm	Eindimensionales Rauheitsprofil (Kante)
$h(x, y)$	μm	Zweidimensionales Höhenprofil (Oberfläche)
$\tilde{h}(q)$	μm^2	Fourier-Transformierte von $h(x)$
$\tilde{h}(q_x, q_y)$	μm^3	Fourier-Transformierte von $h(x, y)$
I	%	Intensität
I_0, I_A, I_E, I_S, I_T	%	Intensität (Einstrahlung, Absorption, Extinktion, Streuung, Transmission)
l, L	μm	Strecke, Messstrecke
L_k	μm	Korrelationslänge
m		Geradensteigung
\dot{m}	mg/min	Massenstrom
m_p	mg	Mittlere Masse eines Aerosolpartikels
n		Schichtanzahl
N, M		Messpunktanzahl
P	W	Leistung

$PSD^{1D}(q)$	μm^3	Eindimensionale spektrale Leistungsdichte
$PSD_i^{1D}, PSD_{avg}^{1D}$	μm^3	Eindimensionale spektrale Leistungsdichte (Einzelkurven, gemittelte Kurven)
$PSD^{2D}(q_x, q_y)$	μm^4	Zweidimensionale spektrale Leistungsdichte
$PSD_i^{2D}, PSD_{avg}^{2D}$	μm^4	Zweidimensionale spektrale Leistungsdichte (Einzelkurven, gemittelte Kurven)
q, q_x, q_y	μm^{-1}	Wellenzahl
q_k	μm^{-1}	Korrelationswellenzahl
q_f, q_c, q_s	μm^{-1}	Grenzwellenzahlen zu Wellenlängen $\lambda_f, \lambda_c, \lambda_s$
Q_A, Q_S	sccm	Volumenstrom (Aerosol-Flow, Sheath-Flow)
r	μm	Radius
$r(x)$	μm	Leiterbahnkontur
R	Ω	Widerstand
R_a, R_q	μm	Arithmetischer und quadratischer Mittelwert eines 1D-Rauheitsprofils
Re		Reynolds-Zahl
$R1 - R6$		Substrate unterschiedlicher Rauheit
S_a, S_q	μm	Arithmetischer und quadratischer Mittelwert eines 2D-Rauheitsprofils
t	s	Zeit, Prozessdauer
T	%	Transmission
v	mm/min	Druckgeschwindigkeit
v_A	m/s	Mittlere Partikelgeschwindigkeit des Aerosolstrahls
v_Q	m/s	Geschwindigkeit Fluid (Volumenstrom Q)
$V1 - V4$		DOE-Versuchsreihe mit Variationen von Düsenabstand d und Druck- geschwindigkeit v
V_A	mm^3	Volumen des Aerosolstrahls
$w, w(x)$	μm	Breite (width), Leiterbahnbreite
W_A	mN/m	Adhäsionsarbeit zwischen Festkörper und Flüssigkeit
α, β		Rauigkeitsexponenten für PSD
γ_S	mN/m	Freie Oberflächenenergie eines Festkörpers
γ_L	mN/m	Oberflächenspannung einer Flüssigkeit
γ_{SL}	mN/m	Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Flüssigkeit

γ_S^D, γ_S^P	mN/m	Disperser und polarer Anteil der freien Oberflächenenergie eines Festkörpers
γ_L^D, γ_L^P	mN/m	Disperser und polarer Anteil der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit
δ_A^{ij}		Relative Flächenzunahme zwischen Versuchsgruppen V_i und V_j
ε		Relative Schnittfläche Laser- / Aerosolstrahl
ζ	Ω/mm	Widerstand pro Längeneinheit
η	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	Dynamische Viskosität Fluid
θ	°	Kontaktwinkel
$\theta_{mik}, \theta_{mak}$	°	Mikroskopischer und makroskopischer Kontaktwinkel
λ	μm	Wellenlänge
$\lambda_f, \lambda_c, \lambda_s$	μm	Grenzwellenlängen
ρ	$\Omega\mu\text{m}^2/\text{m}$	Spezifischer Widerstand
ρ_m, ρ_r	$\Omega\mu\text{m}^2/\text{m}$	Gemessener und realer spezifischer Widerstand
ρ_A	mg/mm^3	Aerosolpartikeldichte im Aerosolstrahl
ρ_Q	mg/mm^3	Dichte Fluid (Volumenstrom Q)
ρ_S	mg/mm^3	Aerosolpartikeldichte in der gedruckten Struktur auf dem Substrat
σ, σ_{RMS}	μm	Standardabweichung
σ^2, σ_{RMS}^2	μm^2	Varianz
$\sigma_{RMS}^h, \sigma_{RMS}^q$	μm	Standardabweichung (Orts-, Frequenzraum)
Φ_N	mm^{-3}	Anzahlkonzentration

Abkürzungsverzeichnis

1D, 2D,	Ein-, zweidimensional
2.5D, 3D	Zweieinhalb-, dreidimensional
CCD	Charge Coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics (Simulation)
CNT	Carbon Nanotubes
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	Design of Experiments
EN	Europäische Norm
FFT	Fast Fourier Transform
FR	Focusing Ratio
FWHM	Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum)
ISO	International Organization for Standardization
LER	Line Edge Roughness
LWR	Line Width Roughness
Matlab	MATrix LABoratory, Software für numerische Berechnungen
OWRK	Bestimmung der freien Oberflächenenergie nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble
PM	Power Meter (Leistungsmessgerät)
PSD	Power Spectral Density (Spektrale Leistungsdichte)
px	Pixel
RGB	Grundfarben: Rot, Grün und Blau
RMS	Root Mean Square
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International
SfS	Shape-from-Shading
VI	Virtual Impactor

Bildverzeichnis

Bild 1: Klassifizierung von Direct-Write-Drucktechnologien in Anlehnung an [1, 3].....	3
Bild 2: Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren in Anlehnung an [5].....	4
Bild 3: Funktionsprinzip eines Aerosol-Jet-Drucksystems in Anlehnung an [13, 14, P3]	6
Bild 4: Einflussgrößen auf die Druckqualität für aerosolbasierte Systeme	8
Bild 5: Einflussgrößen auf den Aerosolstrahl	13
Bild 6: Faserverbundwerkstoff in Sandwichbauweise mit glasfaserverstärkten Prepregs und einem Honigwaben-Kernwerkstoff.....	21
Bild 7: Herstellungsprozess von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise in Anlehnung an [P5]	23
Bild 8: Feuchtigkeitsaufnahme (a) und Oberflächenrauheit (b) verschiedener Faserverbundwerkstoffe in Anlehnung an [P4].....	24
Bild 9: E-Modul und Biegefestigkeit von Cyanatharz-basierten Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise nach thermischer Behandlung in Anlehnung an [P4].....	25
Bild 10: Funktionalisierung von Sandwichbauteilen - (1) Applikation der Klebefilme und (2) Prepreg-Halbzeuge auf dem Kernwerkstoff, (3) Thermisch verpresstes Sandwichbauteil, (4) Funktionalisierung der Sandwichbauteile, (5) Applikation der Dekorfolie nach dem Sinterprozess, (6) Funktionalisiertes Sandwichbauteil	27
Bild 11: Funktionalisierung von Prepreg-Halbzeugen - (1) Funktionalisierung der Prepreg-Halbzeuge, (2) Applikation der Klebefilme und (3) Prepreg-Halbzeuge auf dem Kernwerkstoff, (4) Thermisch verpresstes und gesintertes Sandwichbauteil, (5) Applikation der Dekorfolie, (6) Funktionalisiertes Sandwichbauteil..	27
Bild 12: Applikation von leitfähigen Strukturen mit einer inkjetbasierten (a, c) und einer aerosolbasierten (b, d) Drucktechnologie auf Sandwichbauteilen (a, b) und Prepreg-Halbzeugen (c, d).....	28

Bild 13: REM-Aufnahmen der gedruckten Leiterbahnen mit einem inkjetbasierten (a, c) und aerosolbasierten (b, d) Druckprozess auf Sandwichbauteilen (a, b) und Prepreg-Halbzeugen (c, d) in Anlehnung an [P5].....	29
Bild 14: Funktionalisierung von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise mittels aerosolbasierter Drucktechnologie	31
Bild 15: Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 und optische Analyse für funktionalisierte Sandwichkomponenten	32
Bild 16: Sandwichbauteil mit gedruckter Heizstruktur, realisiert durch Silber- und PTC-Tinten; Realbild (links) und Wärmebild (rechts).....	33
Bild 17: Flüssigkeitstropfen auf einem Verbundwerkstoff mit idealer Oberfläche, dargestellt mit intermolekularen Kräften, den Oberflächenspannungen nach Young und dem resultierenden Kontaktwinkel	38
Bild 18: Statischer Kontaktwinkel im Gleichgewichtszustand; Ausprägung in Abhängigkeit der Benetzungsfähigkeit der Substratoberfläche.....	39
Bild 19: Mögliche Szenarien der Druckqualität in Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften abgeleitet aus der Kombination von Tinte und Substrat.....	40
Bild 20: Ablaufdiagramm zur Charakterisierung und Anpassung der Oberflächenwechselwirkung von Substrat und Tinte (links), Berechnung der Oberflächenenergie von Substraten mit der OWRK-Methode (rechts)	41
Bild 21: Gegenüberstellung des makroskopischen Kontaktwinkels θ_{mak} und des mikroskopischen Kontaktwinkels θ_{mik} realer Oberflächen	42
Bild 22: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen in Anlehnung an [104]	43
Bild 23: Schematische Darstellung der Aufteilung des gemessenen Oberflächenprofils in Primär-, Form-, Welligkeits- und Rauheitsprofil in Anlehnung an [109, 110]	44
Bild 24: Schematische Darstellung einer eindimensionalen PSD-Kurve mit der Korrelationswellenzahl q_k , der Beziehung $\text{PSD}(q) \sim q^\alpha$ mit dem negativen Rauigkeitsexponenten α und der Varianz σ_{RMS}^2 in Anlehnung an [116]	48

Bild 25: Verfälschung des realen Profils im Zuge einer taktilen Messung bedingt durch die endliche Abmessung der Tastspitze in Anlehnung an [102, 103]	50
Bild 26: Entwickelte Methodik zur Charakterisierung der Oberflächentopographie	52
Bild 27: Spektrale Leistungsdichte von 25 Einzelaufnahmen mit 50x-Objektiv	53
Bild 28: Spektrale Leistungsdichte von 625 Einzelaufnahmen mit 20x-Objektiv	53
Bild 29: Gefilterte spektrale Leistungsdichte der Einzelaufnahmen und geometrischer Mittelwert (50x-Objektiv) folgen der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit negativer Steigung $\alpha = -2.6$	54
Bild 30: Gefilterte spektrale Leistungsdichte der Einzelaufnahmen und geometrischer Mittelwert (20x-Objektiv) folgen der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit negativer Steigung $\alpha = -2.6$	55
Bild 31: Zusammenführung der gemittelten $PSD_{avg}^{2D}(20x)$ und $PSD_{avg}^{2D}(50x)$ zu einer Master-PSD PSD_{avg}^{2D} mit der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ und einer negativen Steigung $\alpha = -2.6$	56
Bild 32: Methodik zur Charakterisierung von aerosolbasierten Leiterbahnen.....	58
Bild 33: Zusammengesetzte Mikroskopaufnahme einer gedruckten Leiterbahn mit einer Auflösung von 2818 x 746 Pixel und einem Messausschnitt von 786 μm x 208 μm	59
Bild 34: Binäre Masken für die Beschichtung (a) und das Substrat (b) sowie deren exemplarische Anwendung auf die Mikroskopaufnahme (c, d)	60
Bild 35: Binäre Masken für die Leiterbahn (a) und den Overspray (b) sowie deren exemplarische Anwendung auf die Mikroskopaufnahme (c, d)	61
Bild 36: Höhenprofil von Leiterbahn und Substrat (a); Extraktion der Leiterbahn durch binäre Maske (b); Nivellierungsebene unter der Prämisse uniformer Fußlinien der Leiterbahn (c); Isoliertes und nivelliertes Leiterbahnhöhenprofil (d).....	62
Bild 37: Schlibbildaufnahme einer gedruckten Leiterbahn auf einem Verbundwerkstoff in Sandwichbauweise	63

Bild 38: Gegenüberstellung von gemessener Leiterbahnquerschnittsfläche A_m und realer Leiterbahnquerschnittsfläche A_r	64
Bild 39: Einfluss der Schichtanzahl n auf die Höhe h und Breite w (a), dargestellt in Grauwerten (Variation eins bis zehn von hell nach dunkel) sowie die Querschnittsfläche A (b)	65
Bild 40: Spektrale Leistungsdichte $PSD(q)$ einer rauhen Oberfläche mit der Korrelationswellenzahl q_k (a) sowie deren Veränderung über verschiedene Stadien des Glättungsprozesses hinweg (b-d) in Anlehnung an [129]	67
Bild 41: Leiterbahnbreite $w(x)$ und Profil einer Leiterbahnkontur $r(x)$ in Anlehnung an [64]	68
Bild 42: Exemplarische Darstellung einer Leiterbahnkontur.....	68
Bild 43: Beispiel einer Leiterbahnkontur ohne (a) bzw. mit (b) Trendbereinigung sowie ein Histogramm der relativen Positionsabweichungen auf Basis mehrerer Randkonturen (c).....	69
Bild 44: Spektrale Leistungsdichte der einzelnen Randkonturen sowie der geometrische Mittelwert mit 50x-Objektiv, die Korrelationswellenzahl q_k und der negative Rauigkeits-exponent $\alpha = -2$ mit der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$	70
Bild 45: Spektrale Leistungsdichte $PSD(q)$ einer Randkontur mit der Korrelationswellenzahl q_k (a) sowie deren Veränderung über verschiedene Stadien des Glättungsprozesses hinweg (b-d)	71
Bild 46: Exemplarische Darstellung des Oversprays (a) und vergrößerte Darstellung mit den verwendeten Grenzwerten von zehn, fünf und ein Prozent (b)	73
Bild 47: Schematische Darstellung der Leiterbahnbreite und des Oversprays für einen Anstieg der Schichtanzahl (a) sowie die Auswirkungen auf die Intensität des Oversprays (b)	74
Bild 48: Exemplarische Kontaktwinkelmessung der drei verschiedenen Testflüssigkeiten auf den verwendeten Faserverbundwerkstoffen: (a) Wasser 80.3° , (b) Glycerol 58.7° und (c) Formamid 48.6°	80
Bild 49: Graphische Darstellung der OWRK-Methode für die Berechnung der polaren und dispersen Anteile γ_S^P und γ_S^D der verwendeten Faserverbundwerkstoffe	81

Bild 50: Zusammengesetzte Aufnahme aus einzelnen Laserscanmikroskopbildern für die Substrate R ₁ , R ₂ , R ₃ und R ₅ ; die Anpresskraft für R ₂ ist niedriger als für die übrigen Substrate; R ₃ und R ₅ mit zusätzlicher Aufprägung mit Sandpapier unterschiedlicher Körnung.....	82
Bild 51: Arithmetischer Mittenrauwert R _a einer taktilen Messung für die Substrate R ₁ – R ₆ ; R ₂ mit niedrigerer Anpresskraft und R ₃ – R ₆ mit zusätzlicher Aufprägung mit Sandpapier (Körnung: 25.8 – 82 μm) ...	83
Bild 52: Gegenüberstellung des taktilen Mittenrauwerths R _a zum optischen Mittenrauwert S _a (a) sowie des arithmetischen Mittenrauwerths S _a zum quadratischen Mittenrauwert σ _{RMS} der optischen Messung (b)	84
Bild 53: Spektrale Leistungsdichte für die Substrate R ₁ bis R ₆ mit der Beziehung PSD(q) ~ q ^α und negativer Steigung α = -2.6.....	85
Bild 54: Oberflächenrauheit σ _{RMS} in Abhängigkeit der Wellenzahl q, berechnet aus der spektralen Leistungsdichte für das Intervall [q _{min} = 0.006 μm ⁻¹ , q] (a) und für das Intervall [q, q _{max} = 15 μm ⁻¹] (b) für die Substrate R ₁ bis R ₆	86
Bild 55: Leiterbahnquerschnitt in Abhängigkeit der Schichtanzahl (symbolisiert durch Grauwerte; Variation eins bis zehn von hell nach dunkel) für Substratmaterial R ₁ , Düsenabstand 2 mm und Druckgeschwindigkeiten von (a) 1000 mm/min sowie (b) 2000 mm/min	88
Bild 56: Querschnittsfläche, -breite und -höhe für die Substrate R ₁ und R ₂ sowie deren Mittelwert R _{avg} in Abhängigkeit der Anzahl an Schichten (Düsenabstand 2 mm, Druckgeschwindigkeit 1000 mm/min)	89
Bild 57: Querschnittsfläche, -breite und -höhe für die Substrate R ₃ bis R ₆ in Abhängigkeit der Anzahl an Schichten (Düsenabstand 2 mm, Druckgeschwindigkeit 1000 mm/min)	90
Bild 58: Gemessene Leiterbahnquerschnittsfläche und -breite nach zehn Schichten in Abhängigkeit der Substratrauheit (Düsenabstand 2 mm, Druckgeschwindigkeit 1000 mm/min)	92
Bild 59: Querschnittsfläche, -breite und -höhe für die Substrate R ₁ und R ₂ in Abhängigkeit der Schichtanzahl n, der Variation des Düsenabstands d und der Druckgeschwindigkeit v	93

Bild 60: Relative Flächenzunahme δ_A in Abhängigkeit des Düsenabstands d (a) und in Abhängigkeit der Zeit t (b; dimensionslos, abgeleitet aus der Prozessdauer).....	94
Bild 61: Querschnittsfläche und -höhe für die Substrate R_1 und R_2 in Abhängigkeit der Anzahl an Schichten n , der Variation des Düsenabstands d und der Druckgeschwindigkeit v nach Bereinigung der zeitabhängigen Drift des Aerosolmassenstroms	95
Bild 62: Gemessene Querschnittsfläche der Leiterbahnen nach zehn Schichten in Abhängigkeit von der Substratrauhheit für alle vier Versuchsreihen (V_1 bis V_4) des DOE.....	97
Bild 63: Spektrale Leistungsdichte ohne Abscheidung und nach 1 - 10 Schichten, geometrisch gemittelt über die Substrate R_1 und R_2 und die Versuchsreihen V_1 bis V_4 sowie die Beziehungen $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit $\alpha = -2.6$ und $PSD(q) \sim q^\beta$ mit $\beta = -1.0$	98
Bild 64: Spektrale Leistungsdichte für die Substrate R_1 bis R_6 ohne Abscheidung und nach einer Abscheidung von 4 - 10 Schichten, jeweils gemittelt für die Versuchsreihen V_1 bis V_4 sowie die Beziehungen $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit $\alpha = -2.6$ und $PSD(q) \sim q^\beta$ mit $\beta = -1.0$	99
Bild 65: Relative Häufigkeitsverteilung der Line Edge Roughness für die Substrate R_1 (a) und R_6 (b) für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min.....	101
Bild 66: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für die Substrate $R_1 - R_6$ für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min sowie die Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit negativer Steigung $\alpha = -2$	102
Bild 67: Relative Häufigkeitsverteilung der Line Edge Roughness für das Substrat R_1 bei den verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe $V_1 - V_4$	103
Bild 68: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für das Substrat R_1 bei den verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe $V_1 - V_4$	104
Bild 69: Relative Häufigkeitsverteilung der Line Edge Roughness für die Substrate $R_1 - R_6$ bei unterschiedlicher Anzahl an abgeschiedenen Schichten n für die Versuchsreihe V_1 mit $d = 2$ mm, $v = 1000$ mm/min (links) und V_3 mit $d = 4$ mm, $v = 1000$ mm/min (rechts).....	106

Bild 70: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für einen Düsenabstand von 4 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_3) bei unterschiedlicher Anzahl an abgeschiedenen Schichten n	107
Bild 71: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1) bei unterschiedlicher Anzahl an abgeschiedenen Schichten n	107
Bild 72: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für die verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe $V_1 - V_4$ bei einer niedrigen Anzahl an abgeschiedenen Schichten $n = 1-3$	109
Bild 73: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für die verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe $V_1 - V_4$ bei einer hohen Anzahl an abgeschiedenen Schichten $n = 7-9$	109
Bild 74: Overspray (Abstand zur Leiterbahnkontur bei einer Intensität von fünf Prozent) in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit (a) und vom Düsenabstand (b)	112
Bild 75: Entwicklung des Oversprays mit steigender Schichtanzahl (Variation eins bis zehn von hell nach dunkel), dargestellt für die verschiedenen Versuchsreihen des DOE ($V_1 - V_4$).....	113
Bild 76: Abhängigkeit des Oversprays (Abstand zur Leiterbahnkontur bei einer Intensität von fünf Prozent) vom Düsenabstand (a: 2 mm, b: 4 mm) und von der Druckgeschwindigkeit bei variierender Anzahl an abgeschiedenen Schichten n	114
Bild 77: Overspray (Abstand zur Leiterbahnkontur bei einer Intensität von fünf Prozent, eingezeichnet bis 100 μm) in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit v , dem Düsenabstand d und der Anzahl an abgeschiedenen Schichten n	115
Bild 78: Widerstand pro Längeneinheit ζ der DOE-Versuchsreihen $V_1 - V_4$ in Abhängigkeit von der Anzahl an Schichten n und der Substratrauheit exemplarisch für R_1 , R_5 und R_6	116
Bild 79: Widerstand pro Längeneinheit ζ in Abhängigkeit von der Schichtanzahl n und der Substratrauheit R_1 , R_5 und R_6 für verschiedene Druckgeschwindigkeiten v	117

Bild 80: Gemessene Querschnittsfläche der Leiterbahnen nach zehn Schichten in Abhängigkeit von der Substratrauheit für alle Versuchsreihen ohne Korrektur der zeitlichen Drift.....	118
Bild 81: Spezifische Widerstände ρ_r und ρ_m in Abhängigkeit der jeweiligen Querschnittsflächen A_r (a, b) und A_m (c, d) für die Substrate R1, R5 und R6 und die Druckgeschwindigkeiten (a, c) $v = 1000$ mm/min, (b, d) $v = 2000$ mm/min.....	119
Bild 82: Relative Änderung des spezifischen Widerstands ρ_r bezogen auf $\rho_r(\sigma_{RMS} \approx 0, h \geq 15)$ in Abhängigkeit der Substratrauheit σ_{RMS} und der Leiterbahnhöhe h	120
Bild 83: Massenstrom \dot{m}_1 und \dot{m}_2 von zwei Versuchsreihen als Funktion der Zeit mit einer zeitabhängigen Massenstromdrift und einem Einbruch des Massenstroms zu unterschiedlichen Zeitpunkten ..	124
Bild 84: Funktionsweise des Laser-Transmissions-Messsystems zur Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien	126
Bild 85: (a) Intensitätsänderung des Laserstrahls beim Durchdringen des Aerosolstrahls mit dem Extinktionsquerschnitt C_E , der Anzahlkonzentration ϕ_N und der Strecke l sowie (b) deren schematische Darstellung und die projizierten Schnittflächen in (c) xz-Ebene und (d) xy-Ebene.....	128
Bild 86: Integrationsvarianten des Laser-Transmissions-Messsystems: (a) Montage unterhalb der Düse, (b) Montage oberhalb der Düse, (c) Montage stationär in der Druckanlage	131
Bild 87: Versuchsaufbau des Laser-Transmissions-Messsystems mit einer Vergrößerung des Wechselwirkungsbereichs von Laser- und Aerosolstrahl zur besseren Visualisierung.....	132
Bild 88: Beispiel einer Transmissionsmessung des Lasers (a) ohne und (b) mit Interaktion mit dem Aerosolstrahl.....	134
Bild 89: Beispiel einer Transmissionsmessung unter Verwendung eines Shutters zur sequenziellen Unterbrechung des Aerosolstrahls	134
Bild 90: Beispiel für eine (a) Leistungsmessung P mit Shutter-Sequenz (b) sowie das dazugehörige differenzierte Signal \dot{P}	136
Bild 91: Beispiel für die Analyse einer Shutter-Sequenz: (a) Signalaufbereitung der differenzierten Leistung $ \dot{P} $, (b) binäre Differenzierung und Phasen I-IV des Shutter-Prozesses sowie (c) deren Anwendung auf das gemessene Leistungssignal P	137

Bild 92: Beispiele für den Intensitätsverlauf und die Leistungsmessung P in Transmission mit einer Shutter-Sequenz für einen Aerosolstrahl mit Massenstrom $\dot{m} = 4.9 \text{ mg/min}$ (a) und $\dot{m} = 12.2 \text{ mg/min}$ (c) sowie die differenzierten Signale (b) und (d).....	139
Bild 93: Beispiel einer Transmissionsmessung mit Shutter-Sequenz für einen Prozesseinbruch im Aerosolstrahl in zeitlicher Entwicklung im Verlauf von (a) – (c)	140
Bild 94: Transmissionsänderung ΔT in Abhängigkeit vom Massenstrom \dot{m} für unterschiedliche Volumenströme von Atomizer, VI-Exhaust und VI-Sheath	142
Bild 95: Transmissionssignal T mit Shutter-Sequenz für einen konstanten Massenstrom und variierenden Sheath-Flow (a) 300 sccm, (b) 450 sccm, (c) 600 sccm	142
Bild 96: Korrelation des Massenstroms \dot{m} und der Transmissionsänderung ΔT mit den Volumenströmen Atomizer (a), VI-Exhaust (b) und VI-Sheath (c)	143
Bild 97: Gemessene Transmissionssignale und gemittelter Kurvenverlauf für den Strahldurchtritt von Aerosolstrahl zu Laserstrahl (a) sowie die geometrische Anordnung von Laser- und Aerosolstrahl mit den Strahldurchmessern d_L und d_A (b)	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung aerosol- und inkjetbasierter Drucktechnologien in Anlehnung an [76].....	30
Tabelle 2: Statistische Versuchsplanung mit den Einflussgrößen Düsenabstand d und Druckgeschwindigkeit v	77
Tabelle 3: Oberflächenspannung γ_L sowie die dispersen und polaren Anteile γ_L^D und γ_L^P für die drei verwendeten Testflüssigkeiten Wasser, Glycerol und Formamid [137]	79
Tabelle 4: OWRK-Methode für die drei verwendeten Testflüssigkeiten Wasser, Glycerol und Formamid mit den berechneten x - und y -Werten	80
Tabelle 5: Variation der Korngröße, der Aufprägung und der relativen Anpresskraft sowie die resultierende Rauheit (taktil R_a , optisch S_a 20x-/50x-Objektiv) für die Substrate R1 - R6.....	82
Tabelle 6: Einfluss der Prozessparameter auf die Leiterbahneigenschaften.....	121

1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Dies ist unter anderem in einem breiten Technologiespektrum begründet, welches einen vielseitigen und branchenübergreifenden Einsatz ermöglicht. Die stetige Erweiterung des Technologieportfolios erschwert allerdings auch die Wahl des für den jeweiligen Einsatzfall am besten geeigneten Verfahrens und erfordert eine universelle Methodik zur Charakterisierung der Systeme. Hierzu wird ein Konzept vorgestellt, das additive Fertigungsverfahren anhand von drei Ebenen klassifiziert: dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials, der Erscheinungsform des Halbzeuges und der Art der Schichtbildung.

Darüber hinaus sollte auf Technologieebene zur Präzisierung der Zielstellung zwischen funktionalen und strukturellen Drucktechnologien unterschieden werden. Strukturelle Drucktechnologien beschreiben dabei die klassischen additiven Fertigungsverfahren, die auf die Erzeugung von Objekten ausgelegt sind. Demgegenüber zielen funktionale Drucktechnologien auf die Applikation von funktionalen Strukturen auf bestehenden Substraten ab. Diese Differenzierung ist gerade im Kontext von 3D-MIDs (*Mechatronic Integrated Devices*) sinnvoll, da sich deren Herstellung stark in Richtung kombinierter Einsatzmöglichkeiten von funktionalen und strukturellen Drucktechnologien entwickelt, um zukünftig dreidimensionale mechatronische Produkte in einem einzigen Prozessschritt herstellen zu können.

In der vorliegenden Arbeit wird eine aerosolbasierte, funktionale Drucktechnologie zur Applikation von leitfähigen Strukturen eingesetzt. In Kapitel 2 wird das Funktionsprinzip der zentralen Komponenten für die Aerosolerzeugung, Aerosolaufbereitung und Aerosolfokussierung erläutert. Der Schwerpunkt liegt dabei in einer individuellen Betrachtung der Einflussgrößen auf die Druckqualität und den Aerosolstrahl. Komplettiert wird das Kapitel durch die Ableitung des technologischen Handlungsbedarfs.

In Kapitel 3 wird als zukunftsorientiertes Anwendungsszenario die partielle Substitution des Bordnetzes in der Luftfahrt im Bereich der Flugzeugkabine gewählt. Als Substratmaterial werden dabei Verkleidungselemente in Sandwichbauweise identifiziert und deren Herstellungsprozess um den Prozessschritt der Funktionalisierung erweitert. In den Untersuchungen wird neben dem Einsatz aerosolbasierter Drucktechnologien mit nano-

skaligen Tinten auch die Eignung von inkjetbasierten Druckverfahren mit mikroskaligen Tinten evaluiert.

Die zwei übergeordneten, wissenschaftlichen Forschungsschwerpunkte, die sich aus dem technologischen Handlungsbedarf und der anwendungsorientierten Themenstellung ergeben, fokussieren sich auf die Analyse gedruckter Leiterbahnen auf technischen Oberflächen und die in situ Prozessüberwachung aerosolbasierter Drucktechnologien durch eine Echtzeit-Charakterisierung des Aerosolstrahls.

Die Analyse gedruckter Strukturen erfolgt in der Regel auf Basis von Mikroskopbildern oder anhand von Höhenprofilen, die mit einem Mikroskop beziehungsweise einem Laserscanmikroskop aufgenommen werden. Ein kombinierter Ansatz, mit dem nicht nur die Auswertung einzelner Schnittebenen, sondern ganzer Bereiche der Leiterbahn ermöglicht wird, liegt aktuell nicht vor und wird in Kapitel 4 vorgestellt. In Kapitel 5 wird der Einfluss der Anzahl an Leiterbahnschichten, der Druckgeschwindigkeit, des Düsenabstands und der Substratraugigkeit auf die Druckqualität untersucht. Dabei erfolgt die Evaluierung der Druckqualität anhand einer simultanen Analyse des Leiterbahnquerschnitts, der Leiterbahnkontur, des Oversprays und des spezifischen Widerstands unter Berücksichtigung wechselseitiger Beziehungen.

Eine allgemeine Herausforderung aerosolbasierter Drucktechnologien stellt deren geringe Prozessstabilität dar. Hierunter zählen sowohl Prozessschwankungen als auch Prozesseinbrüche im Massenstrom. Kompensationsstrategien basieren auf empirischen Untersuchungen und manuellen Korrekturen. Aufgrund der hohen Anzahl an Prozessparametern die sich auf die Erzeugung des Aerosolstrahls auswirken und der damit verbundenen geringen Reproduzierbarkeit des Druckprozesses ist dieses Vorgehen allerdings nur bedingt erfolgsversprechend und für hohe Qualitätsanforderungen nicht geeignet. Für diese Problemstellung wird in Kapitel 6 ein neuer Lösungsansatz gegeben. Das entwickelte Laser-Transmissions-Messsystem ermöglicht die Echtzeitanalyse des Aerosolstrahls durch das Monitoring des Massenstroms. Hiermit kann die Prozessstabilität des aerosolbasierten Drucksystems in situ bestimmt und zukünftig über entsprechende Regelkreise verbessert werden.

Kapitel 7 rundet die vorliegende Arbeit mit einer Zusammenfassung ab und gibt einen kurzen Ausblick auf zukünftige potenzielle Forschungsthemen.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik für aerosolbasierte Drucktechnologien betrachtet. In Kapitel 2.1 wird hierzu eine Einordnung in den Kontext der additiven Fertigungsverfahren vorgenommen und in Kapitel 2.2 das Funktionsprinzip am Beispiel eines Aerosol-Jet-Drucksystems beschrieben. Anschließend werden die Einflussgrößen auf den Druckprozess in Kapitel 2.3 erörtert und deren Wirkung differenziert auf die Druckqualität und den Aerosolstrahl betrachtet. Abschließend folgt in Kapitel 2.4 die Ableitung des technologischen Handlungsbedarfs, der in den Kapiteln 3 - 6 aufgegriffen wird.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die theoretischen Grundlagen der Oberflächenwechselwirkung und Oberflächentopographie in Kapitel 4 und die des Laser-Transmissions-Messsystems zu Beginn des Kapitels 6 behandelt werden.

2.1 Aerosolbasierte Drucktechnologien

Aerosolbasierte Drucktechnologien sind additive Fertigungsverfahren, die klassisch den Direct-Write-Drucktechnologien zugeordnet werden können. Dabei bezeichnet Direct-Write eine Gruppe an Verfahren, die funktionale und/oder strukturelle Materialien in einem digitalen Fertigungsprozess auf Substraten aufbringen. [1, 2]

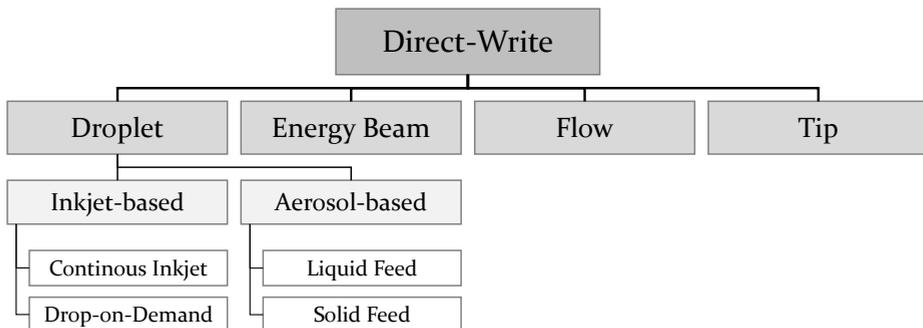


Bild 1: Klassifizierung von Direct-Write-Drucktechnologien in Anlehnung an [1, 3]

In Abhängigkeit des zu Grunde liegenden Materialtransports können Direct-Write-Drucktechnologien in vier Kategorien unterteilt werden. Der Materialtransport kann dabei in Form von Tröpfchen (*Droplet*), mit einem Laser- bzw. Ionenstrahl (*Energy Beam*), als Materialfluss (*Flow*), oder mit einer Spitze (*Tip*) realisiert werden. [1, 2]

Zudem ist eine weitere Unterteilung dieser Kategorien möglich. Aerosolbasierte Drucktechnologien werden dabei zusammen mit inkjetbasierten Drucktechnologien den tröpfchenbasierten digitalen Drucktechnologien zugeordnet. Wie Bild 1 zeigt, kann dieser Gliederungsprozess fortgesetzt werden. Inkjetbasierte Technologien können so in die Continuous Inkjet und Drop-on-Demand-Verfahren unterteilt werden. Für aerosolbasierte Drucktechnologien ist nach Hoey et al. eine Differenzierung nach dem Aggregatzustand der Aerosolpartikel möglich, d.h. eine Aufteilung in Aerosole mit Flüssigkeitspartikeln (*Liquid Feed*) und Aerosole mit Feststoffpartikeln (*Solid Feed*). [1, 3]

Die Kriterien für die Unterteilung der Kategorien sind allerdings uneinheitlich und richten sich nach dem aktuellen Technologieangebot. Damit stößt eine Klassifizierung der digitalen Drucktechnologien nach diesem Schema an seine Grenzen.

Klassifizierung im Kontext additiver Fertigungsverfahren

Ein neuer Ansatz zur Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren orientiert sich an der Normung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580. Analog der Gliederungsebenen des Urformens wird auf erster Ebene nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials, auf zweiter nach der Erscheinungsform im Sinne des Halbzeuges und auf dritter Ebene nach der Art der Schichtbildung differenziert. [4, 5] Diese Klassifizierung wird aufgegriffen und erweitert und ist in Bild 2 dargestellt.

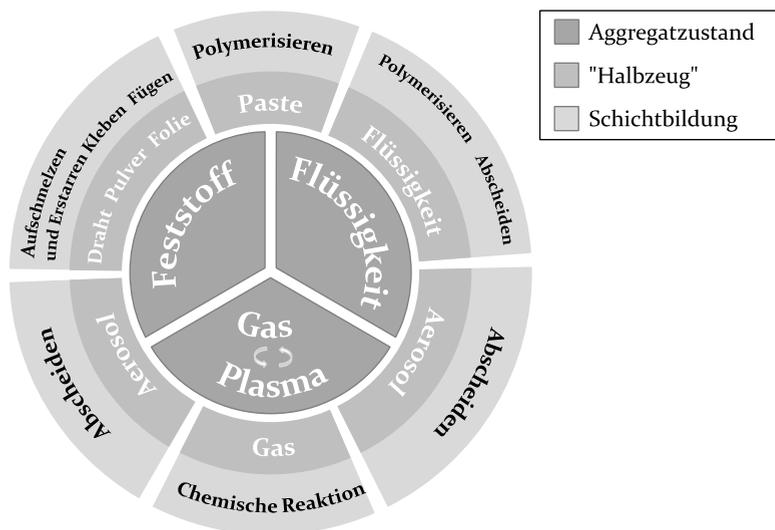


Bild 2: Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren in Anlehnung an [5]

Im Kontext additiver Fertigungsverfahren ist zudem zu empfehlen, die Zielstellung der verwendeten Drucktechnologie zu nennen. Dabei sollte zwischen einer Verwendung von funktionalen oder strukturellen Materialien unterschieden werden. **Strukturelle Drucktechnologien** zielen in erster Linie auf die Erzeugung eines dreidimensionalen Objekts ab, während **funktionale Drucktechnologien** sinngleich eine Funktionsintegration auf einem bestehenden Grundkörper bewirken. [P1]

Eine strikte Zuordnung zu einer der beiden Gruppen ist allerdings nicht immer eindeutig, da je nach Anwendung ein fließender Übergang zwischen strukturellen und funktionalen Drucktechnologien vorliegen kann. Der Aufbau künstlicher Muskeln bedient sich z.B. einer funktionalen Drucktechnologie, die gleichzeitig die Struktur, d.h. den Muskel selbst, aufbaut. [6, P2] Dennoch ist eine Unterscheidung nach dem Primärziel sinnvoll und gewinnt gerade im Bereich der 3D-MIDs (*Mechatronic Integrated Devices*) [7] stetig an Bedeutung. Der Aufbau mechatronischer Produkte kann so zukünftig durch eine Kombination aus strukturellen und funktionalen Drucktechnologien erfolgen. [P1]

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Aerosol-Jet-Drucksystem der Firma Optomec Inc. als funktionale Drucktechnologie zur Applikation leitfähiger Strukturen eingesetzt. Hierbei setzt sich das Aerosol aus Stickstoff als Trägergas und Flüssigkeitspartikeln aus einer Silbernanopartikelntinte zusammen, die während des Druckprozesses auf dem Substrat abgeschieden wird.

2.2 Funktionsprinzip von Aerosol-Jet-Drucksystemen

In Bild 3 ist das Funktionsprinzip einer aerosolbasierten Drucktechnologie schematisch am Beispiel eines Aerosol-Jet-Drucksystems dargestellt. Dieses System kann anhand der drei zentralen Komponenten Atomizer, Virtual Impactor und Druckdüse in die Prozessschritte Aerosolerzeugung, Aerosolaufbereitung und Aerosolfokussierung unterteilt werden.

Im **Atomizer** erfolgt die Erzeugung von Flüssigkeitströpfchen aus einer Tinte heraus. Dies kann entweder via Ultraschall oder, wie in dieser Arbeit, pneumatisch realisiert werden. Im Falle eines pneumatischen Atomizers wird die Tinte in Folge des Bernoulli-Effekts, induziert durch den Atomizer-Flow, vom Tinten-Reservoir zur Atomizer-Düse transportiert. [8] Hierbei wirken Scherkräfte durch den Volumenstrom auf die Tinte, die diese pneumatisch in ein polydisperses Aerosol zerstäuben. Große Partikel mit hoher Trägheit scheiden sich dabei im Atomizer ab und werden wieder

dem Tintenvorrat zugeführt. Kleine Partikel mit niedriger Trägheit verbleiben als Aerosol und strömen in Richtung Virtual Impactor. [9, P3]

Der **Virtual Impactor** wird bei Verwendung eines pneumatischen Atomizers eingesetzt und dient der Trennung der Partikel in Abhängigkeit ihrer Massenträgheit. [3, 9] Im Virtual Impactor (VI) wird der zuvor im Atomizer erzeugte Aerosolvolumenstrom durch eine konvergierende Düse beschleunigt und auf den gegenüberliegenden Collector fokussiert. Der am Collector radial anliegende VI-Exhaust-Flow erzeugt einen Unterdruck, der den Volumenstrom reduziert. Sehr kleine Partikel ($< 1 \mu\text{m}$) mit einer sehr niedrigen Trägheit, die im Druckprozess hauptsächlich den Overspray verursachen, werden dabei im Major-Flow abgeführt. [3] Größere Partikel mit höherer Trägheit werden im Minor-Flow der Druckdüse zugeführt. [8–12] Bei Aerosol-Jet-Drucksystemen wird der Major-Flow als VI-Exhaust-Flow und der Minor-Flow als Aerosol-Flow bezeichnet. Je nach Bauform des Drucksystems wird ein VI-Sheath-Flow für die Fokussierung des Aerosols im Virtual Impactor benötigt.

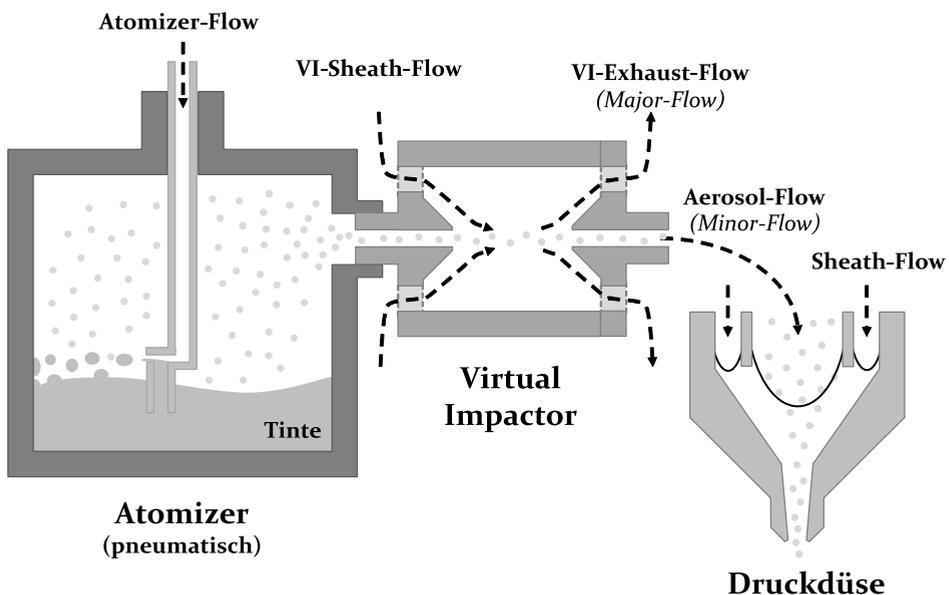


Bild 3: Funktionsprinzip eines Aerosol-Jet-Drucksystems in Anlehnung an [13, 14, P3]

In der konvergierenden **Druckdüse** wird der Aerosol-Flow, der Partikel mit einem Durchmesser von $1 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ führt [3, 15], radial vom Sheath-Flow umhüllt, beschleunigt und auf die Substratoberfläche fokussiert.

Für den Aerosol-Flow kann optional ein sog. **Bubbler** eingesetzt werden, der die Verflüchtigung von Lösemitteln in der Tinte kompensiert. [16]

Zusätzlich kann ein Bubbler auch vorgelagert zum Sheath-Flow integriert werden, um Verflüchtigungen von Lösemitteln beim Zusammentreffen von Aerosol-Flow und Sheath-Flow zu vermeiden. [15]

Aerosolbasierte Drucktechnologien weisen eine Vielzahl von Vorteilen auf. Insbesondere ist es möglich über einen großen Düsenabstand von 1 mm – 5 mm zu drucken, wodurch auch komplexe und gekrümmte Oberflächen funktionalisiert werden können. [9, 17] Der Viskositätsbereich der Tinten reicht von 1 cP bis 1000 cP und ermöglicht den Druck eines breiten Spektrums an Materialien, die neben Tinten mit Silbernanopartikeln – die in dieser Arbeit verwendet werden – auch Polymere [18, 19], biologische Materialien [20, 21], CNT (*carbon nanotubes*) [22] und andere halbleitende Materialien [23] beinhaltet. Dabei können je nach Anwendung Strukturbreiten von mehreren 100 µm [24] bis hin zu 10 µm [25–27] hergestellt werden.

2.3 Charakterisierung aerosolbasierter Drucktechnologien

Aerosolbasierte Drucktechnologien stellen einen technologisch komplexen Prozess dar, der von einer Vielzahl an Einflussgrößen abhängig ist. Eine Optimierung der Druckqualität gestaltet sich deshalb als diffizil. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Einflussfaktoren sowie deren Wirkungsweise auf die Druckqualität ist unabdingbar.

Für eine strukturierte Darstellung der Einflussgrößen wird zunächst in Kapitel 2.3.1 ein genereller Überblick über die Einflussfaktoren auf die Druckqualität gegeben und in Kapitel 2.3.2 der Aerosolstrahl selbst und die physikalischen Grundlagen für seine Beschreibung erörtert.

2.3.1 Einflussgrößen auf die Druckqualität

In Bild 4 sind die entscheidenden Einflussfaktoren auf die Druckqualität dargestellt. Die Einteilung erfolgt anhand der drei Prozessschritte Vorbehandlung, Druckprozess und Nachbehandlung sowie der Parameter Substrat und Umwelt. Nachfolgend ist der Stand der Technik für Aerosolbasierte Drucktechnologien in Bezug auf die Druckqualität und aufgeschlüsselt nach den Einflussgrößen ausführlich beschrieben.

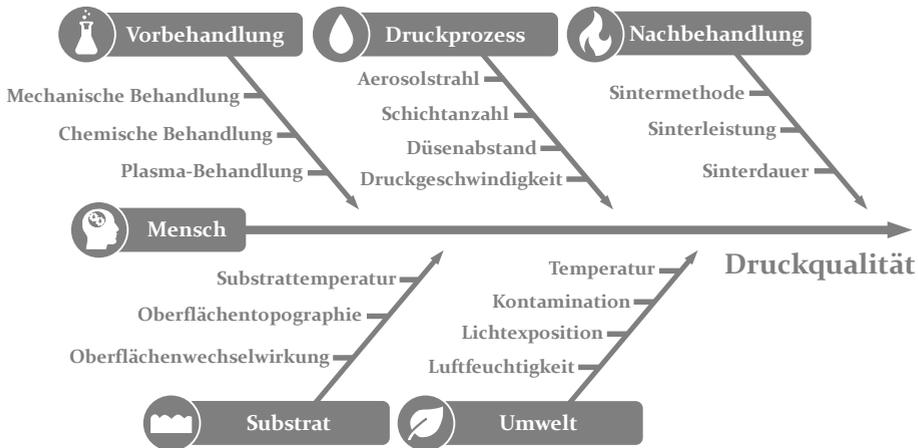


Bild 4: Einflussgrößen auf die Druckqualität für aerosolbasierte Systeme

Druckqualität

Die Druckqualität wird anhand einer Reihe an Kenngrößen definiert. Diese beinhalten die Linienbreite und -höhe, die Querschnittsfläche und deren Homogenität, die Linienkontur und Kantenrauigkeit sowie den Overspray bezüglich Intensität und Ausdehnung. Zudem sind die Qualitätskriterien des Widerstands bzw. spezifischen Widerstands, der Haftfestigkeit und der Langzeitstabilität gegen Umwelteinflüsse wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit entscheidend. [16, 28]

Vorbehandlung

Im Vorfeld zur Funktionalisierung kann zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften eine Vorbehandlung der verwendeten Substrate durchgeführt werden. Hierbei wird die Oberflächentopographie durch eine mechanische Behandlung und die Oberflächenwechselwirkung durch eine chemische Behandlung oder Plasma-Behandlung optimiert.

Eine **Mechanische Behandlung** dient in erster Linie der Anpassung der Substratrauigkeit. Reichenberger et al. und Hörber et al. legen dar, dass eine Oberflächenbehandlung zur Reduzierung der Substratrauigkeit zu einer besseren Druckqualität und einer höheren elektrischen Leitfähigkeit führt. [29, 30]

Die **Chemische Behandlung** und die **Plasma-Behandlung** zielen auf eine Änderung der freien Oberflächenenergie ab, um die Leiterbahnkontur

und Haftfestigkeit zu verbessern. Neermann et al. erreichten eine Erhöhung der Oberflächenenergie für Glas, Polyimid (PI) und Polyethylenterephthalat (PET) sowohl mit einer Isopropanol- als auch mit einer Plasma-Behandlung. Dadurch verbesserte sich die Benetzbarkeit der Substrate und die Haftfestigkeit der Leiterbahnen, der Kontaktwinkel nahm ab und die Leiterbahnbreite zu. [31]

Druckprozess

Der Druckprozess ist von einer Reihe an Prozessparametern abhängig, vor allem vom **Aerosolstrahl** selbst, der aufgrund seiner Komplexität in zahlreiche Einflussfaktoren weiter aufgegliedert werden kann. Der Massenstrom, Aerosolstrahldurchmesser sowie die Partikelgeschwindigkeit und Partikelgrößenverteilung beeinflussen dabei maßgeblich die Druckqualität und werden in Kapitel 2.3.2 näher betrachtet.

Die **Schichtanzahl** steht im direkten Zusammenhang mit dem gedruckten Querschnitt. Mit ansteigender Schichtanzahl nehmen die Linienhöhe [27], die Linienbreite und die Querschnittsfläche linear zu. [11, P3]

Der **Düsenabstand**, d.h. der Abstand zwischen Druckdüse und Substratoberfläche, wirkt sich auf die Linienbreite aus. Eine Zunahme des Düsenabstands resultiert in einem linearen Anstieg der Linienbreite. Für Abstände größer 5 mm nimmt allerdings die Druckqualität der Linienkontur ab und der Overspray stark zu. [32]

Die **Druckgeschwindigkeit** ist indirekt proportional zur Querschnittsfläche. Für eine sinkende Druckgeschwindigkeit steigt die Linienhöhe und Linienbreite. [33, 34] Im Vergleich zum Düsenabstand ist die Ursache für den Anstieg der Linienbreite allerdings nicht die Aufweitung des Aerosolstrahls, sondern eine Anhäufung an Tinte auf der Substratoberfläche, die ebenfalls durch eine Zunahme im Massenstrom oder durch eine Erhöhung der Schichtanzahl erreicht werden kann. Diese Materialansammlung führt zu einem bisher kaum untersuchten Fließverhalten der Tinte an der Substratoberfläche. [11, 33]

Die genannten Parameter, die einen Einfluss auf die Leiterbahngeometrie aufweisen, wirken sich ebenfalls auf die elektrischen Eigenschaften aus. So nimmt der Widerstand pro Längeneinheit aufgrund seiner indirekten Proportionalität zur Querschnittsfläche mit dem Massenstrom, der Druckgeschwindigkeit und der Schichtanzahl ab. [33, P3] Für kleine Linienhöhen ist der spezifische Widerstand höher und erreicht bei größeren Linienhöhen ($> 20 \mu\text{m}$) einen nahezu konstanten Wert. [P3]

Nachbehandlung

Im Anschluss an den Druckprozess ist je nach Anwendung eine Nachbehandlung erforderlich. Für metallische Tinten, wie der vorliegenden Silbernanopartikelntinte, ist ein Sinterprozess obligatorisch, um die elektrische Leitfähigkeit der gedruckten Strukturen herzustellen. Zu Beginn des Sinterprozesses verflüchtigen sich dabei die der Tinte beigefügten Lösemittel sowie die organische Beschichtung der Silbernanopartikel, die zur Vermeidung einer Agglomeration der Tinte eingesetzt werden. [35] Nachfolgend bilden sich Sinterhalse gefolgt von Korngrenzen aus. Neben der Einstellung einer elektrischen Leitfähigkeit wird zudem die Haftfestigkeit auf dem Substrat erhöht. [36, 37] Die Schmelztemperatur der Silberpartikel liegt aufgrund ihrer Größe im Nanobereich ($< 100 \text{ nm}$) [38] deutlich unterhalb der Temperatur des Festkörpers. [39, 40] Die Einbringung der Sinterenergie kann anhand verschiedener **Sintermethoden** erfolgen. [41]

Die **Ofensinterung** zeichnet sich durch ihre einfache Handhabung und hohe Reproduzierbarkeit aus. Der spezifische Widerstand der gedruckten Struktur hängt bei dieser konventionellen Methode stark von der Sintertemperatur und der Sinterdauer ab. Für Silbernanopartikelntinten liegen diese in einem Bereich von $100 \text{ }^\circ\text{C}$ - $350 \text{ }^\circ\text{C}$ und erstrecken sich über eine Zeitspanne von zehn bis 120 Minuten. Der spezifische Widerstand sinkt mit Zunahme der Sintertemperatur und Sinterdauer. [34, 41–43] Nachteil dieser Methode ist die hohe thermische Belastung der Substratmaterialien sowie die lange Prozesszeit. [41] Mahajan et al. berichteten nach Ofensinterung bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ einen Widerstand von $0.0361 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, der etwa dem doppelten Wert von metallischem Silber ($0.016 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) entspricht. [33] Maiwald et al. erreichten nach Ofensinterung bei $350 \text{ }^\circ\text{C}$ Leitfähigkeiten von $50 \text{ } \%$ – $70 \text{ } \%$ von metallischem Silber ($6.25 \cdot 10^7 \text{ S/m}$). [18]

Eine **Mikrowellensinterung** führt zu einer, durch die absorbierte Mikrowellenstrahlung induzierte, intrinsischen Erwärmung der Partikel. Die Absorption ist dabei abhängig von der Temperatur des Werkstoffs, der Mikrowellenfrequenz und der Dichte der gedruckten Leiterbahnen. [41, 44] In Abhängigkeit der Mikrowellenabsorptionsrate der Substrate kann diese, wie unter anderem für Polymere, sehr niedrig ausfallen und nur zu einer marginalen thermischen Belastung führen. [41] Perelaer et al. erzielten hierbei einen spezifischen Widerstand der etwa dem dreifachen Wert von metallischem Silber entspricht. [45]

Die **Lasersinterung** stellt eine selektive Sintermethode dar, bei der die gedruckte Struktur sukzessive mit einem Laser bestrahlt wird. Die eingebrachte Laserenergie hat dabei nur einen geringen Einfluss auf das Substrat, wodurch die Methode ebenfalls für temperaturempfindliche Materialien, wie Polymere, geeignet ist. [46] Bei dieser Methode besteht allerdings die Gefahr, dass ein Skinning-Effekt eintritt, d.h. ein Sintern der Leiterbahnoberfläche ohne vollständige Sinterung der inneren Bereiche. Laserintensität, Pulsdauer und Verfahrensgeschwindigkeit müssen deshalb entsprechend eingestellt werden. [41] Renn et al. erreichten für die Lasersinterung von Silbernanopartikelintinten auf Silikonelastomersubstraten einen Wert von $0.045 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. [24]

Die **Elektrische Sinterung** bezeichnet eine Sintermethode auf Basis eines elektrischen Stroms, die für gedruckte Strukturen mit Silbernanopartikeln erstmals von Allen et al. untersucht wurde. Bei dieser Methode wird eine elektrische Gleichspannung an eine gedruckte Struktur mittels Kontaktierung angelegt. Der Stromfluss führt zu einer intrinsischen Erwärmung und initiiert die Sinterung der Partikel. Allen et al. erreichten mit dieser Methode eine maximale elektrische Leitfähigkeit von $3.7 \cdot 10^7 \text{ S/m}$, die etwa dem halben Wert von metallischem Silber entspricht. Die Vorteile dieser Methode liegen in einer geringen thermischen Belastung des Substrats, einer extrem kurzen Sinterdauer im Bereich von Mikrosekunden und der Einstellung definierter Leiterbahnwiderstände. [40, 41]

Die **Photonische Sinterung** beruht auf dem photothermischen Effekt, wird insbesondere durch Xenonblitze erzielt und ist abhängig von der Lichtabsorption der verwendeten Materialien, die in der Regel für metallische Partikel höher ist als die der Substrate. Die Methode erfolgt innerhalb von Millisekunden. [41, 47] Gräf et al. zeigten, dass eine Funktionalisierung von additiv hergestellten Polymerstrukturen anhand einer photonischen Sinterung möglich ist. [P1]

Die **Chemische Sinterung** basiert auf der Entfernung der organischen Beschichtung der Nanopartikelintinten auf chemischer Basis. Wakuda et al. erreichten dies durch eine Behandlung mit Methanol bei Raumtemperatur und erzielten einen Widerstand von $0.73 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Der Vorteil dieser Methode beruht darauf, dass die chemische Sinterung bei Raumtemperatur erfolgt und kein Temperatureintrag notwendig ist. Die erreichte Leitfähigkeit fällt allerdings sehr niedrig aus. [41, 48]

Substrat

Nach der Aerosolabscheidung interagiert die Tinte mit dem Substrat und definiert vor allem den Leiterbahnquerschnitt, die Leiterbahnkontur und die Haftfestigkeit der gedruckten Struktur.

Die **Substrattemperatur** wirkt sich sowohl auf die Leiterbahnbreite als auch auf den Overspray aus. Dabei führt eine höhere Substrattemperatur zu einem Rückgang im Fließverhalten der Tinte, damit verbunden zu einer reduzierten Linienbreite aber auch zu einem Anstieg im Overspray. Smith et al. untersuchten dieses Verhalten für die Substratmaterialien Glas, Silicium und Polyimide in einem Temperaturbereich von 20 °C – 100 °C, Binder für Silicium in einem Temperaturbereich von 25 °C – 170 °C. Der Rückgang im Fließverhalten wird hierbei durch die erhöhte Verflüchtigungsrate des Lösemittels erklärt, die zu einer geringeren Ausbreitung der Tinte führt. [49, 50]

Die **Oberflächenwechselwirkung** ergibt sich aus dem Zusammenspiel zwischen der freien Oberflächenenergie der Substrate und der Oberflächenspannung der Tinten sowie deren Relationen von polaren zu dispersen Komponenten. [51] Hierdurch leitet sich die Benetzung und die Adhäsion der gedruckten Leiterbahnen ab. [52, P3]

In Bezug auf die **Oberflächentopographie** wurde die Substratrauigkeit bereits als Einflussparameter identifiziert. [13] Hörber et al. stellten beim Vergleich von Oberflächen unterschiedlicher Rauigkeit einen niedrigeren Widerstand für Substrate mit höherer Oberflächengüte fest. [29] Binder untersuchte den Einfluss der Rauigkeit auf die Leiterbahnbreite für Silicium-Wafer mit polierten und geätzten Oberflächen. Dabei wurde kein markanter Einfluss der Rauigkeit auf die Leiterbahnbreite detektiert, jedoch ein Fließen der Tinte für geätzte Oberflächen beobachtet. [50, 14] Eine detaillierte Einflussanalyse der Oberflächentopographie auf die geometrischen und elektrischen Eigenschaften gedruckter Leiterbahnen wurde allerdings noch nicht durchgeführt.

Umwelt

Umwelteinflüsse wie **Temperatur**, **Luftfeuchtigkeit**, **Kontamination** und **Lichtexposition** können ebenfalls das Druckergebnis beeinflussen. [9, 13] Durch eine Abschirmung des Druckbereichs besteht die Möglichkeit die Effekte zu reduzieren. Zudem verhalten sich mit Silbernanopartikeln gedruckte Leiterbahnen nach erfolgtem Sinterprozess gegenüber Umwelt-

schwankungen stabil. Zuverlässigkeitstests zeigten hierbei keine signifikanten Einflüsse der Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf den gemessenen Widerstand, insbesondere bei Strukturen mit hoher Schichtanzahl. [28]

2.3.2 Einflussgrößen auf den Aerosolstrahl

Ein umfassendes Verständnis der physikalischen Grundlagen des Aerosolstrahls und damit verbunden des Abscheideprozesses ist Basis zukünftiger Optimierungsstrategien für aerosolbasierte Drucktechnologien. Die entscheidenden Einflussgrößen auf den Aerosolstrahl umfassen den Aerosol-Flow, den Sheath-Flow, das Drucksystem sowie die verwendete Tinte und sind in Bild 5 zusammengefasst.

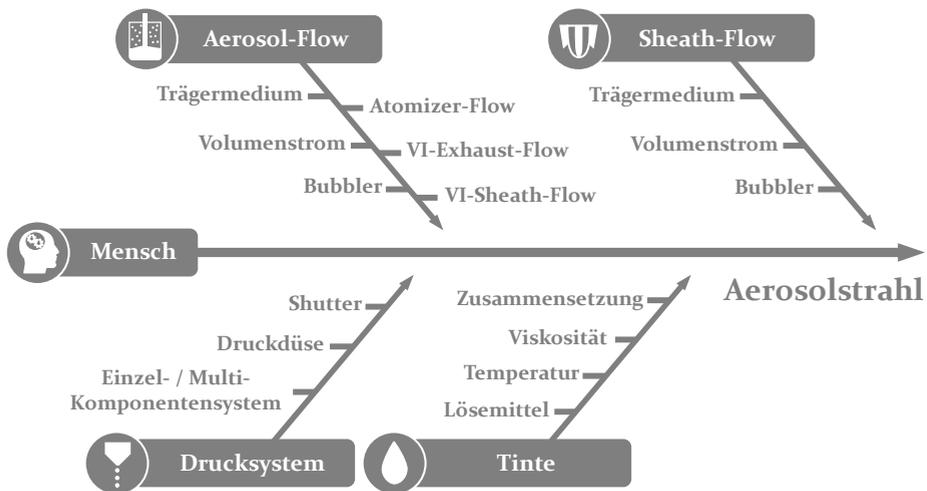


Bild 5: Einflussgrößen auf den Aerosolstrahl

Aerosolstrahl

Die für den Aerosolstrahl charakteristischen Eigenschaften sind der Massenstrom, der Aerosolstrahldurchmesser sowie die Geschwindigkeit und Größenverteilung der Aerosolpartikel. In der Druckdüse wird der Aerosol-Flow radial durch den Sheath-Flow beschleunigt und fokussiert. Für die Strömung wird hierbei ein laminarer Verlauf angenommen, [3, 16, 25, 14, 53] der für eine Reynolds-Zahl Re [53–55] kleiner 2500 gilt. [55]

Dabei ist ρ_Q die Dichte, v_Q die Strömungsgeschwindigkeit, d_Q der Durchmesser, η die dynamische Viskosität des Fluids und Q_A und Q_S die Volumenströme des Aerosol- und Sheath-Flows:

$$Re = \frac{\rho_Q \cdot v_Q \cdot d_Q}{\eta} = \frac{4\rho_Q (Q_A + Q_S)}{\pi\eta d_Q} \quad (2.1)$$

Aus dem laminaren Verlauf kann abgeleitet werden, dass der Aerosol-Flow axialsymmetrisch vom Sheath-Flow umgeben ist und sich die beiden Volumenströme über den gesamten Aerosolstrahl hinweg nicht mischen. [33, 14, 55, 56] Für die Volumenströme wird zudem die Annahme getroffen, dass die Trägergase inkompressibel sind. [25, 26] Diese Annahme ist für hinreichend niedrige Geschwindigkeiten des Aerosolstrahls – im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit – gerechtfertigt. [14]

Der Aerosolstrahl besitzt nach dem Austritt aus der Druckdüse die Geschwindigkeit v_A und Querschnittsfläche A_A . Für den Massenstrom gilt unter der Annahme, dass vom Düsenaustritt bis zum Substrat kein Materialverlust erfolgt, die Kontinuitätsgleichung [33]:

$$\rho_A \cdot A_A \cdot v_A = \rho_S \cdot A_S \cdot v \quad (2.2)$$

mit A_S als Querschnittsfläche der gedruckten Struktur und v als Druckgeschwindigkeit. Die Parameter ρ_A und ρ_S entsprechen dabei der jeweiligen Dichte des Aerosols im Strahl und nach Aerosolabscheidung auf dem Substrat. An dieser Stelle sei allerdings darauf hingewiesen, dass sich beim Einsatz von Silbernanopartikelintinten Lösemittel während des Druckprozesses verflüchtigen und sich somit die applizierte Masse auf der Substratoberfläche reduziert. [33]

Aus der Kontinuitätsgleichung ergibt sich für die Fokussierung des Aerosolstrahls ein indirekt proportionaler Zusammenhang zwischen Aerosolstrahlquerschnittsfläche und Aerosolgeschwindigkeit. Bei einem konstanten Aerosol-Flow erhöht sich somit bei einem Anstieg des Sheath-Flow die Aerosolgeschwindigkeit und reduziert sich die Querschnittsfläche, d.h. der Durchmesser des Aerosolstrahls. Für den Druckprozess bedeutet dies unter der Prämisse einer gleichbleibenden Druckgeschwindigkeit und konstanter Dichten eine Abnahme in der Linienbreite bei gleichzeitiger Zunahme in der Linienhöhe. [33]

Die Betrachtung von homogenen Volumenströmen dient der makroskopischen Charakterisierung des Aerosolstrahls. Für eine detaillierte Analyse des Aerosolstrahls unter Berücksichtigung der Gas-Partikel-Wechselwirkung sowie der Partikelgrößenverteilung ist die Verwendung der

Navier-Stokes-Bewegungsgleichungen erforderlich. Diese kann für die vorliegende aerosolbasierte Drucktechnologie auf die Stokes- und Saffman-Kraft reduziert werden – eine Annahme die anhand experimentell ermittelter Daten validiert wurde. [25] Dabei wirkt die Stokes-Kraft in Richtung des Aerosolstrahls und ist proportional zum Partikeldurchmesser, zur Viskosität des Fluids und zur Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Partikel. [25, 57] Die Saffman-Kraft wirkt hingegen senkrecht zur Bewegungsrichtung des Aerosolstrahls in Richtung größerer Aerosolstrahlgeschwindigkeiten und ist ebenfalls proportional zur Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Partikel. [25, 58, 59] Mit Hilfe der Stokes- und Saffman-Kraft lassen sich so Strömungslinien der Aerosolpartikel berechnen. [25, 26]

Der theoretische Ansatz unter Verwendung der Stokes- und Saffman-Kraft wird auch für die numerische 3D-CFD (*computational fluid dynamics*) Simulation verwendet. Dabei können Turbulenzen im Aerosolstrahl und die Kompressibilität des Trägermediums berücksichtigt werden. [55] Chen et al. untersuchten damit den Einfluss der Partikelgröße im Bereich von $1\ \mu\text{m}$ – $10\ \mu\text{m}$ auf die Fokussierung des Aerosolstrahls. Danach werden kleine Aerosolpartikel weniger stark fokussiert. Dies erklärt auch den experimentell beobachteten hohen Anteil an kleinen Partikeln im Overspray – insbesondere für einen niedrigen Sheath-Flow. [55] Zudem können durch die numerische Simulation Aussagen über die Geschwindigkeit der Aerosole getroffen werden. Sie liegt beim Düsenaustritt etwa bei $\sim 100\ \text{m/s}$. [25, 26, 55, 60] Die Druckgeschwindigkeit, die um Größenordnungen niedriger als die Aerosolgeschwindigkeit liegt, hat daher keinen Einfluss auf die Strömungsdynamik des Aerosolstrahls. [55]

Die Partikelgeschwindigkeit und Partikelgrößenverteilung kann auch experimentell anhand optischer Verfahren ermittelt werden. Mahmud et al. entwickelten hierzu ein Streulichtmessverfahren für die Bestimmung der Partikelposition, Partikelgeschwindigkeit und Partikelgröße anhand von Beugungsmustern. Dabei wurde eine Partikelgeschwindigkeit im Bereich von $100\ \text{m/s}$ – $160\ \text{m/s}$ ermittelt. [60]

Aerosol-Flow, Sheath-Flow und Focusing Ratio

Der Aerosol-Flow wird in der Druckdüse vom Sheath-Flow axialsymmetrisch umgeben, beschleunigt und fokussiert. Bei der Verwendung eines pneumatischen Atomizers setzt sich der Aerosol-Flow aus mehreren Volumenströmen zusammen und entspricht im verwendeten Drucksystem der um den VI-Exhaust-Flow reduzierten Summe aus Atomizer-Flow und

VI-Sheath-Flow. Das Trägermedium ist sowohl für den Aerosol-Flow als auch für den Sheath-Flow in der Regel ein Inertgas wie Stickstoff. Optional kann das Trägermedium durch einen Bubbler geleitet werden, um Verflüchtigungen von Lösemitteln zu kompensieren. [15, 16]

Für die Einstellung des Aerosolstrahldurchmessers ist das FR (*Focusing Ratio*), d.h. das Verhältnis von Sheath-Flow zu Aerosol-Flow von entscheidender Bedeutung. [16, 33, 14, 55, 56] Dieser Zusammenhang wurde für weite Bereiche des FR experimentell bestätigt. [14, 56] Dabei birgt ein niedriges Focusing Ratio mit $FR < 1$ das Risiko, dass die Druckdüse durch Aerosolablagerungen verstopft. [26, 14]

Anhand der numerischen 3D-CFD-Simulation können die Wechselwirkungen zwischen Aerosol-Flow und Sheath-Flow unter Berücksichtigung der Partikelgrößenverteilung analysiert werden. Chen et al. bestätigten, dass eine Zunahme des Sheath-Flow mit einer Erhöhung der Geschwindigkeit der Aerosolpartikel und einem Einschnüren des Aerosolstrahls einhergeht – die gedruckte Linienbreite und der Overspray nehmen dementsprechend ab. [55] Nach Secor et al. folgen kleine Aerosolpartikel mit einer geringen Trägheit tendenziell eher den Strömungslinien und lassen sich weniger stark fokussieren. Das bedeutet, dass kleine Partikel entweder die Substratoberfläche nicht erreichen oder auf diese mit einem verbreiterten Aerosolkegel treffen und Overspray verursachen. [56]

Drucksystem

Die Aerosolerzeugung erfolgt kontinuierlich, die sequenzielle Unterbrechung des Aerosolstrahls zur Umsetzung des Drucklayouts wird durch einen **Shutter** realisiert. [3] Hierbei kann zwischen einer mechanischen und einer pneumatischen Variante unterschieden werden. Ein mechanischer Shutter unterbricht den Druckprozess, indem der Aerosolstrahl nach Düsenaustritt durch ein Plättchen blockiert wird. Ein pneumatischer Shutter unterbricht den Aerosolstrahl innerhalb der Druckdüse, indem der Aerosolstrahl durch ein Vakuum abgeleitet wird.

Der Durchmesser der **Druckdüse** hat einen wesentlichen Einfluss auf das Strömungsverhalten und somit den Durchmesser des Aerosolstrahls. Berechnungen auf Basis des Gesetzes von Hagen und Poiseuille ergeben eine direkte Proportionalität zwischen dem Durchmesser des Aerosolstrahls und der Druckdüse. [14]

Aerosolbasierte Drucksysteme existieren sowohl in Form eines **Einzel-** als auch eines **Multikomponentensystems**. Sukeshini et al. untersuchten

mit einem Zweikomponentensystem die Herstellung von Festoxidbrennstoffzellen. [8] Reitelshöfer et al. entwickelten ein Dreikomponentensystem, bestehend aus einem Zweikomponenten-Silikon und einer auf reduziertem Graphenoxid basierenden Tinte, um zukünftig künstliche Muskeln herzustellen. [6, P2]

Tinte

Die Verwendung eines pneumatischen Atomizers erlaubt für die **Zusammensetzung** der Dispersionen, also Tinten mit Partikelgehalt, einen Gewichtsanteil an Nanopartikeln von bis zu 75 % mit einer Partikelgröße bis zu 500 nm. [9] Ein entscheidendes Kriterium für die Güte der Zusammensetzung der Tinte stellt deren Stabilität dar. Diese zeichnet sich durch eine zeitlich homogene Verteilung der Nanopartikel im Lösemittel und damit durch eine niedrige Sedimentation aus. Nach dem Stokesschen Gesetz ist die Sedimentationsgeschwindigkeit von Nanopartikeln in einer Tinte proportional zum Quadrat des Partikelradius und zur Differenz der Dichten von Tinte und Nanopartikel. [35] Um ein Aggregieren der Partikel zu vermeiden und eine stabile Partikelgrößenverteilung zu erhalten, kann eine Stabilisierung der Partikeloberfläche erforderlich sein. [35]

Die Sedimentationsgeschwindigkeit ist nach Stokes umso geringer, je höher die **Viskosität** des Lösemittels ist. [35] Der Einsatz eines pneumatischen Atomizers erlaubt hohe Tintenviskositäten bis 1000 cP [9] und ermöglicht dadurch den Einsatz von Tinten mit hoher Stabilität. Die Viskosität nimmt dabei mit der **Temperatur** der Tinte ab. [61]

Eine weitere Einflussgröße auf den Aerosolstrahl ist der Siedepunkt der **Lösemittel**. Lösemittel mit niedrigem Siedepunkt können sich auf dem Weg zum Substrat verflüchtigen. Die dadurch reduzierten Partikelgrößen mit geringerer Trägheit können die Abscheidecharakteristik und den Overspray beeinflussen. Zudem können Aerosolabscheidungen basierend auf Lösemitteln mit niedrigem Siedepunkt eine hohe Oberflächenrauigkeit und Porosität erzeugen. [56] Für den Siedepunkt der Lösemittel wird ein Wert im Bereich von ≈ 180 °C oder darüber empfohlen [35], allerdings sind auch Mischungen von Lösemitteln mit niedrigem und hohem Siedepunkt möglich. [15, 35] Eckstein et al. und Kim et al. erzielten eine Verbesserung in der Druckqualität von Ethanol-basierten Tinten mit einem Siedepunkt von 78 °C bzw. wasserbasierten Tinten mit Siedepunkt von 100 °C durch die Zugabe von Ethylenglycol als Co-Lösemittel mit einem Siedepunkt von 197 °C. [62, 63]

2.4 Technologischer Handlungsbedarf

Die hohe Anzahl an interdependenten Einflussgrößen auf den Aerosolstrahl stellt eine immense Komplexität für aerosolbasierte Drucksysteme dar, die sich in einer geringen Reproduzierbarkeit und hohen Prozessinstabilität widerspiegelt. Prozessschwankungen wirken sich dabei direkt auf die Druckqualität aus. Eine zeitliche Massendrift kann substantiell das Druckergebnis und damit den Querschnitt und die elektrischen Eigenschaften von gedruckten Leiterbahnen beeinflussen. [49]

Hieraus leiten sich zwei zentrale Herausforderungen ab. Zum einen ist eine statistisch fundierte Datenerfassung und Datenanalyse für gedruckte Strukturen zwingend erforderlich, um systematische Fehler zu kompensieren und allgemeingültige Wirkungsprinzipien abzuleiten. Zum anderen muss ein zuverlässiges Messsystem für ein in situ Monitoring des Aerosolstrahls entwickelt werden, um zukünftig Prozessschwankungen minimieren zu können.

Druckqualität: Datenanalyse und Statistik

Die Analyse gedruckter Strukturen erfolgt in der Regel auf Basis von Mikroskopbildern oder anhand von Höhenprofilen eines Laserscanmikroskops. [14, 55, 64, 65] Hierbei wird allerdings in vielen Untersuchungen nur eine vergleichbar geringe Datenbasis verwendet – zudem erfolgt die Analyse zumeist manuell.

Binder et al. und Chen et al. entwickelten jeweils einen Algorithmus zur Ermittlung der Linienbreite und des Oversprays. Chen et al. verwendeten als Datengrundlage ein zweidimensionales Höhenprofil, das anhand von Schwellenwerten in Bereiche mit Tinte und Substratbereiche unterteilt wird. Mit der gleichen Zielstellung wendeten Binder et al. den Algorithmus nach Otsu [66] auf optische Mikroskopbilder an. [14, 55] In beiden Fällen erfolgt allerdings keine Kombination der optischen Mikroskopaufnahmen mit dem Höhenprofil und keine simultane Betrachtung von Leiterbahnquerschnitt, Leiterbahnkontur und Overspray.

Salary et al. analysierten ebenfalls gedruckte Leiterbahnen mit einem optischen Verfahren. Die Leiterbahnen wurden dabei mit einer CCD-Kamera (*Charge Coupled Device*) aufgenommen, in Grauwerte umgewandelt und nachfolgend anhand zweier Schwellenwertparameter in Leiterbahn, Overspray und Substrat unterteilt. [16]

Neben einer adäquaten Analyseverfahren ist auch eine umfangreiche Datenbasis für eine fundierte Auswertung entscheidend. Gerade im Hinblick auf den volatilen Druckprozess können nur so allgemeingültige Aussagen über die Wirkungsweise der Einflussgrößen auf die Druckqualität abgeleitet werden. Eine neuentwickelte Methodik zur Charakterisierung von Leiterbahnen unter Berücksichtigung der Substratoberfläche wird in Kapitel 4 beschrieben und in Kapitel 5 für die vorliegende Studie angewendet.

Aerosolstrahl: In situ Messung und Monitoring

Systematische Prozessschwankungen, wie eine Drift im Massenstrom, können zwar zu einem gewissen Grad durch eine Adaption des Drucklayouts in Form alternierender Druckrichtungen für multiple Schichten kompensiert werden [49] – allerdings stellen diese Optimierungsstrategien nur indirekte und nicht hinreichende Ansätze dar. Daher ist zur Sicherstellung der Prozessstabilität ein kontinuierliches Monitoring zwingend erforderlich.

In der Literatur werden unterschiedliche Messverfahren zur parametrischen Quantifizierung des Aerosolstrahls beschrieben. Akhatov et al. und Binder bestimmten die Breite des Aerosolstrahls durch eine Streulichtmessung. [25, 50] Mahmud et al. erfassten die Position, Größe und Geschwindigkeit von Aerosolpartikeln durch die Messung von Beugungsmustern mit einer CCD-Kamera, getriggert durch einen gepulsten Laser. [60]

Salary et al. beschreiben ein Verfahren zur in situ Quantifizierung von Leiterbahnquerschnittsprofilen, mit dem sich Rückschlüsse auf die Druckbedingungen ziehen lassen. Das in das Drucksystem senkrecht zum Substrat integrierte Monitoring-System nimmt dazu diskontinuierlich Bilder der gedruckten Linien mit einer CCD-Kamera auf. Diese wurden bezüglich Linienbreite, Konturrauigkeit und Overspray analysiert. [16] Zudem können hieraus mit einem SfS-Verfahren (*Shape-from-Shading*) Querschnittsprofile rekonstruiert werden. [67]

Gu et al. verwendeten für die Bestimmung des Aerosol-Massenstroms Kavitäten in Silicium-Wafern die mittels Photolithographie in unterschiedlichen Durchmessern im Bereich von 50 μm – 400 μm und einer Tiefe von 200 μm hergestellt wurden. Anhand der Füllzeit sind Rückschlüsse auf den Massenstrom möglich. [68]

Zudem existieren eine Reihe kommerzieller Produkte, die zur in situ Analyse von Partikelstrahlen verwendet werden können. Das zugrunde

liegende Messprinzip basiert auf der Lichtstreuung an Partikeln und wird durch CCD-Aufnahmen ausgewertet. Dabei ist nicht nur die Erfassung der Partikelgrößenverteilung, sondern auch die Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit möglich. Allerdings erfordert diese Methode eine Partikelgröße $> 5 \mu\text{m}$ und ist somit für die vorliegende aerosolbasierte Drucktechnologie mit Partikelgrößen von $1 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$ nicht geeignet. [69, 70]

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neu entwickeltes Laser-Transmissions-Messsystem vorgestellt, mit dem die Charakterisierung des Aerosolstrahls anhand der Betrachtung eines Partikelkollektivs in einem in situ Messverfahren möglich ist. Dieses Messsystem und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten werden in Kapitel 6 behandelt.

3 Funktionalisierung von Verkleidungselementen im Bereich der Flugzeugkabine

Die Anwendungen für digitale Drucktechnologien und aerosolbasierte im Speziellen sind mannigfaltig und nehmen stetig zu. Ein neuer Forschungs- und Entwicklungsansatz liegt im Bereich der Bordnetze. Deren Herstellungsprozess und Integration ist nach wie vor und branchenunabhängig stark von manuellen Arbeitsschritten geprägt. Eine zentrale Herausforderung stellt dabei die hohe Komplexität in der Handhabung biegeschlaffer Kabel dar. [71] Mit dem Ziel den Automatisierungsgrad zu steigern, müssen zukünftig neue Konzepte entwickelt werden, die entweder auf neue Herstellungsprozesse oder neue Produkte abzielen. [P3]

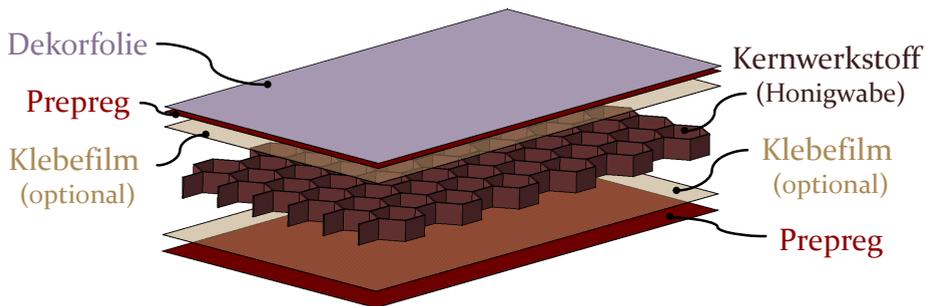


Bild 6: Faserverbundwerkstoff in Sandwichbauweise mit glasfaserverstärkten Prepregs und einem Honigwaben-Kernwerkstoff

Im Zuge dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz zur partiellen Substitution des Bordnetzes im Bereich der Luftfahrt untersucht. Hierzu werden die in Bild 6 gezeigten Faserverbundwerkstoffe in Sandwichbauweise, die in der Flugzeugkabine als Verkleidungselemente eingesetzt werden, mittels digitaler Drucktechnologien funktionalisiert. [P3]

Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt die Integration des Bordnetzes für die Signal- und Leistungsvernetzung sowohl in der Flugzeugkabine als auch im gesamten Flugzeug manuell. Die Kabelmontage im Kabinenbereich wird an den Verkleidungselementen mit Abstandhaltern, die in einem manuellen Klebeprozess angebracht werden, realisiert. Eine direkte Funktionalisierung der Sandwichkomponenten erhöht an dieser Stelle den Automatisierungsgrad deutlich und spart zudem Zeit, Bauraum, Gewicht und Kosten. [P3-P5]

Innerhalb dieses Themenkomplexes wird in Kapitel 3.1 der Herstellungsprozess von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise beschrieben. Eine Auswahl geeigneter Substratmaterialien wird in Abschnitt 3.2 getroffen und die Funktionalisierung in Kapitel 3.3 mittels aerosolbasierter und inkjetbasierter Drucktechnologie umgesetzt. Der Fokus dieser Arbeit liegt hierbei auf den in Kapitel 2 beschriebenen aerosolbasierten Drucktechnologien, die im Rahmen erster Vorversuche in Kapitel 3.4 untersucht werden. In Kapitel 3.5 werden neben der Applikation leitfähiger Strukturen weitere Anwendungen identifiziert und die Problematik in der Anbindung gedruckter Elektronik an das Bordnetz beleuchtet. Kapitel 3.6 rundet das Themenfeld mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

3.1 Herstellung von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise

Verkleidungselemente in Sandwichbauweise zeichnen sich vor allem durch ihr geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Biegefestigkeit aus. [72] Ihre Herstellung basiert auf Prepreg-Halbzeugen, die in Kombination mit einem Kernwerkstoff und einem optionalen Klebfilm verpresst werden. [P3, P5]

Prepregs (*pre-impregnated fibres*) sind Zweikomponenten-Materialien, die sich aus Fasern als Füllstoff und Harz als Matrix zusammensetzen. Für die Herstellung der Halbzeuge stehen eine Reihe von Verfahren zur Verfügung, wie unter anderem Tränken oder Sprühen. Nach der Herstellung der Prepregs werden diese partiell ausgehärtet, nehmen eine halb feste Konsistenz an und eignen sich in diesem Zustand für die Weiterverarbeitung. Als Füllstoffe werden Carbon-, Glas- oder Aramidfasern in verschiedenen Längenvarianten eingesetzt. [72]

Kernwerkstoffe können aus einem breiten Spektrum diverser Materialien gewählt werden. Die in der Luftfahrt meistverbreiteten Kernwerkstoffe sind Honigwabenstrukturen aus Aluminium oder Nomex®. Nomex® beschreibt Honigwaben, die sich aus Aramidfasern in einer Phenolharzmatrix zusammensetzen. Neben diesen Kernwerkstoffen werden zunehmend auch Polymerschaumstoffe eingesetzt, die sich vor allem durch ihre längere Haltbarkeit und ihre ausgezeichneten Hochtemperatureigenschaften auszeichnen. [72] Weitere Kernwerkstoffe sind in der Entwicklung. Hierunter zählt unter anderem die vom Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP) im Forschungsbereich Polymermaterialien und Composite (PYCO) entwickelte Noppenwabe. Diese zeichnet sich vor allem durch ihren hochautomatisierten und kontinuierlichen Produktionsprozess aus.

Darüber hinaus ermöglicht ihr Design eine direkte Einbettung von Kabeln. [73]

Der Herstellungsprozess der Faserverbundwerkstoffe in Sandwichbauweise ist in Bild 7 dargestellt. Dabei können optional zu Beginn des Herstellungsprozesses Klebefilme beidseitig auf dem Kernmaterial aufgebracht werden. Anschließend erfolgt eine, zumeist manuelle, Positionierung der Prepreg-Halbzeuge auf der Ober- und Unterseite des Kernmaterials bzw. des Klebefilms. [P3, P5]

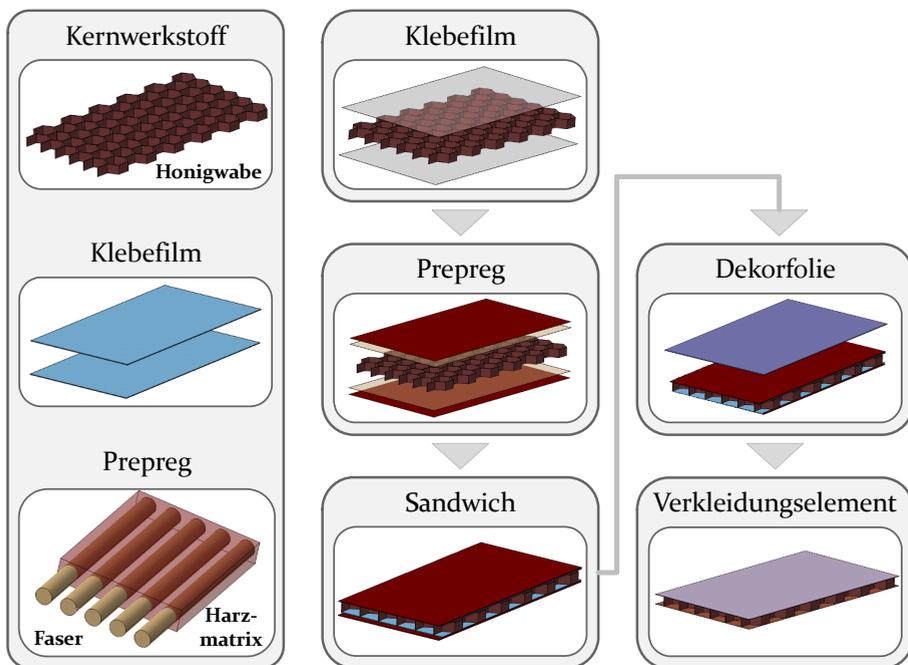


Bild 7: Herstellungsprozess von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise in Anlehnung an [P5]

Der Materialverbund wird daraufhin in einem Press- oder Autoklav-Verfahren unter Druck- und Temperatureinwirkung ausgehärtet. Defekte, die in diesem Prozess auf der Substratoberfläche entstehen, können manuell nachgearbeitet werden. Zuletzt wird auf der resultierenden Sandwichkonstruktion eine Airline-spezifische Dekorfolie aufgebracht. [74, P3-P5] In Abhängigkeit der Anwendung können Verkleidungselemente planar (2D) oder gekrümmt (2.5D) hergestellt werden.

3.2 Auswahl geeigneter Substrate

In der Flugzeugkabine werden für Verkleidungselemente Prepreg-Verbundwerkstoffe mit Glasfasern als Füllstoff verwendet. Diese besitzen eine im Vergleich zu Carbonfasern geringere, allerdings ausreichend hohe Steifigkeit im Verhältnis zum Gewicht – sind jedoch deutlich kostengünstiger. [72, P4] Als Matrix werden primär Phenolharze verwendet – ebenfalls eine Entscheidung aus Kostengründen. Insgesamt sind etwa 60 unterschiedliche glasfaserverstärkte Prepregs auf Phenolharzbasis verfügbar, die eine Luftfahrtzulassung besitzen und in der Flugzeugkabine eingesetzt werden. [P4] Für die Vorauswahl werden die lizenzierten und kommerziell eingesetzten Prepregs PHG600-44-50 der Firma Gurit und Airpreg PC 8242 der Firma Isovolt ausgewählt. Zudem wird ein vom Fraunhofer Institut hergestelltes glasfaserverstärktes Prepreg in den Voruntersuchungen inkludiert, das auf einem Cyanatharz basiert. [P4] Im Gegensatz zu Phenolharzen, die durch Polykondensation unter Abspaltung von Wasser polymerisieren, polymerisieren Cyanatharze durch Polyaddition und weisen deshalb eine bessere Oberflächengüte auf. Ihre Kosten übersteigen allerdings die der Phenolharze, weshalb ihr Einsatz lediglich auf Anwendungen mit hohen Anforderungen – wie unter anderem Steigleitungen in der Klimaanlage – beschränkt ist. [P3, P4]

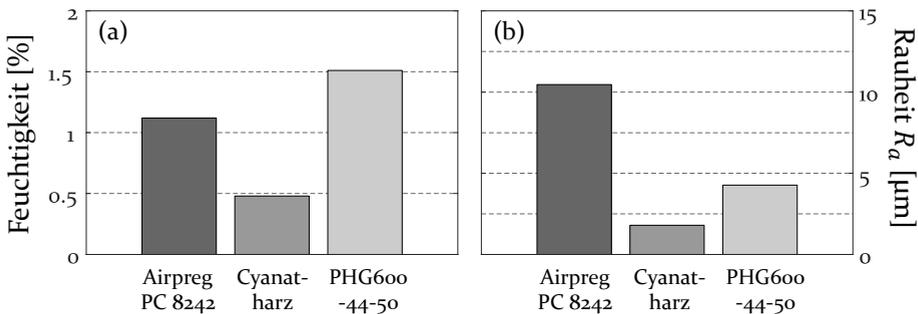


Bild 8: Feuchtigkeitsaufnahme (a) und Oberflächenrauheit (b) verschiedener Faserverbundwerkstoffe in Anlehnung an [P4]

Für die weiteren Untersuchungen werden Proben mit einer Aramid-Honigwabe als Kernmaterial verwendet. Die Sandwichbauteile werden mit einem Anpressdruck von $0,5 \text{ N/mm}^2$ hergestellt. Phenolharz-basierte Prepregs werden für 45 Minuten bei einer Temperatur von $145 \text{ }^\circ\text{C}$ und Cyanatharz-basierte Prepregs für 30 Minuten bei einer Temperatur von $160 \text{ }^\circ\text{C}$ gepresst.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, sind für die Funktionalisierung der Substrate deren Oberflächeneigenschaften von entscheidender Bedeutung. Für die

Vorauswahl werden die Oberflächengüte in Form der Rauheit und die Feuchtigkeitsaufnahme als Entscheidungskriterium verwendet.

Die Feuchtigkeitsaufnahme der Substrate hat einen negativen Einfluss auf deren mechanische Eigenschaften. Darüber hinaus führt im Kontext der gedruckten Elektronik eine Expansion der Substrate zur Rissbildung bis hin zum Abplatzen der applizierten Strukturen. Für die Vorauswahl der Verkleidungselemente ist somit eine niedrige Feuchtigkeitsaufnahme entscheidend. In Bild 8 (a) ist die relative Feuchtigkeitsaufnahme der drei zu evaluierenden Substratmaterialien dargestellt. Hierfür wurden Proben in einem Klimaschrank mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % bei einer Temperatur von 30 °C für 100 Stunden gelagert. Das Prepreg auf Cyanatharzbasis zeigt dabei die geringste Feuchtigkeitsaufnahme mit einem Wert von 0,48 %. [P4]

In Bild 8 (b) ist der, mittels taktilem Messgerät erfasste, arithmetische Mittenrauwert R_a aller drei Sandwichbauteile aufgetragen. Die Rauheit der Cyanatharz-basierten Prepregs, die durch Polyaddition polymerisieren, fällt mit einem Wert von 1,80 μm geringer aus als die der Phenolharz-basierten Prepregs, die durch Polykondensation polymerisieren. [P4] Aufgrund der besseren Oberflächengüte und der geringeren Feuchtigkeitsaufnahme werden im Zuge dieser Arbeit ausschließlich Cyanatharz-basierte Faserverbundwerkstoffe in Sandwichbauweise verwendet.

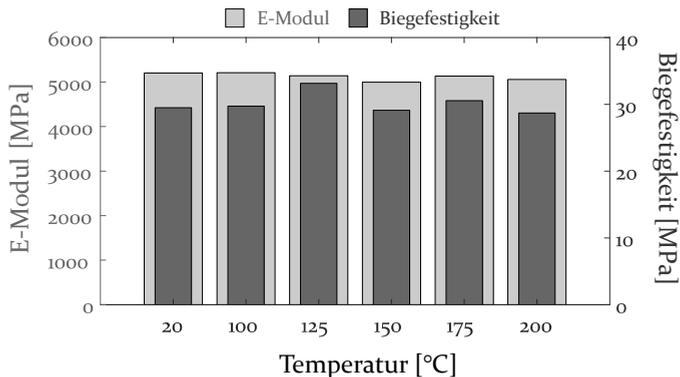


Bild 9: E-Modul und Biegefestigkeit von Cyanatharz-basierten Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise nach thermischer Behandlung in Anlehnung an [P4]

Für die Auslegung der Nachbehandlung, d.h. für die Wahl einer geeigneten Sinterstrategie der gedruckten Strukturen, ist die Temperaturbeständigkeit der Substrate ausschlaggebend. In Bild 9 sind die mechanischen Eigenschaften der Sandwichbauteile mit Cyanatharzmatrix in Abhängigkeit variierender thermischer Belastungen dargestellt. Die Temperatur wird

dabei in einem Bereich zwischen 100 °C und 200 °C eingestellt und über eine Dauer von zwei Stunden gehalten. Die thermische Behandlung zeigt dabei weder einen Einfluss auf den E-Modul noch auf die Biegefestigkeit im Vergleich zu Raumtemperatur. [P4] Somit liegen für die Funktionalisierung der Verkleidungselemente auf Cyanatharzbasis keine thermischen Restriktionen vor. Der Sinterprozess kann damit mit einem Konvektionsofen realisiert werden.

3.3 Funktionalisierung mittels digitaler Drucktechnologien

Für den Aufbau von Verkleidungselementen mit applizierten, leitfähigen Strukturen ist neben der Wahl einer geeigneten Drucktechnologie auch deren Integration in den Herstellungsprozess zu validieren.

Digitale Drucktechnologien

Zusätzlich zu einem aerosolbasierten Druckprozess wird auch ein inkjet-basierter Druckprozess im Hinblick auf eine grundlegende Eignung untersucht.

Das verwendete **aerosolbasierte** Drucksystem ist das Aerosol-Jet-Drucksystem der Firma Optomec Inc., das mit einem Marathon II Druckkopf ausgerüstet ist. [75] Für den Druckprozess wird eine nanoskalige Silbertinte verwendet und ein Massenstrom von etwa 10 mg/min eingestellt.

Für den **inkjetbasierten** Druckprozess kommt ein Piezo-Jet-System der Firma Neotech AMT GmbH zum Einsatz. Dieses System setzt das Drop-on-Demand-Prinzip anhand eines piezobetriebenen Stößels um, der Tintentröpfchen durch eine Druckdüse hindurch beschleunigt. Die sich daraus ergebende hohe kinetische Energie der Tröpfchen vergrößert den realisierbaren Druckabstand im Vergleich zu herkömmlichen inkjetbasierten Drucktechnologien. Als Tinte werden mikroskalige Silbertinten eingesetzt. Der Massenstrom beträgt etwa 65 mg/min und ist damit deutlich höher gegenüber aerosolbasierten Drucktechnologien. [P5]

Integration in den Herstellungsprozess

Mit dem Ziel nicht in den Herstellungsprozess der Verkleidungselemente einzugreifen, sondern diesen lediglich zu erweitern, ergeben sich zwei mögliche Prozessreihenfolgen, die entweder auf eine Funktionalisierung

der bereits gepressten Sandwichbauteile abzielen oder eine Funktionalisierung der Prepreg-Halbzeuge vorsehen. [P5]

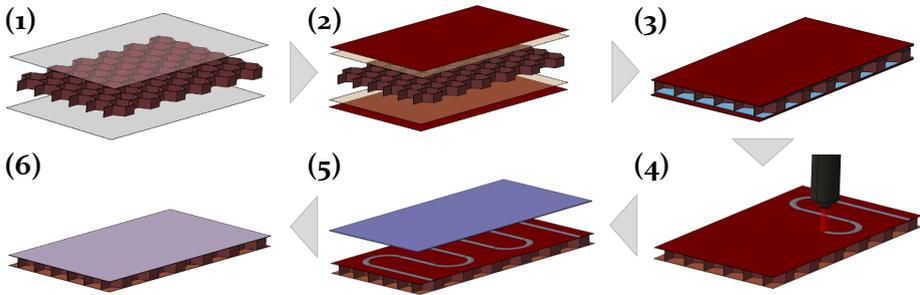


Bild 10: Funktionalisierung von Sandwichbauteilen - (1) Applikation der Klebefilme und (2) Prepreg-Halbzeuge auf dem Kernwerkstoff, (3) Thermisch verpresstes Sandwichbauteil, (4) Funktionalisierung der Sandwichbauteile, (5) Applikation der Dekorfolie nach dem Sinterprozess, (6) Funktionalisiertes Sandwichbauteil

Der Herstellungsprozess für eine **Funktionalisierung der Sandwichbauteile** ist in Bild 10 dargestellt. Analog zu Bild 7 werden in den Prozessschritten eins bis drei die Klebefilme und Prepregschichten auf dem Kernmaterial aufgebracht und gepresst. In einem ergänzenden Prozessschritt werden die Leiterbahnen mit einer 3D-fähigen Drucktechnologie direkt auf die planaren oder gekrümmten Sandwichkomponenten appliziert. Nachfolgend werden die Bauteile in einem Konvektionsofen gesintert und zuletzt durch das Aufbringen einer Dekorfolie komplettiert.

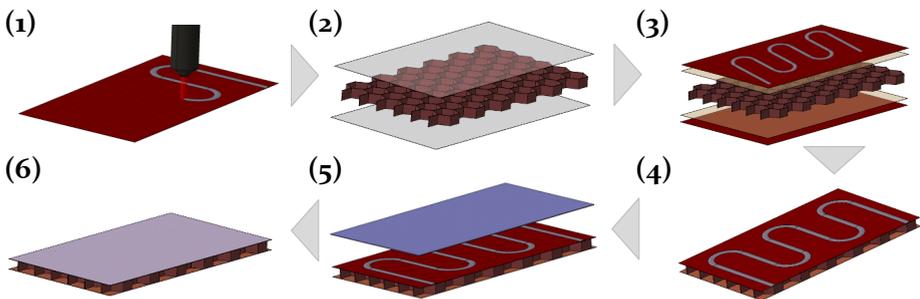


Bild 11: Funktionalisierung von Prepreg-Halbzeugen - (1) Funktionalisierung der Prepreg-Halbzeuge, (2) Applikation der Klebefilme und (3) Prepreg-Halbzeuge auf dem Kernwerkstoff, (4) Thermisch verpresstes und gesintertes Sandwichbauteil, (5) Applikation der Dekorfolie, (6) Funktionalisiertes Sandwichbauteil

Eine weitere Integrationsform stellt die **Funktionalisierung der Prepreg-Halbzeuge** dar, die in Bild 11 aufgezeigt ist. Bei dieser Variante werden die

Leiterbahnen zu Beginn des Herstellungsprozesses auf das Prepreg-Halbzeug aufgebracht und direkt mit dem Kernwerkstoff in einem thermischen Prozessschritt gepresst und zugleich gesintert, wodurch ein zusätzlicher Sinterprozess obsolet wird. Der Druckprozess kann dabei auch in einem zweidimensionalen Rolle-zu-Rolle-Verfahren umgesetzt werden, der sich im Vergleich zum dreidimensionalen Druckprozess durch einen geringeren Komplexitätsgrad und eine höhere Prozessgeschwindigkeit auszeichnet.

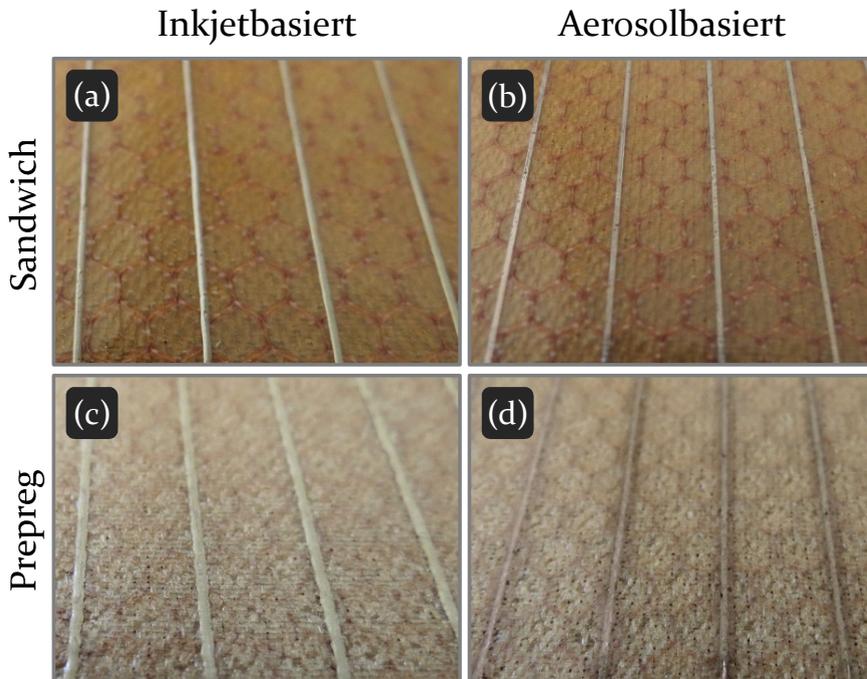


Bild 12: Applikation von leitfähigen Strukturen mit einer inkjetbasierten (a, c) und einer aerosolbasierten (b, d) Drucktechnologie auf Sandwichbauteilen (a, b) und Prepreg-Halbzeugen (c, d)

Zusammenfassend ergeben sich für die Funktionalisierung der Verkleidungselemente die vier in Bild 12 dargestellten Kombinationsmöglichkeiten. Dabei ist grundsätzlich die Funktionalisierung von Sandwichbauteilen und Prepreg-Halbzeugen sowohl mit einer aerosolbasierten als auch mit einer inkjetbasierten Drucktechnologie möglich. In allen vier Fällen stellt sich für die gedruckten Strukturen eine gute Leitfähigkeit ein. Allerdings variiert die Qualität der Leiterbahnkontur und fällt bei einer Funktionalisierung der Prepreg-Halbzeuge geringer aus. Dies ist auf den Pressprozess zurückzuführen, der zu einer undefinierten Zunahme der Leiterbahnbreite führt.

Einen detaillierten Einblick in die resultierende Schichtstruktur in Abhängigkeit des Herstellungsprozesses liefern die mit einem Rasterelektronenmikroskop erstellten Aufnahmen (Bild 13). Eine direkte Gegenüberstellung der gedruckten Leiterbahnen verdeutlicht die Unterschiede in den verwendeten Tinten. Die mittels Inkjet gedruckten Tinten (a, c) beinhalten mikroskalige Silberpartikel in einer Polymermatrix. Der Sinterprozess führt dabei zu einer Vernetzung der Matrix, d.h. an dieser Stelle erfolgt kein Aufschmelzen der Mikropartikel. Im Falle nanoskaliger Silberpartikel, die durch den aerosolbasierten Druckprozess (b, d) aufgebracht werden, verdichten sich diese beim Sinterprozess in Folge der Partikelagglomeration. [41] Es ist zu erkennen, dass sich in Folge des Pressprozesses bei einer Funktionalisierung der Prepreg-Halbzeuge (c, d) ein Harzfluss einstellt, der partiell zu einer Umhüllung der Leiterbahn führt. Zudem verursacht der Pressprozess Mikrorisse in den Leiterbahnen die mittels aerosolbasierter Drucktechnologie (d) aufgebracht werden.

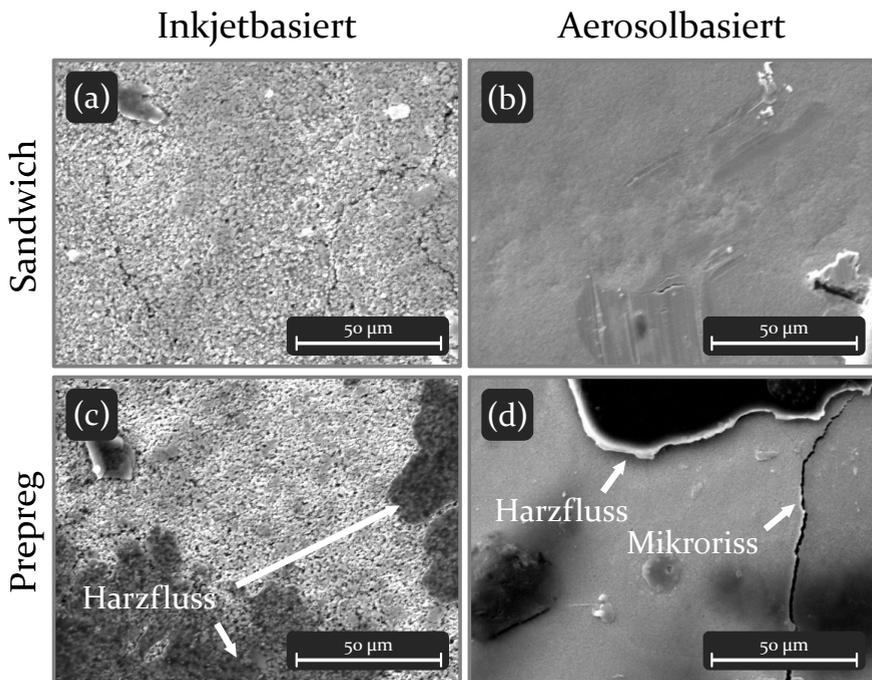


Bild 13: REM-Aufnahmen der gedruckten Leiterbahnen mit einem inkjetbasierten (a, c) und aerosolbasierten (b, d) Druckprozess auf Sandwichbauteilen (a, b) und Prepreg-Halbzeugen (c, d) in Anlehnung an [P5]

Für die weiteren Untersuchungen wird der digitale Druckprozess in den Herstellungsprozess der Verkleidungselemente nach bereits erfolgtem

Pressvorgang integriert. Dies erfordert zwar einen zusätzlichen Sinterprozess, ermöglicht allerdings neben der Vermeidung von Mikrorissen und einem undefinierten Harzfluss auch eine präzise Umsetzung des Leiterbahnlayouts, die anderenfalls aufgrund des Pressprozesses und dem sich daraus ergebenden Verzug der Prepregs nicht möglich wäre. Des Weiteren ist mit der Zielsetzung, Verkleidungselemente um elektronische Bauteile zu erweitern, ein dem Press- und Bestückungsprozess nachgelagerter Druckprozess obligatorisch.

Unabhängig von der verwendeten Technologie können beide Druckköpfe in ein 5-Achssystem integriert werden. Die Funktionalisierung dreidimensionaler Oberflächen ist somit kein ausschlaggebendes Kriterium. Ebenfalls stellt die Applikation der Dekorfolie bei einer frontseitigen Funktionalisierung kein Selektionskriterium dar, da diese die Leitfähigkeit der gedruckten Leiterbahnen in beiden Fällen nicht mindert. [P5] Die Wahl der Drucktechnologie richtet sich demzufolge nach der gewünschten Anwendung und ist aus den spezifischen Vor- und Nachteilen abzuleiten:

Tabelle 1: Gegenüberstellung aerosol- und inkjetbasierter Drucktechnologien in Anlehnung an [76]

aerosolbasiert	<ul style="list-style-type: none">• geringer Massenstrom• feine Strukturen• breites Spektrum an Tinten• hoher Druckabstand• Funktionalisierung komplexer 3D-Objekte• hohe Anlageninvestition
inkjetbasiert	<ul style="list-style-type: none">• hoher Massenstrom• große Strukturbreiten\höhen• großflächige Funktionalisierung• geringe Anlageninvestition

Der hohe Massenstrom inkjetbasierter Systeme prädestiniert diese für einen großflächigen Einsatz und die Umsetzung der Signalverteilung auf den Verkleidungselementen. Demgegenüber setzt die Kontaktierung von elektronischen Bauteilen und Steckverbindungen feine Strukturen bei gleichzeitig hoher Linienqualität und hohem Druckabstand voraus, weshalb sich hierbei aerosolbasierte Drucktechnologien deutlich besser eignen.

Für die Substitution von Bordnetzen im Bereich der Flugzeugkabine müssen beide digitalen Drucktechnologien analysiert werden, um deren Anwendung für Faserverbundwerkstoffe in Sandwichbauweise detailliert

zu charakterisieren und zu optimieren. Im Zuge dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Einflussanalyse von nicht idealen, technischen Oberflächen auf gedruckten Strukturen. Deshalb erfolgen die Untersuchungen für aerosolbasierte Drucktechnologien am Beispiel des Aerosol-Jet-Drucksystems, welches eine Realisierung feinerer Strukturen ermöglicht.

3.4 Voruntersuchungen für aerosolbasierte Drucktechnologien

Im Folgenden werden das Drucksystem, die Tintenzusammensetzung sowie die Sinterstrategie vorgestellt, die für die Funktionalisierung der Sandwichbauteile verwendet werden. Anschließend wird die sich daraus ergebende Leitfähigkeit bestimmt und die Haftfestigkeit der applizierten Strukturen diskutiert.

Drucksystem, Tinte und Vorversuche

Der Marathon II Druckkopf ist im 15X SA 5-Achssystem der Firma Neotech AMT GmbH integriert. Die Anlage weist eine Positionierungsgenauigkeit von $\pm 20 \mu\text{m}$ für jede Linearachse und einen Wert kleiner 1.5 arcmin für jede Rotationsachse auf. [77]

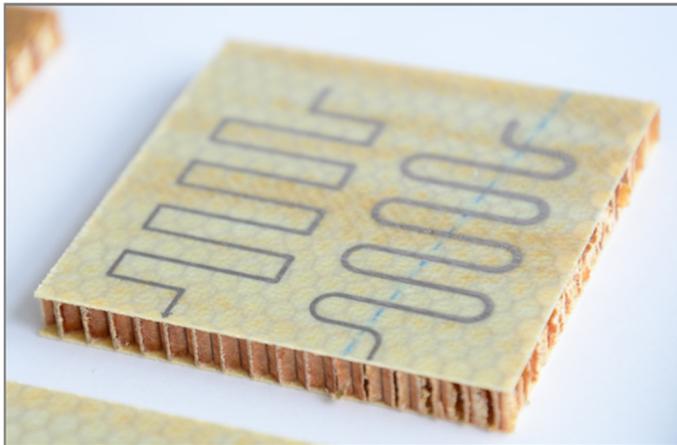


Bild 14: Funktionalisierung von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise mittels aerosolbasierter Drucktechnologie

Für die Erzeugung des Aerosolstrahls werden die Volumenströme für Atomizer, VI-Exhaust und VI-Sheath auf 1200 sccm, 1700 sccm und 1000 sccm eingestellt. Hierdurch wird ein für aerosolbasierte Verfahren hoher Massenstrom von 10 mg/min erreicht, der in Kombination mit dem

groß gewählten Düsendurchmesser von 1 mm eine schnelle Applikation breiter Strukturen ermöglicht. Für einen stabilen Druckprozess wird ein hoher Sheath-Flow von 500 sccm gewählt. Die Reynolds-Zahl, die sich für das gegebene System mit $\rho_0 = 1.16 \text{ kg/m}^3$ und $\eta = 1.67 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ für Stickstoff [25] nach Gleichung (2.1) berechnen lässt, beträgt $Re = 1474$. Der Aerosolstrahl in der Düse ist somit laminar.

Die verwendete Silbernanopartikelntinte setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, die einen auf das Gewicht bezogenen Silbernanopartikelanteil von 66 % und 33 % aufweisen und auf den Lösemitteln MOP (*1-Methoxy-2-Propanol*) und EG (*Ethylenglycol*) basieren. [38] Das Mischungsverhältnis der zwei Komponenten wird empirisch bestimmt und auf 3:1 eingestellt.

Bild 14 zeigt exemplarisch einen funktionalisierten Faserverbundwerkstoff. Nach der Umsetzung des Drucklayouts werden die Leiterbahnen in einem Konvektionsofen bei einer Temperatur von 120 °C über eine Dauer von einer Stunde gesintert. Hierdurch kann ein minimaler spezifischer Widerstand von $0.07 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ erzielt werden, der sich nach mehreren Schichten ab einer Leiterbahnhöhe von 25 μm als Sättigungswert einstellt. [P3] Diese Leitfähigkeit entspricht etwa einem Viertel der von metallischem Silber.

Haftfestigkeitsprüfung

Neben der Erzielung einer hohen Leitfähigkeit ist die Haftfestigkeit der gedruckten Leiterbahnen ebenfalls ein entscheidendes Kriterium für den kommerziellen Einsatz. Hierfür wird der Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 [78] mit einem im Hinblick auf die Wiederholgenauigkeit optimierten System nach [79] durchgeführt.

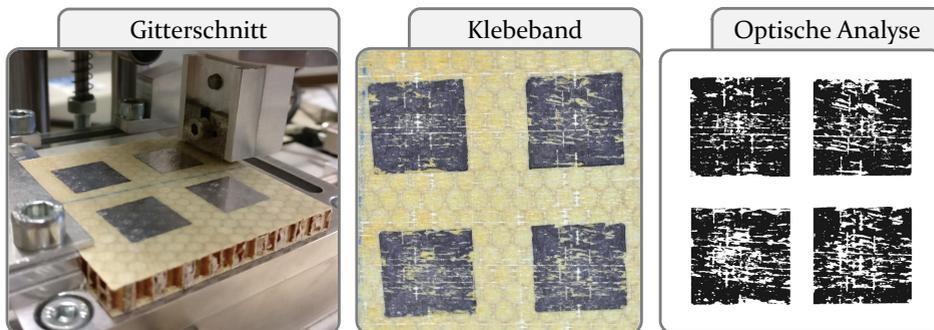


Bild 15: Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 und optische Analyse für funktionalisierte Sandwichkomponenten

Das Gitterschnittmesser wird dabei mit einer definierten Geschwindigkeit von 20 mm/s und einer definierten Kraft von 9.81 N über die flächig gedruckten Proben verfahren. Nach einem Auftrag- und Entfernenprozess des Klebebandes werden die Proben optisch analysiert (siehe Bild 15). Die Ergebnisse liegen im vorliegenden Fall in den Güteklassen drei und vier und können, unter anderem durch eine Plasmavorbehandlung, verbessert werden. [28, 31]

3.5 Anwendungen und Systemintegration

Der Einzug von gedruckter Elektronik im Bereich der Flugzeugkabine ist nicht nur an eine mögliche Substitution des Bordnetzes geknüpft, sondern auch an Lösungsstrategien für die Anbindung an bestehende Systeme gebunden und gewinnt durch zusätzliche Funktionen für neue Anwendungen an Bedeutung.

Anwendungen: Heizstrukturen, Sensorik und Antennen

In der zivilen Luftfahrt steht der Fahrgastkomfort zunehmend im Fokus und zusätzliche Angebote wie das Inflight Entertainment, die Beleuchtung und der Sitzkomfort spielen eine immer größer werdende Rolle, um sich von der Konkurrenz abzuheben. Ein Phänomen, das den Komfort für Passagiere mit einem Sitzplatz am Fenster einschränkt, ergibt sich aufgrund der niedrigen Außentemperatur während des Fluges und der damit verbundenen niedrigen Temperatur der Kabinenseitenwände.

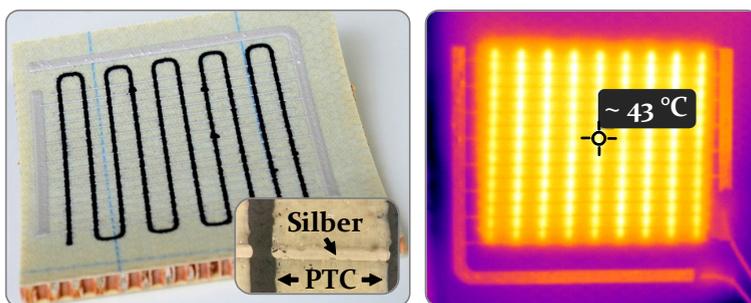


Bild 16: Sandwichbauteil mit gedruckter Heizstruktur, realisiert durch Silber- und PTC-Tinten; Realbild (links) und Wärmebild (rechts)

Um den thermischen Komfort zu erhöhen, besteht mit dem Einsatz digitaler Drucktechnologien die Möglichkeit Heizstrukturen, wie in Bild 16 dargestellt, direkt auf Verkleidungselemente zu applizieren. Hierfür wird

eine Kombination aus einer hochleitfähigen Silber- und einer kohlenstoffbasierten, resistiven PTC-Tinte (*Positive Temperature Coefficient*) verwendet, die mit einem inkjetbasierten System auf die bereits gepressten 2.5D-Sandwichbauteile aufgebracht wird. Die Heizleistung wird dabei durch die PTC-Tinten erbracht. Mit ansteigender Temperatur nimmt der Widerstand exponentiell zu. Das System erreicht seine maximale Temperatur, die im vorliegenden Beispiel bei 43 °C liegt und sich aus der Zusammensetzung der Tinte und dem Drucklayout ableitet. Das System ist somit intrinsisch geregelt und benötigt keine weiteren Steuerungseinheiten. [P6] Neben einer Erhöhung des Passagierkomforts ist ebenfalls eine Einsparung an Glaswolle in der Sekundärisolierung denkbar. Einerseits kann durch die Heizleistung bei einer frontseitigen Applikation ein Teil der Isolierung ersetzt werden, andererseits kann bei einer rückseitigen Applikation ein hoher Wirkungsgrad in der thermischen Isolation gewährleistet werden, da der thermische Einfluss einer Feuchtigkeitsaufnahme in der Glaswolle entgegenwirkt.

Des Weiteren ist auch eine Funktionserweiterung der Verkleidungselemente durch die Integration gedruckter Elektronik in Form von Sensoren und Antennen [P5] als auch die Einbindung diskreter Bauelemente und integrierter Schaltkreise möglich. Hierdurch können zum Beispiel Anwendungen wie kapazitive Sensoren als Bedienfeld umgesetzt werden. Darüber hinaus lassen sich auch komplexe Funktionen wie eine Zustandsüberwachung – inklusive Schadensdetektion und Positionierungsfehler der Verkleidungselemente – realisieren, um manuelle Montage- und Wartungsarbeiten zu reduzieren.

Funktions- und Systemintegration

Eine zentrale Herausforderung für die Implementierung gedruckter Elektronik in kommerzielle Produkte stellt die Einbindung elektronischer Bauelemente und die Anbindung an elektronische Systeme, in diesem Fall das Flugzeugbordnetz, dar. Hierfür wird neben der elektronischen Kontaktierung auch eine sichere und zuverlässige mechanische Befestigung der Komponenten und Steckverbindungen benötigt.

Ein möglicher Lösungsansatz ergibt sich aus einem kombinierten Einsatz von funktionalen und strukturellen Drucktechnologien. [P1, S1–S4] Mit einem additiven Fertigungsverfahren, wie unter anderem der FFF-Technologie (*Fused Filament Fabrication*), können Strukturen mit den Sandwichkomponenten formschlüssig verbunden werden. Hierfür werden die Kavi-

täten im Kernmaterial freigelegt, additiv hinterspritzt und die entstehenden Stützstrukturen flächig auf der Sandwichoberfläche zusammengefügt. [P7] Auf dieser Verankerung aufbauend können beliebige Strukturen wie beispielsweise Steckverbindungen [P8] gedruckt werden, die mittels funktionaler Drucktechnologien elektrisch kontaktiert werden können. [P1]

3.6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorteile, die eine Substituierung beziehungsweise partielle Substituierung des Bordnetzes im Bereich der Flugzeugkabine mit sich bringen, sind vielfältig. Von zentraler Bedeutung ist der steigende Automatisierungsgrad, der sich durch die Implementierung gedruckter Elektronik auf Verkleidungselementen ergibt. Manuelle Tätigkeiten, wie unter anderem Klebeprozesse von Abstandshaltern und das Anbringen sowie Bandagieren von Kabeln können so zukünftig vermieden werden. Zudem ergeben sich aus einer Substitution deutliche Gewichtseinsparungen, die in der Luft- und Raumfahrt stets mit einem erheblichen ökologischen und ökonomischen Vorteil verbunden sind. Die Entwicklung neuer Anwendungsfelder erhöht darüber hinaus den Nutzen gedruckter Elektronik in der Flugzeugkabine.

In einer gemeinsamen Kooperation verfolgen Airbus und Altran die Substitution von Kabeln in der Signal- und Leistungsvernetzung durch gedruckte Elektronik. Ihr Ansatz, der im Jahr 2018 vorgestellt wurde, basiert auf der Funktionalisierung flexibler Folien in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Die bedruckten Folien werden im Anschluss auf den Verkleidungselementen aufgebracht. [80] Die Kosten der gedruckten Elektronik sind dabei zwar geringer und die Produktionsgeschwindigkeit höher als die im vorgestellten 3D-Druckverfahren, allerdings ergibt sich ein zusätzlicher Prozessschritt durch das Aufbringen der Folie. Zudem gestaltet sich die Kontaktierung mit dem Bordnetz und eine Durchkontaktierung, d.h. der Verbindung von Seitenverkleidungsvorderseite und -rückseite als schwierig, weshalb Airbus inzwischen auch die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte, direkte Funktionalisierung der Substratmaterialien verfolgt. [81]

Der Einzug neuer Technologien in die Luftfahrt ist langwierig und bedarf der Erfüllung zahlreicher Anforderungen. Diese umfassen behördliche Bauvorschriften, wie unter anderem die CS-25 (*Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes*) der EASA (*Europäische Agentur für Flugsicherheit*) [82] als auch Empfehlungen renommierter Organisation wie der RTCA (*Radio Technical Commission for Aero-*

nautics). Letztere stellt in der RTCA DO-160 einen umfangreichen Anforderungskatalog für elektronische Komponenten zur Verfügung, der auf die Prüfung von Umwelteinflüssen ausgelegt ist und die folgenden Themenkomplexe beinhaltet: Temperatur, Flughöhe bzw. Luftdruck, Temperaturschwankungen, Luftfeuchtigkeit, Schock- und Crashesicherheit, Vibration, Explosionsschutz, Wasserdichtheit, Fluidempfindlichkeit, Sand und Staub, Pilzbefall, Salznebel, Magnetismus, Leistungsaufnahme, Spannungsspitzen, Audiofrequenz-Anfälligkeit, induzierte Signalanfälligkeit, Radiofrequenz-Anfälligkeit, Radiofrequenzemission, Blitzschlag, Vereisung, elektrostatische Entladung und Entflammbarkeit. [83, S5]

Es ist ersichtlich, dass Aussagen über eine mögliche Markteinführung im Hinblick auf die Vielzahl an Anforderungen zu diesem frühen Zeitpunkt schwierig sind. Allerdings kann gezeigt werden, dass die Möglichkeit zur Funktionalisierung von Verkleidungselementen besteht und dabei nicht der Herstellungsprozess modifiziert, sondern lediglich erweitert werden muss. Die Leitfähigkeit bewegt sich dabei mit einem Viertel der von metallischem Silber bereits in der richtigen Größenordnung, kann jedoch weiter verbessert werden – unter anderem durch eine Optimierung der Sinterstrategie.

Die vorliegende Arbeit zielt jedoch auf eine allgemeinere Themenstellung im Bereich der gedruckten Elektronik ab, die sich aus der aufgezeigten Anwendung abstrahieren lässt und den technologischen Handlungsbedarf aus Kapitel 2.4 komplettiert. Im Vergleich zu klassischen Substratmaterialien wie Glas und Polymeren, die eine vergleichsweise hohe Oberflächengüte aufweisen, stellen Faserverbundwerkstoffe in Sandwichbauweise für die gedruckte Elektronik technische Oberflächen mit verhältnismäßig niedriger Güte dar. Eine umfangreiche Datenanalyse, die bislang im Bereich der gedruckten Elektronik noch nicht in einem angemessenen Umfang vorliegt, gewinnt dabei zusätzlich an Bedeutung, da zu den Prozessschwankungen bei aerosolbasierten Drucktechnologien auch Variationen in der Güte technischer Oberflächen hinzukommen.

4 Theoretische Grundlagen und Methodik zur Charakterisierung von Oberflächen und gedruckten Leiterbahnen

Ein entscheidender Beitrag zur Etablierung digitaler Druckprozesse ist die Entwicklung einer universellen Methodik, die nicht nur die Charakterisierung der verwendeten Substratmaterialien sowie der Druckqualität der applizierten Leiterbahnen adressiert, sondern auch deren wechselseitige Abhängigkeiten berücksichtigt. Dahingehend wird zu Beginn in Abschnitt 4.1 die Methodik zur Charakterisierung von Substratmaterialien für aerosolbasierte Drucktechnologien vorgestellt. Dabei werden die Grundlagen der Benetzungstheorie mit einer aus der Signaltheorie stammenden Methode zur Quantifizierung der Oberflächentopographie kombiniert. In Abschnitt 4.2 wird das verwendete Vorgehen zur Bewertung der Druckqualität beschrieben.

4.1 Methodik zur Charakterisierung von Substratoberflächen für aerosolbasierte Drucktechnologien

Dieser Abschnitt behandelt die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Charakterisierung von Substratmaterialien am Beispiel der in der Luftfahrt eingesetzten Verbundwerkstoffe. Hierbei sind, wie bereits in Bild 4 aufgezeigt, zwei zentrale Kriterien für die Druckqualität von entscheidender Bedeutung: die Oberflächentopographie von Substratmaterialien sowie die Oberflächenwechselwirkung der Substrate mit den zum Einsatz kommenden funktionalen Tinten. Mit Hilfe der Grundlagen zur Benetzungstheorie in Abschnitt 4.1.1 werden in Abschnitt 4.1.2 die entstehenden Oberflächenwechselwirkungen dargestellt und die Berechnung der Oberflächenenergie der Substratmaterialien abgeleitet. Für die Charakterisierung der Oberflächentopographie werden in Abschnitt 4.1.3 genormte, diskrete Kennzahlen und in Abschnitt 4.1.4 die frequenz- beziehungsweise wellenzahlabhängige spektrale Leistungsdichte eingeführt. Eine Zusammenführung der Parameter in einem kombinierten Verfahren wird in Abschnitt 4.1.5 beschrieben und komplettiert das Kapitel.

4.1.1 Benetzung: Kontaktwinkel und Oberflächenenergie

Die freie Oberflächenenergie von Festkörpern kann nicht direkt ermittelt werden. [84] Für ihre Bestimmung kommt die Kontaktwinkelmessung eines liegenden Tropfens (*sessile drop*) einer Flüssigkeit zum Einsatz, bei der der Kontaktwinkel durch die flüssig-feste Phase zwischen Tropfen und Substrat und die flüssig-gasförmige Phase zwischen Tropfen und umgebender Atmosphäre definiert wird. Die Form des Tropfens ist hierbei abhängig von drei Kenngrößen: der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, der freien Oberflächenenergie des Substrats sowie der Grenzflächenspannung zwischen flüssiger und fester Phase. Im Vergleich zu festen Materialien kann die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten direkt mit dem Verfahren des hängenden Tropfens (*pendant drop*) bestimmt werden. [85]



Bild 17: Flüssigkeitstropfen auf einem Verbundwerkstoff mit idealer Oberfläche, dargestellt mit intermolekularen Kräften, den Oberflächenspannungen nach Young und dem resultierenden Kontaktwinkel

Die erste Aufzeichnung zu Kontaktwinkeln einer Flüssigkeit auf idealen Oberflächen stammt bereits aus dem Jahr 1805 und wurde von Thomas Young beschrieben. [86] Der Kontaktwinkel ist dabei als Gleichgewichtszustand im Dreiphasensystem zwischen Festkörper, Flüssigkeit und Gasphase definiert. Die Beziehung zwischen fester und gasförmiger Phase γ_S , fester und flüssiger Phase γ_{SL} und flüssiger und gasförmiger Phase γ_L sowie dem resultierenden Kontaktwinkel θ ist in der Gleichung nach Young gegeben: [85, 87]

$$\gamma_S - \gamma_{SL} = \gamma_L \cdot \cos \theta \quad (4.1)$$

In Bild 17 sind die intermolekularen Kräfte in einem Flüssigkeitstropfen auf einer idealen Oberfläche sowie die Beziehung der von Young beschriebenen Parameter dargestellt. Betrachtet man isoliert eine reine Flüssigkeit, so wirken auf jedes Molekül innerhalb der Flüssigkeit gleichmäßig Kräfte in alle Richtungen. Die Moleküle an der Oberfläche erfahren dagegen eine nach innen gerichtete, resultierende Kraft. Dies führt zu einer minimalen

Grenzfläche. Die freie Oberflächenenergie γ_S wirkt dabei radial auf die Flüssigkeit, um die Grenzschichtfläche zwischen fester und flüssiger Phase zu erhöhen. Dem steht sowohl die Grenzflächenspannung γ_{SL} zwischen Flüssigkeit und Festkörper als auch die Oberflächenspannung γ_L der Flüssigkeit mit dem Kosinusanteil des Kontaktwinkels θ gegenüber. [85]

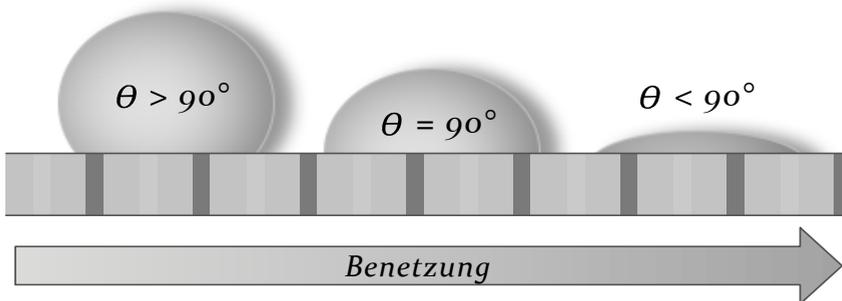


Bild 18: Statischer Kontaktwinkel im Gleichgewichtszustand; Ausprägung in Abhängigkeit der Benetzungsfähigkeit der Substratoberfläche

Bild 18 zeigt den statischen Kontaktwinkel in Abhängigkeit des Benetzungsverhaltens. Die Benetzung nimmt mit abnehmendem Kontaktwinkel zu, je kleiner der Kontaktwinkel θ desto besser die Benetzung. Eine komplette Benetzung stellt sich für einen Kontaktwinkel von $\theta = 0^\circ$ ein. [51, 85, 87]

4.1.2 Messmethodik für die Oberflächenwechselwirkung

Für die Funktionalisierung mittels digitaler Drucktechnologien ist ein gutes Benetzungsverhalten mit Kontaktwinkeln kleiner 15° anzustreben. [88] Das Zusammenspiel von Oberflächenspannung, Grenzflächenspannung und freier Oberflächenenergie ist somit auch für die Druckqualität aerosolbasierter Druckprozesse von zentraler Bedeutung.

Bild 19 gibt eine schematische Übersicht über mögliche Ausprägungen der Leiterbahn. Für den ersten Fall (a) bilden sich Tintentropfen auf der Substratoberfläche und es kommt zu einer diskontinuierlichen, nichtleitfähigen Bahn. Für den dritten Fall (c) hat die gedruckte Leiterbahn eine undefinierte Kontur. Der zweite Fall (b) zeigt eine kontinuierliche Leiterbahn mit einer definierten Kontur. Nach Zisman [89] sind diese Fälle ausschließlich von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit γ_L und der freien Oberflächenenergie des Substrats γ_S abhängig, wobei für (a) die Oberflächen-

spannung der Flüssigkeit größer, für (b) gleich und für (c) kleiner der Oberflächenenergie des Substrats angenommen wird. [87] Eine derartige Aussage auf Basis der Oberflächenspannung und der freien Oberflächenenergie vernachlässigt jedoch die Unterscheidung in polare und disperse Komponenten und trifft lediglich für unpolare Systeme zu. [51]

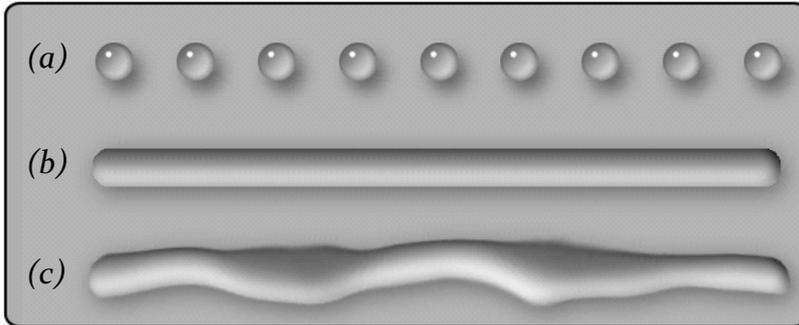


Bild 19: Mögliche Szenarien der Druckqualität in Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften abgeleitet aus der Kombination von Tinte und Substrat

Generell sollte für alle Systeme stets eine Tinte mit einer Oberflächenspannung kleiner oder gleich der freien Oberflächenenergie des Substrats gewählt werden. [90, 91]

Methoden nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble

Für die Bestimmung der beiden unbekanntnen Kenngrößen der Young-Gleichung - Grenzflächenspannung und freie Oberflächenenergie - stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung. [87] Im Vergleich zur Methode nach Zisman beruht die OWRK-Methode nach Owens, Wendt, [92] Rabel [93] und Kaelble [94] zwar ebenfalls auf der Messung von Kontaktwinkeln, beinhaltet aber zusätzlich die Aufteilung der Oberflächenspannung in polare und disperse Anteile: [51, 95]

$$\gamma = \gamma^D + \gamma^P \quad (4.2)$$

Disperse Wechselwirkungen beruhen auf den Van-der-Waals-Kräften, die das Ergebnis schwankender Ladungsverteilungen über die Zeit sind. Polare Wechselwirkungen entstehen durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen und Lewis-Säure-Base-Wechselwirkungen. [87]

Die entstehende Adhäsionsarbeit zwischen Festkörper und Flüssigkeit ist dabei definiert als: [51, 95]

$$W_A = \gamma_L \cdot (1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_S^D \gamma_L^D} + \sqrt{\gamma_S^P \gamma_L^P} \right) \quad (4.3)$$

Hieraus kann die Grenzflächenspannung berechnet werden: [51]

$$\gamma_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - 2 \left(\sqrt{\gamma_S^D \gamma_L^D} + \sqrt{\gamma_S^P \gamma_L^P} \right) \quad (4.4)$$

Das bedeutet, dass eine optimale Druckqualität mit guter Benetzung und hohen Adhäsionskräften erreicht wird, wenn die Oberflächenspannung und die freie Oberflächenenergie nicht nur auf dem gleichen Niveau sind, sondern wenn zusätzlich ihre dispersen und polaren Komponenten ähnliche Verhältnisse aufweisen. [51, 87]

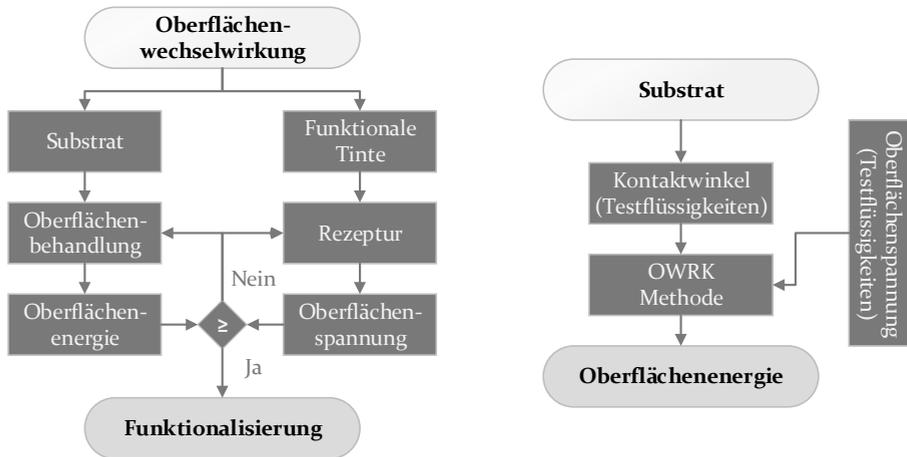


Bild 20: Ablaufdiagramm zur Charakterisierung und Anpassung der Oberflächenwechselwirkung von Substrat und Tinte (links), Berechnung der Oberflächenenergie von Substraten mit der OWRK-Methode (rechts)

Die Berechnung der freien Oberflächenenergie wird mit der etablierten OWRK-Methode durchgeführt. Mit ihr kann für das Substratmaterial nicht nur die freie Oberflächenenergie, sondern auch deren disperse und polare Komponente berechnet werden. Hierfür ist die Messung des Kontaktwinkels von mindestens zwei Flüssigkeiten mit bekannten dispersen und polaren Anteilen notwendig, bei denen mindestens eine einen polaren

Anteil größer Null besitzen muss. Die OWRK-Geradengleichung nimmt die Form $y = ax + b$ an: [87, 92–94]

$$\frac{\gamma_L \cdot (1 + \cos \theta)}{2 \sqrt{\gamma_L^D}} = \sqrt{\gamma_S^P} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_L^P}{\gamma_L^D}} + \sqrt{\gamma_S^D} \quad (4.5)$$

Für die in diesem Abschnitt abgeleitete Methode zur Charakterisierung des Substratmaterials auf Basis der Oberflächenwechselwirkungen ergibt sich das Vorgehen aus Bild 20. Für alle Substrate, die mittels digitaler Drucktechnologien funktionalisiert werden, ist es entscheidend die freie Oberflächenenergie sowie deren dispersen und polaren Anteil zu bestimmen. Basierend auf den ermittelten Ergebnissen müssen die Substrate und Tinten aufeinander abgestimmt werden. Sowohl die Rezeptur der Tinten als auch die Vorbehandlungsstrategien der Substrate können, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, entsprechend gewählt werden, um die absoluten Werte und das relative Verhältnis disperser und polarer Anteile von Substrat und Tinte für eine optimale Benetzung anzupassen.

Ideale und reale Oberflächen

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Benetzung für ideale Oberflächen beschrieben wurde und sich neben den chemischen Eigenschaften auch die Rauheit und die Porosität realer Oberflächen auf den Kontaktwinkel und die Benetzungsfähigkeit auswirken. [91, 96–98]

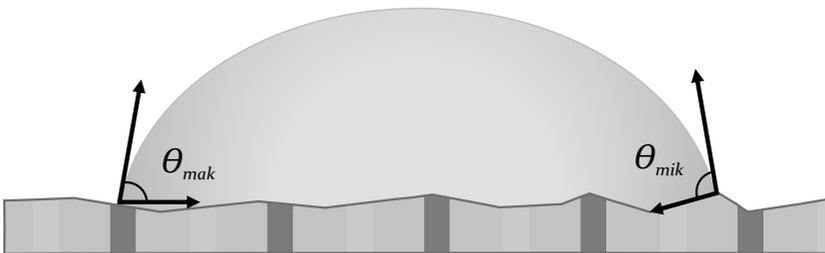


Bild 21: Gegenüberstellung des makroskopischen Kontaktwinkels θ_{mak} und des mikroskopischen Kontaktwinkels θ_{mik} realer Oberflächen

Bild 21 zeigt die entstehenden Kontaktwinkel auf einer realen Oberfläche. Hierfür ergeben sich entlang der Grenzfläche lokale, nichtmessbare mikroskopische Kontaktwinkel θ_{mik} , die teilweise stark vom messbaren makroskopischen Kontaktwinkel θ_{mak} abweichen können. [97, 99] Für raue Oberflächen können in Abhängigkeit der Benetzung weiterführende

Verfahren angewendet werden. Oberflächen mit einer homogenen, d.h. vollständigen Benetzung werden von Wenzel [100] beschrieben. Für Oberflächen mit einer heterogenen Benetzung, bei denen Luftkavitäten zwischen Festkörper und Flüssigkeiten vorliegen, finden die Zusammenhänge von Cassie und Baxter [101] Anwendung.

Die Messung der Kontaktwinkel und die abgeleiteten Ergebnisse zur Oberflächenenergie werden für die verwendeten Faserverbundwerkstoffe in Kapitel 5.1.1 detailliert beschrieben. Dabei wird allerdings nicht der Einfluss einer variierenden Oberflächentopographie auf die Oberflächenwechselwirkung untersucht. Im Zuge dieser Arbeit werden die Charakterisierung sowie die Optimierung der Benetzungseigenschaften und die Analyse der Substratrauhigkeit sowie deren Auswirkung auf die Leiterbahnqualität separat betrachtet.

4.1.3 Oberflächenprofil: Form, Welligkeit und Rauheit

Natürliche bzw. technische Oberflächen besitzen eine Gestaltabweichung von der idealen Oberfläche, die auch unter dem Begriff der Oberflächentopographie zusammengefasst werden kann. [102–104] Die Gesamtheit dieser Abweichungen von der Istoberfläche gegenüber der geometrischen Oberfläche können nach DIN 4760 in ein Ordnungssystem mit sechs Gruppen eingeteilt werden, welches in Bild 22 schematisch dargestellt ist. [103–107]



Bild 22: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen in Anlehnung an [104]

Die erste Ordnung beschreibt dabei die Formabweichung, die zweite Ordnung die Welligkeit. In den Abweichungen der dritten bis fünften Ordnung wird die Rauheit in unterschiedlichen Ausprägungen (Rillen, Riefen, Gefügestrukturen) aufgeführt. Die Abweichung der sechsten Ordnung betrifft den Gitteraufbau des Werkstoffes und wird in der Regel nicht erfasst. [104–106]

Die Charakterisierung der Oberfläche kann taktil oder optisch als 1D- oder 2D-Höhenprofil erfolgen. Dabei wird zunächst ein Gesamtprofil erstellt, das anhand von drei Profiltern in vier Bereiche unterschiedlicher

Wellenlängen aufgeteilt werden kann. In Bild 23 ist diese Einteilung schematisch dargestellt. Aus dem Gesamtprofil wird das Primärprofil (P-Profil) durch den λ_s -Profilfilter von einem messspezifischen hochfrequenten Rauschen getrennt. Der λ_f -Profilfilter stellt den Übergang zwischen Formprofil (F-Profil) und Welligkeitsprofil (W-Profil) dar. Die Grenzwellenlänge λ_c trennt schließlich das Welligkeitsprofil vom Rauheitsprofil (R-Profil). Die Beschreibung bezieht sich hierbei auf 1D-Höhenprofile. Für 2D-Höhenprofile ist analog der S-Filter für λ_s , der L-Filter für λ_c und der F-Operator für λ_f definiert. [108–110]

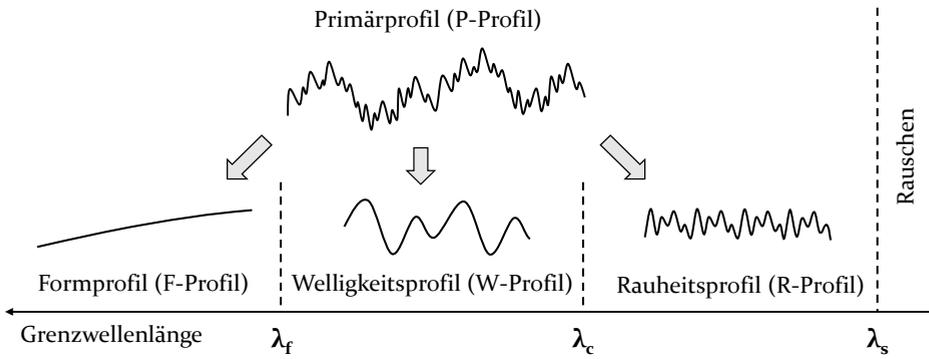


Bild 23: Schematische Darstellung der Aufteilung des gemessenen Oberflächenprofils in Primär-, Form-, Welligkeits- und Rauheitsprofil in Anlehnung an [109, 110]

Für Oberflächen stehen nach DIN EN ISO 4287 für Linienprofile sowie nach der Normenreihe DIN EN ISO 25178 für flächenhafte Oberflächenbeschaffenheit eine Vielzahl an Kenngrößen zur Verfügung. [109–111] Für ein Rauheitsprofil $h(x)$ berechnet sich die Amplitudenkenngröße R_a , der sogenannte arithmetische Mittenrauwert, für N diskrete Höhenwerte h_i als normierte Summe der Beträge der Abweichungen vom Mittelwert \bar{h} des Rauheitsprofils: [109]

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|h_i - \bar{h}|) \quad (4.6)$$

Eine weitere etablierte Kenngröße für den quantitativen Vergleich unterschiedlicher Rauheitsprofile ist die Varianz σ^2 oder die Standardabweichung σ . Der quadratische Mittenrauwert R_q – bzw. die Standardabweichung σ_{RMS} (RMS, *Root Mean Square*) – errechnet sich dabei aus der Sum-

me der quadratischen Abweichungen vom Mittelwert, der im Vergleich zum R_a -Wert empfindlicher auf Riefen und Spitzen reagiert: [109, 111]

$$R_q = \sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (4.7)$$

Für ein zweidimensionales Höhenprofil $h(x, y)$ einer Oberfläche A mit N diskreten Werten in x -Richtung und M diskreten Werten in y -Richtung ergeben sich analog für die S -Parameter die Formeln [110]

$$S_a = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (|h_{ij} - \bar{h}|) \quad (4.8)$$

und

$$S_q = \sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (h_{ij} - \bar{h})^2}. \quad (4.9)$$

Die Beschreibung eines gesamten Profils durch eine einzige Kennzahl stellt allerdings eine starke Vereinfachung [111] dar und ist nicht ausreichend für eine umfassende Charakterisierung der Rauigkeit. Weder Informationen über laterale Strukturen, d.h. Strukturen in der Ebene, noch über Periodizitäten der Oberfläche können daraus abgeleitet werden. In einer Studie von Panda et al. wird eine umfangreiche Untersuchung zur Grenzwellenlänge λ_c durchgeführt und ein signifikanter Einfluss auf die diskrete Oberflächenkenngröße σ_{RMS} nachgewiesen. [112]

Es lassen sich somit effektiv nur gleichartige Oberflächen relativ miteinander vergleichen. Zudem können Aussagen über Transport- bzw. Glättungsprozesse auf Oberflächen, die im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 4.2 und Kapitel 5.2 betrachtet werden, um detaillierte Erkenntnisse über aerosolbasierte Druckprozesse zu erhalten, nicht getroffen werden.

4.1.4 Spektrale Leistungsdichte (PSD)

Für die Erfassung lateraler Strukturen wird die spektrale Leistungsdichte (PSD, *Power Spectral Density*), die die Rauigkeitskomponenten nach der Wellenzahl q [μm^{-1}] bzw. der Ortsfrequenz $f = q/2\pi$ [μm^{-1}] aufschlüsselt, gewählt. Die Berechnung der spektralen Leistungsdichte ist in einem internationalen SEMI-Standard beschrieben [113] und lässt sich für den eindimensionalen Fall, d.h. für $PSD^{1D}(q)$ [μm^3], in Anlehnung an [96] wie folgt berechnen:

$$PSD^{1D}(q) = \frac{2\pi}{L} |\tilde{h}(q)|^2 \quad (4.10)$$

Dabei ist q die Wellenzahl, L die Messstrecke und $\tilde{h}(q)$ die Fourier-Transformierte von $h(x)$:

$$\tilde{h}(q) = \frac{1}{2\pi} \int_L h(x) e^{-iqx} dx \quad (4.11)$$

Einen direkten Zusammenhang zwischen der Betrachtung des Frequenzraums in Form der PSD-Kurve und des Ortsraums in Form des Höhenprofils stellt der quadratische Mittenrauwert σ_{RMS} [μm] dar. Dessen Quadrierung, die Varianz σ_{RMS}^2 [μm^2], entspricht der Fläche unter der PSD-Kurve und errechnet sich durch die Integration über alle q -Werte:

$$\sigma_{RMS}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} PSD^{1D}(q) dq \quad (4.12)$$

Aus Symmetriegründen werden in der Praxis allerdings nur positive q -Werte betrachtet. Die Integrationsgrenzen sowie der Vorfaktor werden dementsprechend angepasst:

$$\sigma_{RMS}^2 = 2 \int_0^{+\infty} PSD^{1D}(q) dq \quad (4.13)$$

Für die Datenanalyse im Fourier-Raum ist zu beachten, dass der interpretierbare Wellenzahlbereich von der Größe des Messbereichs L und dem Pixelabstand a abhängt. Experimentell kann somit eine PSD-Kurve nicht

im gesamten Bereich $[0; \infty]$ sondern nur innerhalb eines definierten Wellenzahlbandes $[q_{min} = 2\pi/L; q_{max} = 2\pi/2a]$ berechnet werden. Das Maximum q_{max} wird dabei durch das Nyquist-Kriterium festgelegt. [96, 112–114] Für die Varianz ergibt sich daraus:

$$\sigma_{RMS}^2(q_{min}, q_{max}) = 2 \int_{q_{min}}^{q_{max}} PSD^{1D}(q) dq \quad (4.14)$$

Eine weitere Einschränkung der Integrationsgrenzen bei der PSD-Analyse zur gezielten Evaluierung der Varianz bzw. Standardabweichung in einem definierten Wellenzahlbereich ist möglich. [112] Hiermit lässt sich ein direkter Vergleich zu den bereits beschriebenen Gestaltabweichungen nach DIN 4760 herstellen, die eine Einteilung in Form-, Welligkeits- und Rauheitsprofile anhand entsprechender Hoch- und Tiefpassfilter vornehmen. Der Wellenzahlbereich $[q_{min}; q_{max}]$ zur Bestimmung der einzelnen Profile kann dabei analog zu den Grenzwellenlängen gewählt werden:

$$q_f = 2\pi/\lambda_f \quad q_c = 2\pi/\lambda_c \quad q_s = 2\pi/\lambda_s \quad (4.15)$$

In Bild 24 ist die eindimensionale spektrale Leistungsdichte schematisch dargestellt. Der Verlauf einer PSD^{1D} -Kurve kann hierbei mit dem sogenannten ABC-Modell beschrieben werden und lässt sich durch drei Parameter charakterisieren: [113] den Wert $PSD(0)$ im Bereich niedriger Wellenzahlen, die Korrelationswellenzahl q_k , die den Übergang in den hochfrequenten Bereich markiert und den Rauigkeitsexponent α , der die negative Steigung im Bereich hoher Wellenzahlen beschreibt. [115, 116] Die Korrelationswellenzahl q_k trennt dabei innerhalb der PSD-Kurve zwei Wellenzahlbereiche, die ein unterschiedliches Verhalten aufweisen: Bereiche, die lateral weit voneinander entfernt liegen, d.h. niedrige Wellenzahlen besitzen, sind unkorreliert und statistisch voneinander unabhängig. Dies führt zu einem waagrechten Verlauf für den Grenzwert $q \rightarrow 0$ und einem Wert $PSD(0)$. [115–117]

Im Ortsraum nah beieinanderliegende Bereiche, die im Frequenzraum hohe Wellenzahlen haben, zeigen hingegen ein korreliertes Verhalten und eine Abhängigkeit $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit negativer Steigung α . Man spricht hierbei von selbstaffinen Strukturen, die bei einer Skalierung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung statistisch identische Eigenschaften besitzen. [102, 115, 117]

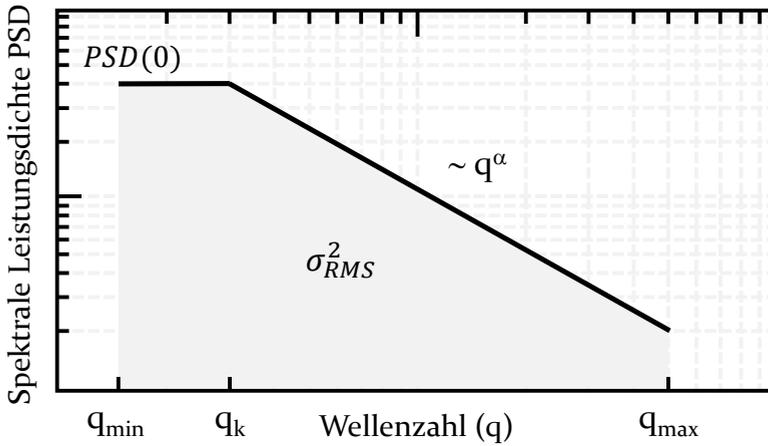


Bild 24: Schematische Darstellung einer eindimensionalen PSD-Kurve mit der Korrelationswellenzahl q_k , der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit dem negativen Rauigkeitsexponenten α und der Varianz σ_{RMS}^2 in Anlehnung an [116]

Für reale Höhenprofile nimmt die spektrale Leistungsdichte $PSD(q)$ über die Wellenzahl ab und zeigt einen linearen Abfall im doppellogarithmischen Maßstab. [96, 117, 118] Bei Wellenzahlen größer q_s bzw. Wellenlängen kleiner λ_s weicht die Kurve aufgrund des Rauschens von diesem Verlauf ab und ist von der Analyse auszuschließen. [97, 98, 118] Der Formeinfluss wird üblicherweise vor Berechnung der PSDs durch ein entsprechendes Levelling der Höhenprofile eliminiert. [113, 118, 119]

Die eindimensionale PSD^{1D} wird für die Analyse von Linienscans verwendet. [112] Eine umfassendere Charakterisierung der Oberflächentopographie erfolgt mit Komponenten in x - und y -Richtung. [96, 118] Der Verlauf der zweidimensionalen spektralen Leistungsdichte PSD^{2D} [μm^4] entspricht dabei der der eindimensionalen PSD^{1D} aus Bild 24 und lässt sich analog zu dieser berechnen:

$$PSD^{2D}(q_x, q_y) = \frac{(2\pi)^2}{A} |\tilde{h}(q_x, q_y)|^2 \quad (4.16)$$

Dabei sind q_x und q_y die Wellenzahlen in x - und y -Richtung, A die zu messende Fläche und $\tilde{h}(q_x, q_y)$ die Fourier-Transformierte von $h(x, y)$:

$$\tilde{h}(q_x, q_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_A h(x, y) e^{-i(q_x x + q_y y)} dx dy \quad (4.17)$$

Die Varianz σ_{RMS}^2 ist das Integral der PSD-Kurve über alle q_x - und q_y -Werte:

$$\sigma_{RMS}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} PSD^{2D}(q_x, q_y) dq_x dq_y \quad (4.18)$$

Für Oberflächen mit einer isotropen, d.h. richtungsunabhängigen Rauheitscharakteristik, können die Koordinaten (q_x, q_y) in die Polarkoordinaten (q, θ) umgerechnet und über θ integriert werden. Im Gegensatz zu der zuvor beschriebenen Varianz σ_{RMS}^2 der eindimensionalen PSD^{1D} , muss deshalb im zweidimensionalen Fall bei der Berechnung des Integrals die PSD^{2D} zusätzlich mit der jeweiligen Wellenzahl q gewichtet werden: [118]

$$\sigma_{RMS}^2 = 2\pi \int_0^{+\infty} PSD^{2D}(q) q dq \quad (4.19)$$

Analog zur eindimensionalen PSD^{1D} kann die zweidimensionale PSD^{2D} in der Realität auch nur innerhalb eines Wellenzahlbandes $[q_{min}; q_{max}]$ berechnet werden:

$$\sigma_{RMS}^2(q_{min}, q_{max}) = 2\pi \int_{q_{min}}^{q_{max}} PSD^{2D}(q) q dq \quad (4.20)$$

In der Literatur liegen unterschiedliche Normierungskonstanten für die Fourier-Transformation vor, die sich für n -dimensionale PSDs um den Faktor $(2\pi)^n$ unterscheiden können. [96, 118] Dies wirkt sich zwar auf die absolute Skala der spektralen Leistungsdichte aus, hat allerdings keinen Einfluss auf deren Kurvenverlauf. Für die Berechnung der Varianz σ_{RMS}^2 geht dieser Faktor entsprechend ein und erfüllt das Parsevalsche Theorem, nach dem die Varianz im Frequenzraum mit der im Ortsraum übereinstimmen muss. [114, 118]

Für die Berechnung der PSDs ist zudem zu berücksichtigen, dass die Grenzen endlicher Messfelder zu einer fehlerhaften Fourier-Transformation führen. Aus diesem Grund ist die Verwendung einer Window-Funktion unerlässlich. Diese lässt das Höhenprofil an den Rändern des Messfensters gegen Null gehen. Im Fourier-Raum wirkt sich dies wie ein Tiefpass-Filter aus, bei dem die hochfrequenten Komponenten, die durch die Ränder des

Messfensters erzeugt werden, entfernt werden. Bei den Analysen in dieser Arbeit wird das Welch-Window verwendet. [119] Die Berechnung der PSDs erfolgt nach Persson [96] und wird mittels FFT (*Fast Fourier Transform*) in Matlab umgesetzt.

4.1.5 Messmethodik für die Oberflächentopographie

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Grundlagen zur Oberflächenanalyse wird nachfolgend die in dieser Arbeit verwendete Methodik zur Charakterisierung der Oberflächentopographie abgeleitet. Die Erfassung der Oberflächenstruktur erfolgt sowohl unter Verwendung eines taktilen als auch eines optischen Messgeräts.

Taktile Messung

Die taktile Messung der Oberflächentopographie erfolgt durch ein eindimensionales Tastschnittverfahren. Dabei wird das Oberflächenprofil mit einer Diamanttastspitze aufgezeichnet. Tastnadel und Substratebene werden hierbei relativ zueinander verfahren. Vertikale Auslenkungen der Nadel werden induktiv erfasst, verstärkt und für nachfolgende Berechnungen zur Verfügung gestellt. [103, 108, 120]

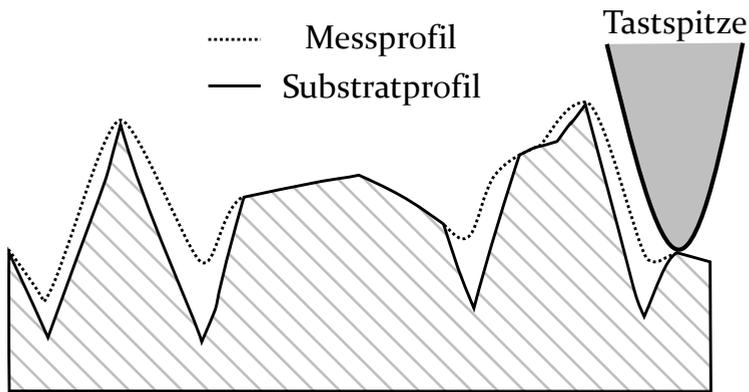


Bild 25: Verfälschung des realen Profils im Zuge einer taktilen Messung bedingt durch die endliche Abmessung der Tastspitze in Anlehnung an [102, 103]

Es ist zu berücksichtigen, dass das ertastete Messprofil nicht exakt mit dem realen Substratprofil übereinstimmt (Bild 25). Dies lässt sich damit begründen, dass die Tastspitze nicht einem idealen mathematischen Punkt entspricht, sondern endliche Abmessungen besitzt. Die Darstellung von Profilsitzen und -tälern wird hierdurch verzerrt. [102, 103, 108]

Optische Messung

Die optische Messung der Oberflächentopographie erfolgt durch ein konfokales Laserscannmikroskop (*confocal laser scanning microscope*). Dabei wird ein Laserstrahl auf die Probenoberfläche fokussiert und die reflektierte Strahlung durch ein Objektiv gesammelt. Durch eine konfokale Blende wird selektiv Licht aus der Fokusebene detektiert. In einem Scanverfahren werden die einzelnen Bildpunkte einer Fokusebene zu einem Rasterbild zusammengefasst. Dieser Prozess wird iterativ für alle betrachteten Höhenpositionen durchgeführt. Für jeden Punkt entspricht die Höhenposition mit der größten Intensität dem Fokus. Hieraus kann das 2D-Höhenprofil abgeleitet werden. Als Lichtquelle kommt beim verwendeten Keyence VK-9700 ein violetter Laser mit der Wellenlänge 408 nm zum Einsatz. [121–123]

Messmethodik

Die entwickelte Messmethodik in Bild 26 basiert auf der Messung eines taktilen, linearen 1D-Höhenprofils und zweier optischer, flächiger 2D-Höhenprofile mit Objektiven mit 20-facher (20x) und 50-facher (50x) Vergrößerung. In einem ersten Schritt werden die eindimensionalen diskreten Kenngrößen [108] aus dem taktilen Höhenprofil berechnet. Für die mittels optischer Verfahren bestimmten Höhenprofile ist vor der Berechnung der zweidimensionalen diskreten Kenngrößen [110] eine Trendbereinigung notwendig. Hierbei werden Formabweichungen mit Polynomen n -ter Ordnung aus dem Gesamtprofil gefiltert. [113]

Die taktile Messung dient neben der schnellen Charakterisierung der Probenoberfläche auch zur Konsistenzprüfung der optischen Messergebnisse. Aufgrund der zerstörenden Eigenschaften taktiler Verfahren und der begrenzten Aussagekraft der 1D-Höhenprofile liegt der Fokus allerdings auf dem optischen Messverfahren und einer umfangreichen Analyse der daraus gewonnenen 2D-Höhenprofile. Die einzelnen Schritte werden zunächst kurz umrissen und im Anschluss im Detail beschrieben.

Aus dem 2D-Höhenprofil kann die zuvor beschriebene spektrale Leistungsdichte PSD^{2D} berechnet werden. Jedes Substrat wird vorliegend anhand von 25 Aufnahmen mit dem 50x-Objektiv und von 625 Aufnahmen mit dem 20x-Objektiv charakterisiert. Auf die sich daraus ergebenden individuellen PSD_i^{2D} wird ein 90/10 Filter angewendet, d.h. jeweils zehn Prozent der PSD-Kurven mit den größten und kleinsten RMS-Werten werden entfernt. Im Anschluss wird der geometrische Mittelwert der individuellen PSDs für

beide Objektiv berechnet. An dieser Stelle ist zu prüfen, ob der quadratische Mittenrauwert im Frequenzraum σ_{RMS}^q mit dem im Ortsraum σ_{RMS}^h übereinstimmt und das Parsevalsche Theorem erfüllt ist. Zuletzt wird die sogenannte Master-PSD berechnet, die die Frequenzbereiche der beiden Objektiv vereint und eine umfassende Charakterisierung der Substrate ermöglicht.

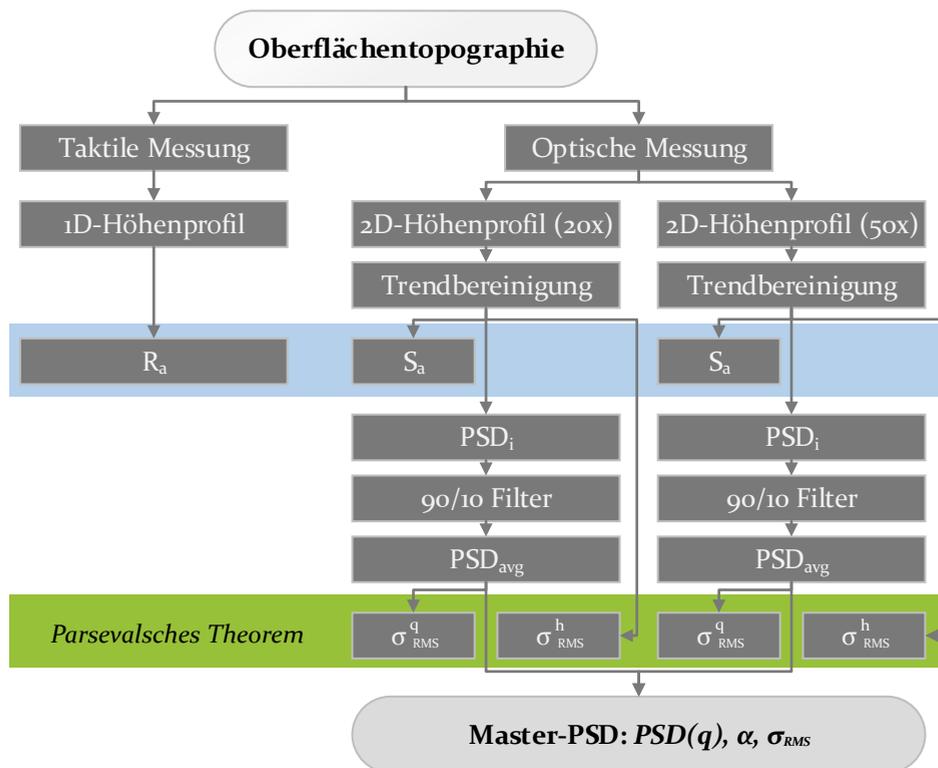


Bild 26: Entwickelte Methodik zur Charakterisierung der Oberflächentopographie

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte ausgehend von einem trendbereinigten 2D-Höhenprofil hin zur Master-PSD ausführlich behandelt.

Spektrale Leistungsdichte von Einzelaufnahmen - PSD_i

In Bild 27 ist ein Beispiel der 25 individuellen PSD_i^{2D} , die für die optische Charakterisierung mit einem 50x-Objektiv verwendet werden, gezeigt. Die Mikroskopbilder haben eine Auflösung von 1024 x 768 Pixel mit einem Pixelabstand a von 0.279 μm . [122, 123] Es ergibt sich somit für die PSD-Analyse ein Wellenzahlbereich von etwa 0.02 μm^{-1} – 15 μm^{-1} .

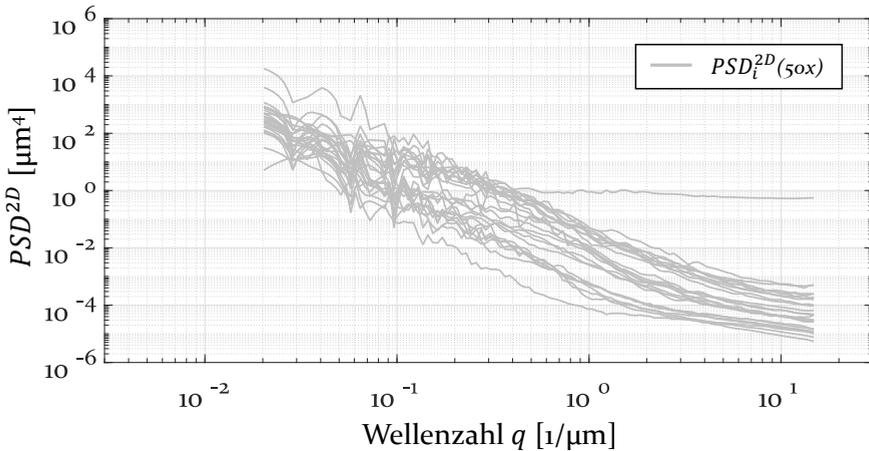


Bild 27: Spektrale Leistungsdichte von 25 Einzelaufnahmen mit 50x-Objektiv

Um einen größeren Wellenzahlbereich abdecken zu können, wurden parallel zu den optischen Messungen mit dem 50x-Objektiv auch Messungen mit dem 20x-Objektiv durchgeführt (Bild 28). Bei gleicher Bildauflösung und einem Pixelabstand von $0.686 \mu\text{m}$ ergibt sich für die PSD-Analyse ein Wellenzahlbereich von $0.007 \mu\text{m}^{-1} - 6 \mu\text{m}^{-1}$. Für das 20x-Objektiv wurden 625 individuelle PSD_i^{2D} gemessen und berechnet. Die höhere Anzahl an Messaufnahmen wurde gewählt, da sich die verwendeten Substrate gerade im niedrigen Frequenzbereich unterscheiden und dabei eine hohe Genauigkeit erforderlich ist.

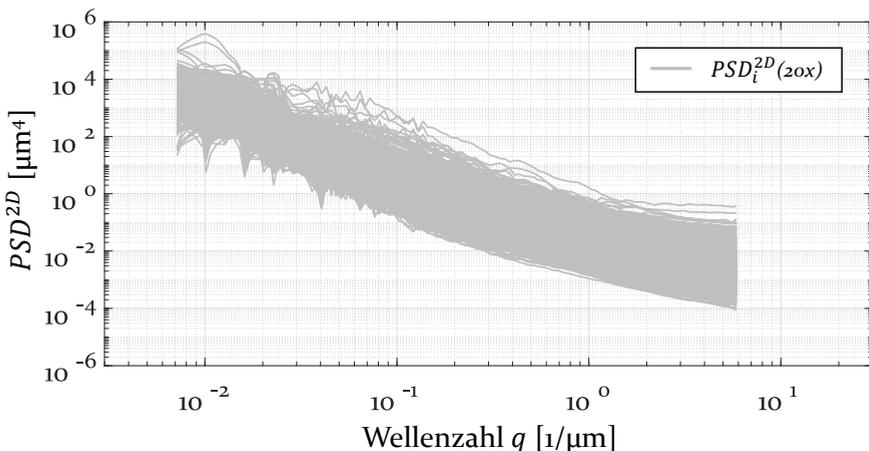


Bild 28: Spektrale Leistungsdichte von 625 Einzelaufnahmen mit 20x-Objektiv

Unabhängig vom Objektiv ergibt sich ein Kurvenverlauf mit negativer Steigung. Wie die Beispiele zeigen, ist die Streuung der individuellen PSD_i^{2D}

sehr groß, ein typischer Sachverhalt, der generell bei der Analyse spektraler Leistungsdichten beobachtet wird. [97, 119, 124] Insbesondere für hohe Wellenzahlen liegen einzelne Kurvenverläufe deutlich über denen anderer. Ausreißer nach oben aber auch nach unten wurden bei der Oberflächenanalyse immer wieder beobachtet und deuten auf Inhomogenitäten und Messartefakte hin. [97, 98, 118]

Filterfunktion und geometrische Mittelung - PSD_{avg}

Um die Auswirkung derartiger Ausreißer zu minimieren, wurden daher generell bei allen durchzuführenden Oberflächenanalysen die höchsten und niedrigsten zehn Prozent der individuellen PSD_i^{2D} eliminiert (90/10 Filter). Dadurch ergibt sich eine Reduktion in der Bandbreite der Streuung, die gerade für das 50x-Objektiv mit einer geringeren Anzahl an Einzelkurven deutlich zu sehen ist (Bild 29).

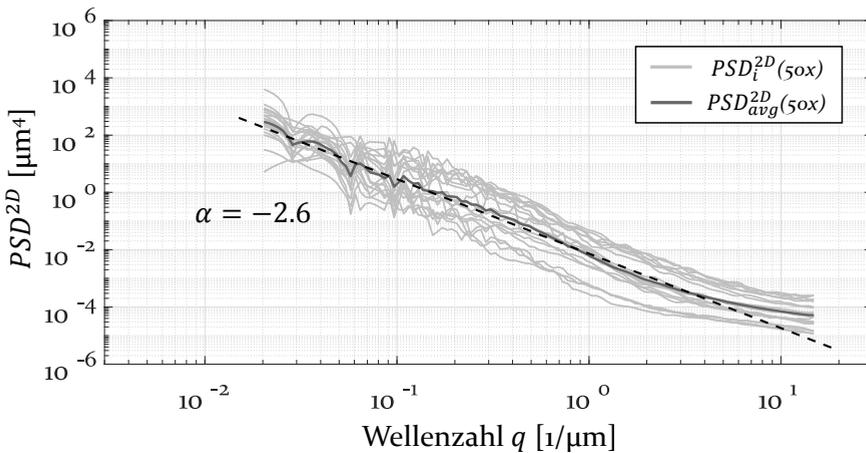


Bild 29: Gefilterte spektrale Leistungsdichte der Einzelaufnahmen und geometrischer Mittelwert (50x-Objektiv) folgen der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit negativer Steigung $\alpha = -2.6$

Für eine repräsentative Charakterisierung der Oberfläche ist die geometrische Mittelung der individuellen PSD_i^{2D} erforderlich: [124, 125]

$$PSD_{avg}^{2D}(q) = \left[\prod_{i=1}^N PSD_i^{2D}(q) \right]^{1/N} \quad (4.21)$$

Dabei bezeichnet N die Zahl der individuellen $PSD_i^{2D}(q)$ und $PSD_{avg}^{2D}(q)$ die gemittelte PSD-Kurve, die in Bild 29 als schwarze Linie eingezeichnet

ist. Die Intensität der spektralen Leistungsdichte $PSD(q) \sim q^\alpha$ folgt hierbei im doppeltlogarithmischen Maßstab in einem weiten Wellenzahlbereich einer Geraden mit negativer Steigung α . Bei linearen Verläufen im doppeltlogarithmischen Maßstab handelt es sich um die zuvor beschriebenen selbstaffinen Oberflächen. Eine der bekanntesten Beispiele selbstaffiner oder fraktaler Strukturen ist nach Benoît Mandelbrot benannt. [126]

In dem gezeigten Beispiel beträgt die Steigung $\alpha = -2.6$. Lediglich im Bereich hoher Wellenzahlen weicht der Kurvenverlauf von dieser Geraden ab. Dies lässt sich durch den endlichen, diskreten Pixelabstand begründen, der ein hochfrequentes Rauschen verursacht und die Ergebnisse in diesem Bereich verfälscht. Ein weiteres Messartefakt kann bei niedrigen Wellenzahlen auftreten. Auslöser ist hier die geringe Anzahl an Perioden für große Wellenlängen, die innerhalb des Messbereichs erfasst werden und zu höheren statistischen Schwankungen und Abweichungen führen können. Für die Interpretation von PSD-Kurvenverläufen sind beide Messartefakte auszuschließen. [97, 98, 118]

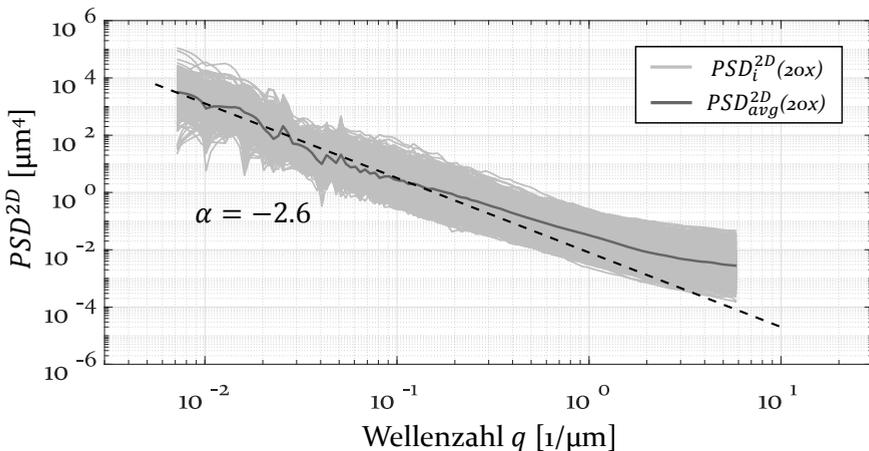


Bild 30: Gefilterte spektrale Leistungsdichte der Einzelaufnahmen und geometrischer Mittelwert (20x-Objektiv) folgen der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit negativer Steigung $\alpha = -2.6$

Bild 30 zeigt das analoge Vorgehen für das 20x-Objektiv. Hierbei hat die geometrische Mittelung ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Reduzierung der Streuung der individuellen PSD_i^{2D} . Der Kurvenverlauf der PSD_{avg}^{2D} weist ebenso weitgehend eine Steigung von $\alpha = -2.6$ auf und weicht bei hohen Wellenzahlen ab. Mit dem gewichteten PSD_{avg}^{2D} kann ein für das Substrat aussagekräftiger RMS-Wert σ_{RMS}^q aus dem Frequenzraum berechnet werden. Dessen Übereinstimmung mit dem aus dem Ortsraum ermittelten quadratischen Mittenrauwert σ_{RMS}^h sollte stets geprüft werden.

Die spektrale Leistungsdichte ist dann korrekt bestimmt, wenn das Parsevalsche Theorem erfüllt ist. [112, 118]

Master-PSD

Für die Analyse der spektralen Leistungsdichte über den gesamten, durch die zwei Objektive abgedeckten, Wellenzahlbereich ist die Berechnung einer kombinierten Master-PSD erforderlich. [97, 98, 118] Diese vereint im vorliegenden Fall den Kurvenverlauf der geometrisch gemittelten PSDs mit 20x- und 50x-Objektiv, d.h. $PSD_{avg}^{2D}(20x)$ und $PSD_{avg}^{2D}(50x)$. Hieraus ergibt sich die in Bild 31 dargestellte graduell gewichtete Master-PSD $PSD_{avg}^{2D}(q)$.

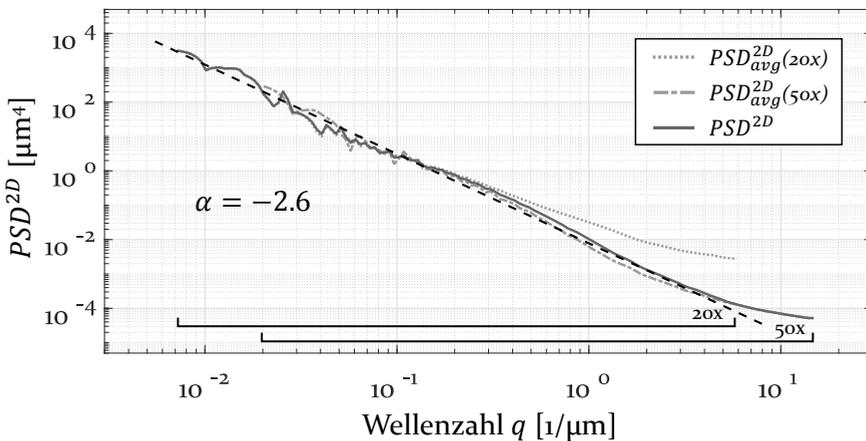


Bild 31: Zusammenführung der gemittelten $PSD_{avg}^{2D}(20x)$ und $PSD_{avg}^{2D}(50x)$ zu einer Master-PSD PSD_{avg}^{2D} mit der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ und einer negativen Steigung $\alpha = -2.6$

Die spektrale Leistungsdichte der Master-PSD besitzt folgerichtig dieselbe Steigung ($\alpha = -2.6$) wie die beiden Teilkurven. Artefakte, die im Kurvenverlauf der $PSD_{avg}^{2D}(20x)$ auftreten, können durch den graduellen Übergang zur $PSD_{avg}^{2D}(50x)$ -Kurve ausgeglichen werden. Lediglich Artefakte der $PSD_{avg}^{2D}(50x)$ -Kurve im Bereich hoher Wellenzahlen verbleiben und sind für weiterführende Analysen auszuschließen.

Die Master-PSD realisiert somit nicht nur ein ausgeweitetes Frequenzspektrum, sondern ermöglicht auch die Eliminierung von hochfrequentem Rauschen. Für die Umsetzung wurden die zwei beschriebenen Frequenzbänder betrachtet. Eine Erweiterung durch zusätzliche Objektive ist möglich [98, 118] – jedoch für die hier untersuchte Themenstellung nicht notwendig. Für eine umfangreiche Beschreibung der Probenoberfläche wurde die Master-PSD für alle untersuchten Substratvariationen ermittelt.

4.2 Methodik zur Charakterisierung von Leiterbahnen für aerosolbasierte Drucktechnologien

In diesem Abschnitt wird die entwickelte Methodik zur Analyse aerosolbasierter Leiterbahnen vorgestellt. Sie zeichnet sich durch die folgenden Vorteile aus:

- Kombinierte Analyse von Leiterbahnquerschnitt, -kontur und Overspray
- Automatisierte und statistisch fundierte Datenerfassung und -auswertung
- Nachweis und Identifizierung von Transportprozessen auf der Substratoberfläche nach aerosolbasierten Abscheideprozessen

Nach aktuellem Stand der Technik wird die Querschnittsanalyse von Leiterbahnen anhand des Höhenprofils eines Profilometers [33, 127] oder eines Laserscanmikroskops [55] realisiert. Die Bestimmung der Leiterbahnkontur sowie die Betrachtung des ungewollten Partikelaufrags außerhalb der Leiterbahn, dem sog. Overspray, erfolgt durch die Bildanalyse von Mikroskopaufnahmen. [14, 64, 65, 67] Eine kombinierte Analyse aller drei relevanten Kenngrößen – Leiterbahnquerschnitt, -kontur und Overspray – auf Basis einer Datenerfassung und innerhalb einer Versuchsdurchführung wurde jedoch bislang nicht betrachtet.

Darüber hinaus mangelt es an einem Konzept zur automatisierten Datenerfassung und -auswertung. Diese ist entscheidend für eine umfangreiche Datengrundlage und essenziell für eine statistisch fundierte Auswertung. Im Fall der Leiterbahnquerschnitte werden sequenziell an einer begrenzten Anzahl an Stützpunkten einzelne Profile erfasst und im Anschluss gemittelt. Die Korrektur der Substratneigung bzw. -unebenheit muss in der Regel manuell durchgeführt werden. Für die Auswertung der Querschnitte führt dieses Vorgehen in Kombination mit dem vorliegenden statistischen Druckprozess und den technischen Oberflächen zu einer hohen Varianz und erschwert Aussagen über den Einfluss von Prozessparametern. Des Weiteren stellt die Trennung von Leiterbahn und Substrat anhand des Höhenprofils eine Herausforderung dar, deren Komplexität mit steigender Substratrauheit zunimmt. Für die Linienkontur und den Overspray liegen bereits teilautomatisierte Prozesse zur Datenauswertung vor. [50, 55, 65, 67] Dies betrifft allerdings nicht die Datenerfassung, wodurch der Umfang der Ergebnisse zum Teil stark eingeschränkt ist.

Die Betrachtung von physikalischen Transportprozessen, die unter anderem in der Dünnschichttechnologie [128, 129] und der Lithographie

[116, 130] bereits intensiv analysiert worden sind, wurden bis dato für die Untersuchung von aerosolbasierten Drucktechnologien nicht berücksichtigt und sind nur phänomenologisch beschrieben. [11, 33] Transportprozesse bezeichnen in diesem Kontext das Fließverhalten der funktionalen Tinte auf der Substratoberfläche, die nachgelagert zur aerosolbasierten Abscheidung stattfinden. Ihr Nachweis und deren Identifizierung liefern ein tiefgreifendes Verständnis für die Analyse von Leiterbahnquerschnitt, -kontur und Overspray und stellt einen enormen Wissenszuwinn für die verwendete Technologie dar. Eine effektive Optimierung des Druckprozesses wird erst dadurch ermöglicht.

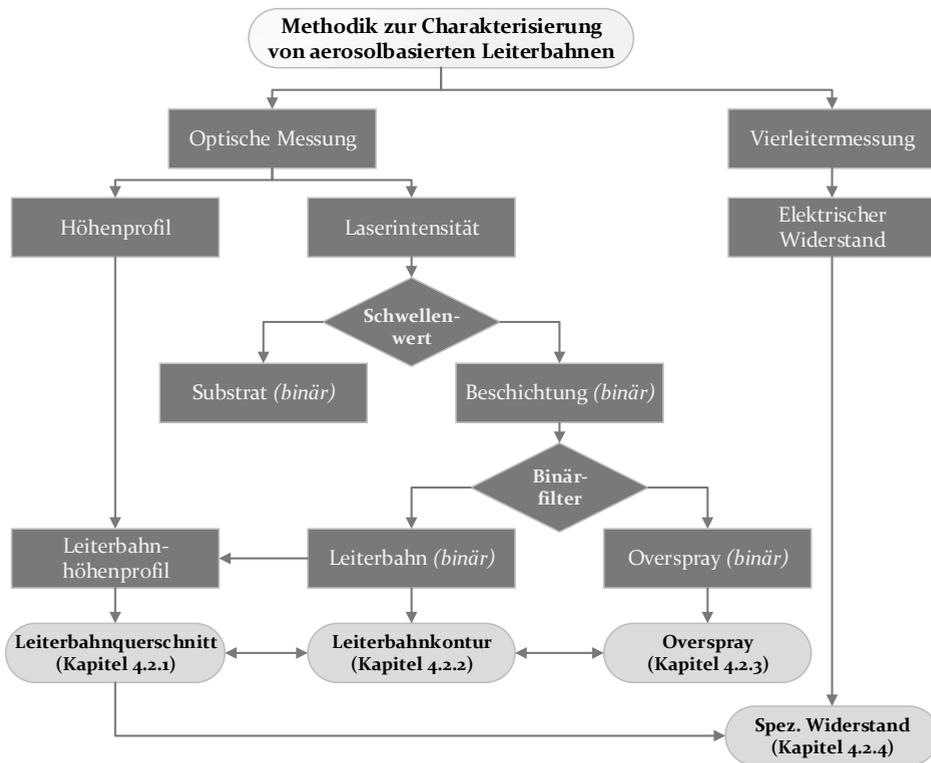


Bild 32: Methodik zur Charakterisierung von aerosolbasierten Leiterbahnen

Das entwickelte Verfahren zur umfassenden Charakterisierung von aerosolbasierten Leiterbahnen ist in Bild 32 veranschaulicht. Dabei wird die Analyse des Leiterbahnquerschnitts (Kapitel 4.2.1), der Leiterbahnkontur (Kapitel 4.2.2) und des Oversprays (Kapitel 4.2.3) in einer Methodik vereint. Der zugrunde liegende Transportprozess kann in allen drei Abschnitten nachgewiesen und dessen Einfluss auf die jeweilige Kenngröße ermittelt

werden. Die Datenerfassung erfolgt automatisiert mittels Laserscanmikroskop. Dabei wird die Position der betrachteten Leiterbahnausschnitte aus dem digitalen Drucklayout abgeleitet, sequenziell angefahren und die Messung automatisiert durchgeführt. Die Bestimmung des elektrischen Widerstands komplettiert die Datengrundlage. In Kombination mit der ermittelten Leiterbahnquerschnittsfläche können fundamentale Aussagen über den, für die gedruckte Elektronik entscheidenden, spezifischen Widerstand (Kapitel 4.2.4) getroffen werden.

Im Folgenden wird für die vorgestellte Methodik eine detaillierte Beschreibung der benötigten Teilprozesse zur automatisierten Datenauswertung von Laserscanmikroskopaufnahmen gegeben.

Optische Messung: Datenerfassung und -aufbereitung

Für die Analyse jeder Leiterbahn müssen in Abhängigkeit der Leiterbahnbreite sowie der Intensität und Verteilung des Oversprays drei bis vier Einzelaufnahmen nebeneinander in einer Sequenz erfasst werden. Jede Mikroskopaufnahme beinhaltet dabei das Höhenprofil, die Laserintensität und ein reales Farbbild des Probenausschnitts. Die Datenverarbeitung erfolgt an dieser Stelle mit Matlab. Hierzu werden die einzelnen Rohdaten importiert und für jeden Leiterbahnausschnitt eine Gesamtaufnahme mit Höhen-, Laserintensitäts- und Farbinformationen automatisiert berechnet.



Bild 33: Zusammengesetzte Mikroskopaufnahme einer gedruckten Leiterbahn mit einer Auflösung von 2818 x 746 Pixel und einem Messausschnitt von 786 µm x 208 µm

Für die Zusammensetzung der Einzelaufnahmen ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Intensitäts-, Höhen- und RGB-Werte auf demselben Niveau liegen. Dies wird durch eine Überschneidung der Messausschnitte innerhalb einer Sequenz erreicht. Dadurch kann das Niveau der einzelnen Aufnahmen bestimmt und aneinander angepasst werden. Bild 33 zeigt beispielhaft eine zusammengesetzte Gesamtaufnahme einer Leiterbahn.

Schwellenwertverfahren: Berechnung der binären Masken

Die Differenzierung zwischen Beschichtung mit funktionaler Tinte und Substrat ist ein entscheidender Schritt für die automatisierte Datenauswertung. Diese erfolgt auf Basis der Intensität der reflektierten Laserleistung des Laserscanmikroskops und wird mittels Schwellenwertanalyse umgesetzt. Dabei wird die Laserintensität in Grauwerte konvertiert und ein Schwellenwert mit der Methode nach Otsu berechnet. [66] Aufgrund der höheren Reflexion der Silberpartikel im Vergleich zum Substrat sind alle Bereiche mit Werten über dem Schwellenwert mit Beschichtung, Bereiche mit Werten unter dem Schwellenwert Substrat. Es ergibt sich somit jeweils eine binäre Maske für das Substrat und die Beschichtung. Fehlstellen bzw. Lücken in einzelnen Clustern innerhalb der binären Maske können automatisch detektiert und korrigiert werden.

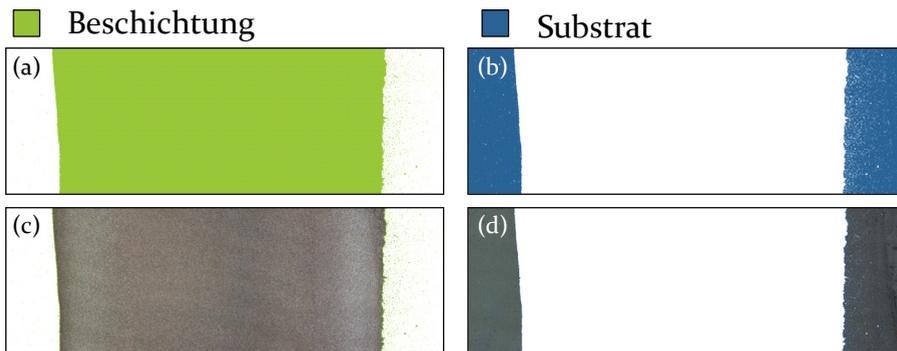


Bild 34: Binäre Masken für die Beschichtung (a) und das Substrat (b) sowie deren exemplarische Anwendung auf die Mikroskopaufnahme (c, d)

Zusätzlich wurde für den Schwellenwert die Option zur manuellen Korrektur implementiert, um eventuelle Feinjustierungen durchzuführen. Eine korrekte Trennung von Beschichtung und Substrat ist dabei essenziell, denn diese wirkt sich auf alle drei Kenngrößen der Leiterbahn aus. Bild 34 zeigt beispielhaft die beiden binären Masken für Beschichtung und Substrat. Für eine bessere Veranschaulichung ist zudem ein Farbbild mit der jeweils angewendeten Maske dargestellt.

Binärfilter: Trennung von Leiterbahn und Overspray

Auf Basis der binären Maske für die Beschichtung können die Flächen der einzelnen Cluster mit funktionaler Tinte bestimmt werden. Diese Information wird für die Trennung zwischen Leiterbahn und Overspray benötigt. Der größte Bereich beschreibt dabei stets die Leiterbahn, die kleineren

Bereiche werden der Kategorie Overspray zugeordnet. Bild 35 zeigt beispielhaft die binäre Aufteilung in Leiterbahn und Overspray sowie das dazugehörige Farbbild mit den jeweils hervorgehobenen Bereichen. An der Stelle sei darauf hingewiesen, dass für das gezeigte Beispiel eine Asymmetrie des Oversprays gewählt wurde, um unterschiedliche Ausprägungen zu illustrieren. In diesem Fall ist die Intensität und Ausdehnung des Oversprays auf der rechten Seite der Leiterbahn deutlich höher als auf der linken Seite. Gleichzeitig fällt auf, dass die Leiterbahnrandkontur auf der rechten Seite deutlich rauer als auf der linken Seite ausfällt. Dieser Zusammenhang zwischen Leiterbahnkontur und Overspray wird in Kapitel 5 detailliert behandelt und quantitativ erfasst.

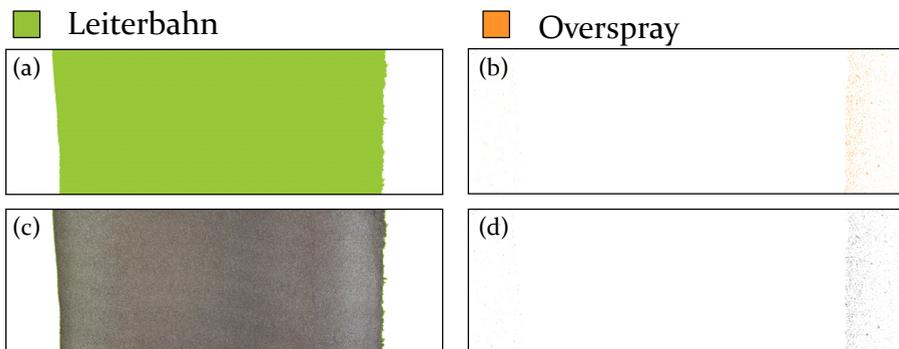


Bild 35: Binäre Masken für die Leiterbahn (a) und den Overspray (b) sowie deren exemplarische Anwendung auf die Mikroskopaufnahme (c, d)

Die berechneten binären Masken für Substrat, Leiterbahn und Overspray werden für die jeweiligen Mikroskopaufnahmen zur weiterführenden Analyse in Form von Metadaten zur Verfügung gestellt. Die binären Informationen bilden dabei bereits die vollständige Datengrundlage für die Charakterisierung der Leiterbahnkontur und des Oversprays. Diese werden in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 vertieft, deren Abhängigkeit von Substrat- und Prozessparametern hergestellt und der Nachweis von Transportprozessen vollzogen.

Leiterbahnhöhenprofil: Extraktion und Nivellierung

Für die Ableitung des Leiterbahnhöhenprofils werden neben den Höhenprofilen auch die entsprechenden Informationen der binären Maske benötigt, um die Leiterbahn aus dem Höhenprofil zu extrahieren. Im Anschluss werden Neigung und Versatz korrigiert. Hierbei werden aus dem Leiterbahnhöhenprofil und der optisch erfassten Kontur zwei gemittelte Vektoren berechnet, die durch die beiden Fußlinien der Leiterbahn verlaufen.

Unter der Annahme, dass die Fußlinien der Leiterbahn auf einer planaren Ebene verlaufen müssen, kann eine Nivellierungsebene ermittelt werden, die die Neigung und den Versatz im Raum korrigiert.

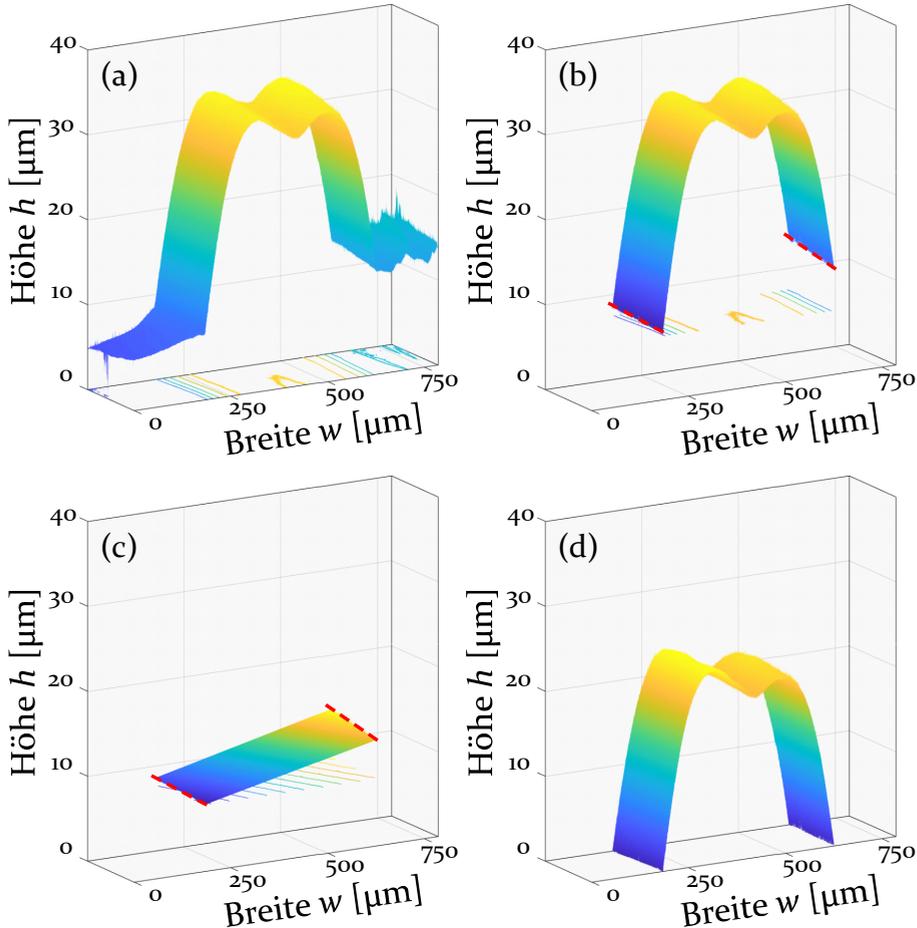


Bild 36: Höhenprofil von Leiterbahn und Substrat (a); Extraktion der Leiterbahn durch binäre Maske (b); Nivellierungsebene unter der Prämisse uniformer Fußlinien der Leiterbahn (c); Isoliertes und nivelliertes Leiterbahnhöhenprofil (d)

Dieser Prozess, exemplarisch dargestellt in Bild 36, ist vollautomatisiert und robust gegenüber der Substratrauheit. Die Integration in Längsrichtung ergibt den durchschnittlichen Leiterbahnquerschnitt, der sich durch seine hohe statistische Signifikanz auszeichnet. Die Variation des Leiterbahnquerschnitts wird dabei anhand der Leiterbahnoberfläche in Kapitel 4.2.1 und anhand der Leiterbahnkontur in Kapitel 4.2.2 betrachtet.

Vierleitermessung nach Kelvin: Ermittlung der Leitfähigkeit

Für die Bestimmung des Leiterbahnwiderstands wird eine Vierleitermessung nach Kelvin eingesetzt. Zusammen mit den Ergebnissen der Querschnittsanalysen können Aussagen über den spezifischen Widerstand der gedruckten Strukturen getroffen werden. Diese werden im Detail in Kapitel 4.2.4 betrachtet.

4.2.1 Bestimmung der Leiterbahnquerschnitte

Die Darstellung von Leiterbahnquerschnitten erfolgt in der Literatur unter einer starken Verzerrung der realen Strukturen, die sich durch eine unterschiedliche Skalierung von Höhe und Breite ergeben. [33, 55, 62] Dies dient der besseren Visualisierung, erleichtert die Auswertung der Querschnittsflächen und wird nachfolgend auch in dieser Arbeit verwendet. Dennoch sollte stets berücksichtigt werden, dass die Proportionen der Leiterbahnen in Realität stark zugunsten der Breite gegenüber der Höhe ausfallen. [28] Einen Eindruck über die tatsächlichen Strukturen verschaffen die Schliffbilder aus Bild 37. Der sich einstellende geringe Kontaktwinkel zwischen Tinte und Substrat weist bereits auf eine gute Benetzung hin.

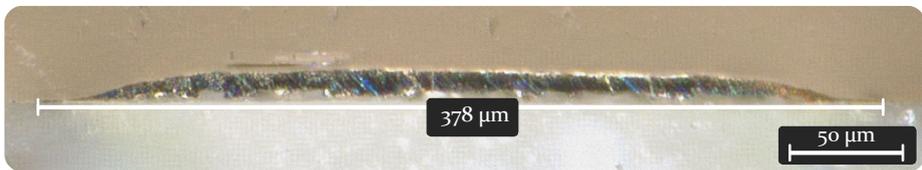


Bild 37: Schliffbildaufnahme einer gedruckten Leiterbahn auf einem Verbundwerkstoff in Sandwichbauweise

Die Berechnung der für den Querschnitt relevanten Leiterbahnkenngrößen, der Querschnittsfläche A , der Höhe h und der Breite w , basiert auf den nivellierten Leiterbahnhöhenprofilen. Dabei erfolgt die Charakterisierung des Querschnitts nicht an einer einzelnen Stelle innerhalb des Messfensters, sondern durch die Integration des Leiterbahnhöhenprofils in Längsrichtung, senkrecht zum Querschnitt. In der vorliegenden Untersuchung wird ein Messausschnitt von $786 \mu\text{m} \times 208 \mu\text{m}$ mit einer Auflösung von 2818×746 Pixel aufgenommen. Der Leiterbahnquerschnitt wird somit über 746 Einzelquerschnitte gemittelt. Zudem wird jede Leiterbahn durch drei, über die Leiterbahn verteilte, Messausschnitte charakterisiert. Für alle im Folgenden betrachteten Querschnitte ergibt sich somit eine Datengrundlage von je 2238 Einzelquerschnitten.

Querschnittsflächen von rauen Oberflächen

Für die Versuchsplanung und spätere Auswertung der Querschnittsanalyse ist zu berücksichtigen, dass das Höhenprofil aus dem Fokuspunkt des Substrats beziehungsweise der Leiterbahn abgeleitet wird, d.h. Aussagen über die Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterbahn können nicht direkt aus den Messergebnissen getroffen werden. [122, 123] Bild 38 zeigt den Leiterbahnquerschnitt auf einer rauen Oberfläche. Während die Leiterbahnbreite in Relation unverändert bleibt, wirkt sich die Substrattopographie vor allem auf die Höhe und die Querschnittsfläche der Leiterbahn aus.

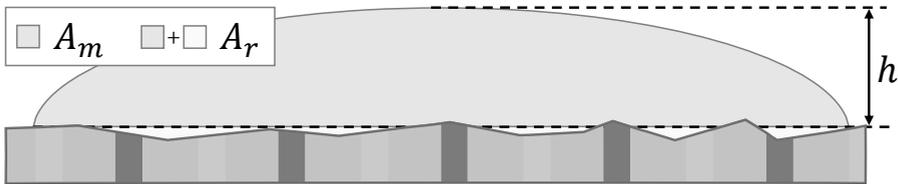


Bild 38: Gegenüberstellung von gemessener Leiterbahnquerschnittsfläche A_m und realer Leiterbahnquerschnittsfläche A_r

Dabei ist zwischen der gemessenen Leiterbahnquerschnittsfläche A_m und der realen Leiterbahnquerschnittsfläche A_r zu unterscheiden. Die reale Leiterbahnquerschnittsfläche A_r entspricht der Querschnittsfläche, die sich auf einer idealen Oberfläche in Abhängigkeit der abgeschiedenen Aerosolmenge einstellen würde. Die gemessene Leiterbahnquerschnittsfläche A_m erfasst lediglich die Querschnittsfläche der Leiterbahn, die sich vom Substrat bzw. der Oberflächentopographie abzeichnet. Die Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterbahn wird somit nicht berücksichtigt. Die Diskrepanz zwischen gemessener und realer Leiterbahnquerschnittsfläche nimmt mit steigender Oberflächenrauheit zu und zeigt besonders bei kleinen Querschnittsflächen eine große Wirkung.

Variation der Schichtanzahl

Die Charakterisierung der Leiterbahnquerschnitte unterliegt somit neben prozess- auch messbedingten Schwankungen, die Aussagen über den Einfluss der Prozessparameter auf die Druckqualität erschweren. Daher wird neben der zuvor beschriebenen Querschnittsmittelung auch die Variation der Schichtanzahl methodisch eingesetzt. Die sukzessive Erhöhung der Schichten ermöglicht dabei die Erfassung von mehreren Stützpunkten mit konstant ansteigender Aerosolmenge.

In Bild 39 ist exemplarisch die Querschnittsanalyse für eine Versuchskonfiguration dargestellt. Mit zunehmender Schichtanzahl vergrößert sich der Querschnitt (Bild 39, a) und die Querschnittsfläche steigt linear an (Bild 39, b). Dies ist unter der Annahme eines konstanten Masseauftrags nachvollziehbar.

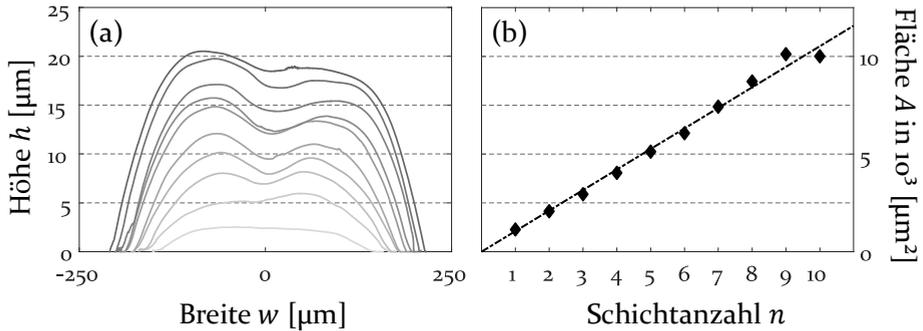


Bild 39: Einfluss der Schichtanzahl n auf die Höhe h und Breite w (a), dargestellt in Grauwerten (Variation eins bis zehn von hell nach dunkel) sowie die Querschnittsfläche A (b)

Die Variation der Schichtanzahl, die sich durch ihre zuverlässige Skalierung auszeichnet, dient somit nicht nur deren Untersuchung, sondern ermöglicht auch die Einflussanalyse weiterer Prozessparameter. Auf diese Weise können unter anderem Messungen von kleinen Querschnittsflächen bei gleichzeitig hoher Oberflächenrauheit durch die Extrapolation der Messwerte mit großer Schichtanzahl beschrieben werden. Generell können Effekte statistischer Prozesse deutlich zuverlässiger anhand derartiger Kurvenverläufe charakterisiert werden. Die Variation der Schichtanzahl wird deshalb auch in den nachfolgenden Kapiteln als Bestandteil der Methodik verwendet.

Zeitliche Drift und Kompensationsstrategien

Der vorgestellte Druckprozess unterliegt, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, einer zeitlichen Drift. Diese hat insbesondere Auswirkungen bei umfangreichen statistischen Versuchsplanungen aber auch innerhalb einer Versuchsreihe. Neben der in Kapitel 6 beschriebenen Echtzeitanalyse des Massenstroms, kann bereits die Versuchsplanung und das verwendete Layout optimiert werden.

Für die Auslegung einer statistischen Versuchsplanung sollte dementsprechend darauf geachtet werden, dass die Reihenfolge der Versuchsdurch-

führung geeignet angeordnet wird, um die zeitliche Drift von den systematischen Tendenzen differenzieren zu können. Innerhalb einer Versuchsreihe werden deshalb die Leiterbahnen mit ansteigender Schichtanzahl von eins bis zehn nicht sequenziell hintereinander, sondern sukzessive gedruckt, d.h. zu Beginn wird für alle zehn Leiterbahnen die erste Schicht appliziert, im Folgenden für weitere neun die zweite Schicht und so weiter. Darüber hinaus wird die Druckrichtung alternierend gewählt. [49] Somit kann die zeitliche Drift nahezu halbiert werden.

Transportprozesse: Glättung der Leiterbahnoberfläche

Die Auswertung der Leiterbahnquerschnitte, die durch den aerosolbasierten Druckprozess auf die Substrate appliziert werden, beschreibt lediglich den Endzustand und gibt keinerlei Aufschlüsse über die stattfindenden physikalischen Prozesse. Zunächst führt der Druckprozess zu einer Abscheidung von Aerosolpartikeln auf der Substratoberfläche. Ob diese allerdings nur abgeschieden werden und die Leiterbahnoberfläche die zugrunde liegende Substratrauheit wiedergibt oder ob nachgelagerte Transportprozesse zu einer Glättung der Oberfläche führen, kann durch die alleinige Analyse der Leiterbahnquerschnitte nicht getroffen werden.

Für die Analyse von Glättungsprozessen eignet sich die Anwendung der in Kapitel 4.1.4 eingeführten spektralen Leistungsdichte auf die Leiterbahnoberfläche. Im Allgemeinen können mit ihr Glättungsprozesse durch eine Reduktion der Fläche unter der $PSD(q)$ -Kurve nachgewiesen werden. [128, 130] In Bild 40 ist die Veränderung der spektralen Leistungsdichte $PSD(q)$ einer rauen Oberfläche (a) mit der Korrelationswellenzahl q_k und der negativen Steigung α während eines Glättungsprozesses in doppeltlogarithmischer Auftragung schematisch dargestellt. [129]

Die Kurvenverläufe (b) und (c) zeigen dabei verschiedene Stadien des Glättungsprozesses. Im Bereich der Wellenzahlen größer q_2 ist bereits eine Glättung erfolgt. Die PSD-Kurve folgt in diesem Bereich der durch den Druckprozess spezifischen, negativen Steigung β mit $|\beta| < |\alpha|$. Die Oberflächenrauigkeit, repräsentiert durch den RMS-Wert, ist um den entsprechenden, gewichteten Flächenanteil reduziert. Für Wellenzahlen kleiner q_1 hat der Glättungsprozess noch nicht begonnen. Der Kurvenverlauf (d) folgt bereits über den kompletten, gemessenen Wellenzahlbereich dem geglätteten Kurvenverlauf mit $PSD(q) \sim q^\beta$.

Für die Identifikation der physikalischen Transportprozesse ist die mathematische Abhängigkeit der PSD-Kurve von der Wellenzahl ausschlag-

gebend. Dabei lassen sich den verschiedenen Termen von q^{-i} der Ordnung $i = 1, 2, 3$ und 4 unterschiedliche Transportprozesse zuordnen. Für die Ordnung $i = 1$ liegt viskoses Volumenfließen vor. Transportprozesse der Ordnung $i = 2$ beschreiben Desorption und ballistischen Transport, die der Ordnung $i = 3$ Volumendiffusion und die der Ordnung $i = 4$ Oberflächendiffusion und viskoses Oberflächenfließen. [128, 131-133]

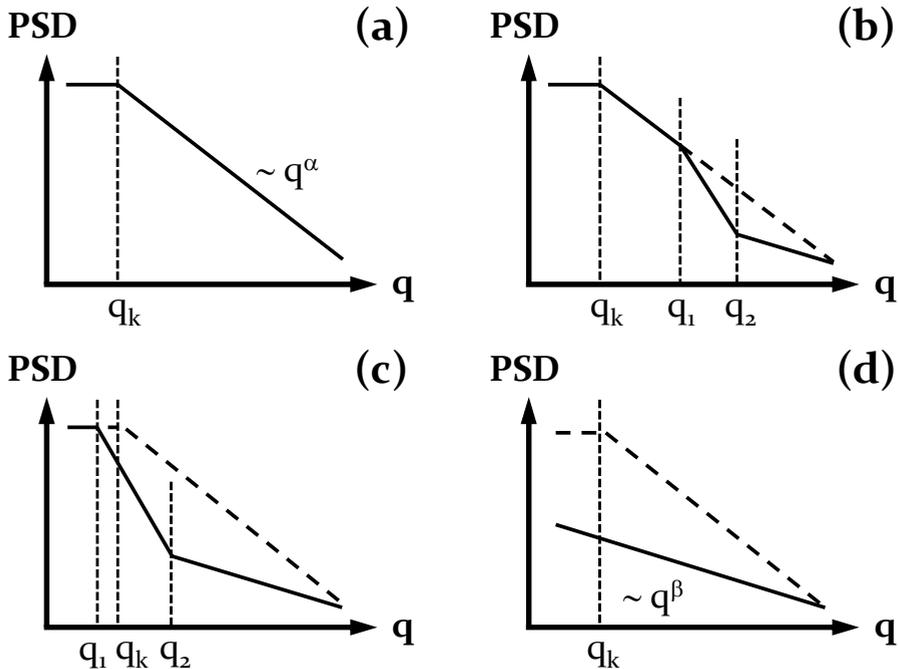


Bild 40: Spektrale Leistungsdichte $PSD(q)$ einer rauen Oberfläche mit der Korrelationswellenzahl q_k (a) sowie deren Veränderung über verschiedene Stadien des Glättungsprozesses hinweg (b-d) in Anlehnung an [129]

Bei der Differenzierung zwischen viskosem Volumenfließen und Oberflächenfließen, die parallel beziehungsweise senkrecht zur Substratnormalen wirken, ist das Verhältnis der Dicke der viskosen Schicht an der Oberfläche gegenüber der typischen lateralen Strukturgröße entscheidend. Oberflächenfließen findet bevorzugt bei einer dünnen viskosen Schicht statt, während Volumenfließen dann dominiert, wenn die Dicke der viskosen Schicht größer als die Strukturgröße ist. [128, 133] Die experimentell ermittelte Steigung β gibt somit Aufschluss darüber, welcher Transportprozess im vorliegenden Fall dominant ist.

4.2.2 Erfassung der Leiterbahnkontur

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Erfassung der realen Leiterbahnkontur und wertet deren Abweichung vom idealen Verlauf aus. Die Datengrundlage bildet hierbei die in Kapitel 4.2 beschriebene binäre Maske der Leiterbahn. Anhand dieser werden die beiden Randkonturen der Leiterbahn jeweils in Form eines eindimensionalen Profils abgeleitet.

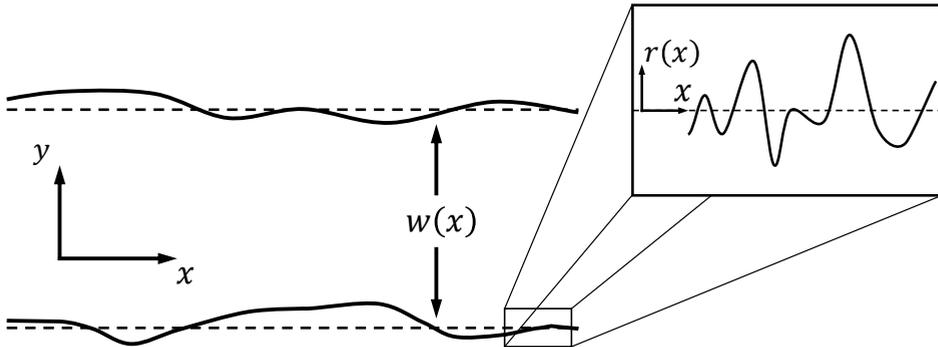


Bild 41: Leiterbahnbreite $w(x)$ und Profil einer Leiterbahnkontur $r(x)$ in Anlehnung an [64]

Die beiden Profile der Leiterbahnkontur $r(x)$ können sowohl individuell als auch kombiniert in Form der Leiterbahnbreite $w(x)$ betrachtet werden (Bild 41). Dabei wird die Variation der Leiterbahnbreite als LWR (*Line Width Roughness*) und die der Randkontur als LER (*Line Edge Roughness*) bezeichnet. [115, 116]

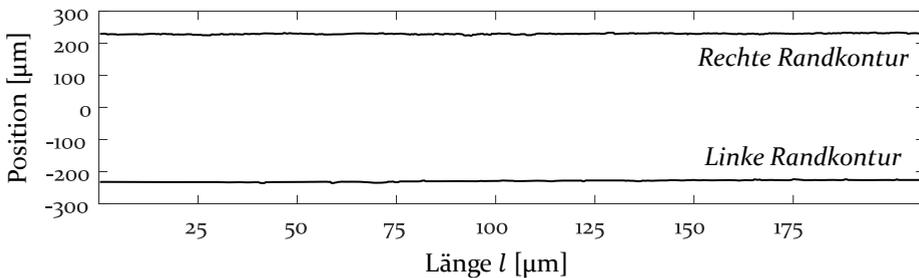


Bild 42: Exemplarische Darstellung einer Leiterbahnkontur

In Bild 42 ist beispielhaft eine Leiterbahnkontur im verwendeten Messausschnitt mit der Länge von 208 μm aufgeführt. Es wird deutlich, dass die Line Edge Roughness im Verhältnis zur Leiterbahndimension klein ausfällt. Wie bereits in Bild 41 dargestellt, sollten deshalb für die Betrachtung der LER die untersuchten Bereiche mit einer entsprechend angepassten Skalierung vergrößert werden.

In Kapitel 4.2.1 ist durch die Mittelung der Leiterbahnquerschnitte über die Länge der Leiterbahn hinweg bereits die Variation der Leiterbahnbreite integrativ berücksichtigt, auf eine explizierte Auswertung der LWR wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen liegt der Fokus auf der LER. Mit der angewendeten Methodik können fundamentale Aussagen über die Rauheitsverteilung der Randkontur, deren Abhängigkeit von den Prozessparametern sowie dem Glättungsprozess bei einem Anstieg der Schichtanzahl gewonnen werden. Die erzielten Ergebnisse lassen sich auch auf reduzierte Leiterbahnbreiten übertragen, bei denen der relative Einfluss der LER steigt und vor allem für geringe Leiterbahnabstände an Bedeutung gewinnt.

Line Edge Roughness (LER) und Gaußsche Normalverteilung

Für die Ermittlung der LER wird zunächst ein einzelnes Randprofil betrachtet (Bild 43, a) und vor der weiteren Auswertung mit einem Polynom ersten Grades von Versatz und Neigung bereinigt (Bild 43, b).

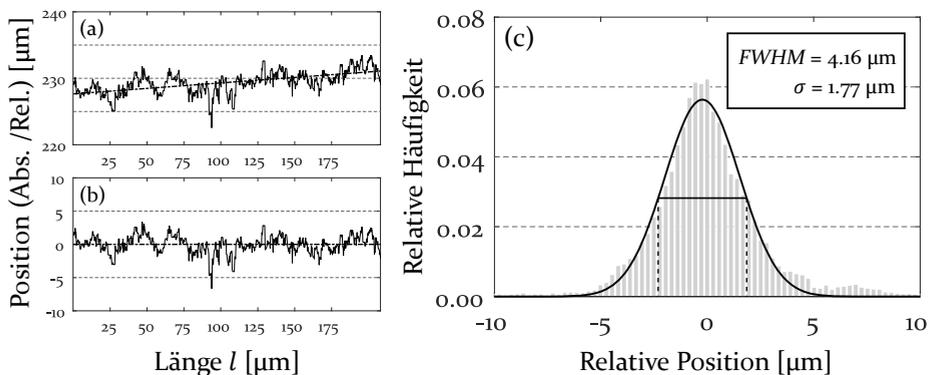


Bild 43: Beispiel einer Leiterbahnkontur ohne (a) bzw. mit (b) Trendbereinigung sowie ein Histogramm der relativen Positionsabweichungen auf Basis mehrerer Randkonturen (c)

Aus dem Profil $r(x)$ können diskrete Kenngrößen, unter anderem die Standardabweichung σ , direkt berechnet werden. Eine Mittelung über alle Randkonturen würde einen repräsentativen σ -Wert bezüglich der vorliegenden Versuchsreihe ergeben. Kenntnisse über die Verteilung der relativen Positionsabweichung gehen mit diesem Vorgehen allerdings verloren. Aus diesem Grund werden zur Charakterisierung der Randkonturen Histogramme auf Basis aller betrachteten Einzelprofile erstellt (Bild 43, c).

Die Verteilung der relativen Positionsabweichungen lässt sich dabei sehr gut durch eine Gaußsche Normalverteilung beschreiben. Aus dieser können zwei repräsentative Parameter, die Standardabweichung σ und die Halbwertsbreite (FWHM, *Full Width at Half Maximum*), berechnet werden, die im Verhältnis von $FWHM = 2\sqrt{2\ln(2)} \sigma$ zueinander stehen.

Line Edge Roughness (LER) und Spektrale Leistungsdichte (PSD)

Für die Betrachtung von lateralen Abhängigkeiten auf den Leiterbahnkonturen wird die in Kapitel 4.1.4 eingeführte spektrale Leistungsdichte eingesetzt. Im Gegensatz zur Analyse von Oberflächenstrukturen werden für die Line Edge Roughness nicht zwei- sondern eindimensionale PSD^{1D} verwendet. Bei diesen ergibt die Fläche unter der PSD^{1D} -Kurve direkt die Varianz σ^2 , die mit der der Profile beziehungsweise der Histogramme im Ortsraum übereinstimmt.

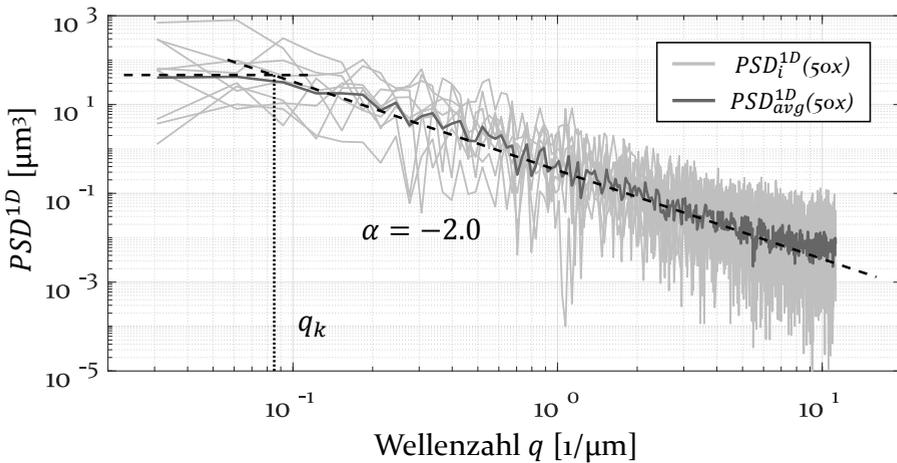


Bild 44: Spektrale Leistungsdichte der einzelnen Randkonturen sowie der geometrische Mittelwert mit 50x-Objektiv, die Korrelationswellenzahl q_k und der negative Rauigkeits-exponent $\alpha = -2$ mit der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$

Bild 44 zeigt ein Beispiel für eine PSD^{1D} -Analyse der Randkonturen im aufgenommenen Wellenzahlbereich von $0.03 \mu\text{m}^{-1} - 11.2 \mu\text{m}^{-1}$. Wie bereits zuvor beschrieben, besitzen individuelle PSD_i^{1D} eine große Streuung und erfordern eine geometrische Mittelwertbildung. Eine Filterung einzelner Ausreißer ist an dieser Stelle allerdings nicht notwendig. Der Kurvenverlauf der gemittelten PSD_{avg}^{1D} folgt der typischen PSD^{1D} -Kurve (Bild 24).

Die Korrelationswellenzahl q_k gibt den Übergang vom unkorrelierten zum korrelierten Bereich an. Im korrelierten Bereich folgt die spektrale Leistungsdichte der Kurve $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit einer negativen Steigung $\alpha = -2$, die im doppeltlogarithmischen Maßstab eine abfallende Gerade darstellt. Dieselbe negative Steigung $\alpha = -2$ wird auch im Bereich der Lithographie beobachtet, die wegweisend für die Untersuchung der LER ist. [116] Die Abweichung der Mittelwerte von der Geraden im Bereich hoher Wellenzahlen ist auf die bereits in Kapitel 4.1.5 angesprochenen Messartefakte zurückzuführen. [116]

Transportprozesse: Glättung der Leiterbahnkontur

Neben der Analyse der Line Edge Roughness für unterschiedliche, stationäre Ausprägungen, die sich aus der statistischen Versuchsplanung ergeben, ermöglicht die PSD^{1D} -Auswertung der LER für variierende Schichtanzahlen auch Rückschlüsse auf Transportprozesse.

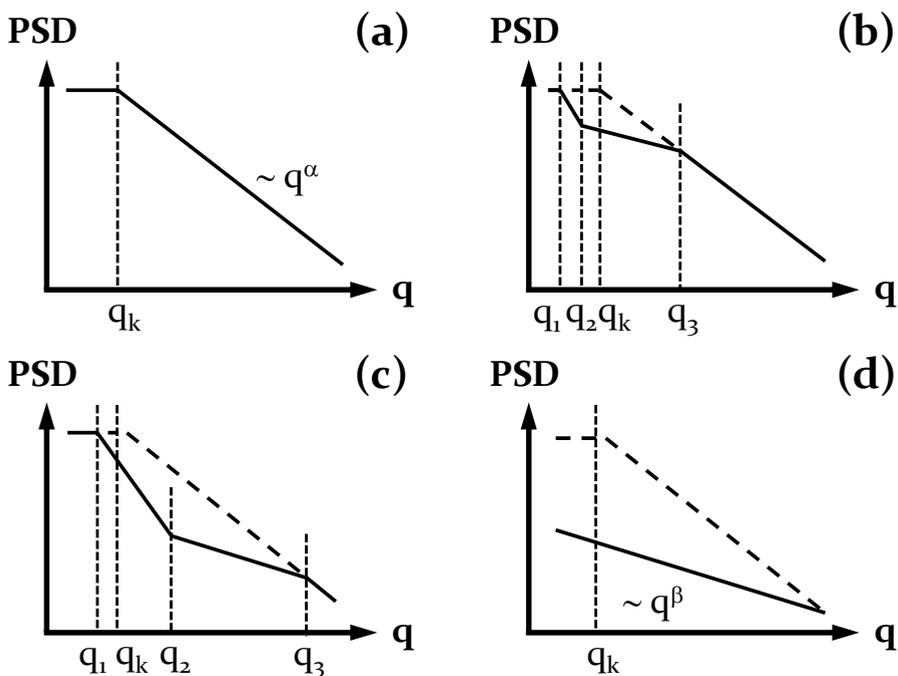


Bild 45: Spektrale Leistungsdichte $PSD(q)$ einer Randkontur mit der Korrelationswellenzahl q_k (a) sowie deren Veränderung über verschiedene Stadien des Glättungsprozesses hinweg (b-d)

Die Leiterbahnkontur definiert sich für aerosolbasierte Drucktechnologien durch zwei entscheidende Prozesse. Zum einen durch den Druckprozess selbst, der in Abhängigkeit des Aerosolstrahls die Dichte der abgeschiedenen Aerosolpartikel im Randbereich der Leiterbahn vorgibt, zum anderen durch Fließprozesse der Tinte auf der Substratoberfläche nach deren Applikation.

Mit einer Variation der Schichtanzahl können diese Prozesse nachgewiesen und beschrieben werden. Durch einen Anstieg der Schichtanzahl vergrößert sich auch die Leiterbahnbreite. Bereiche, die zuvor nicht mit der Leiterbahn verbunden waren und der Kategorie Overspray zuzuordnen waren, werden Teil der Leiterbahn – die Randkontur wird dadurch geglättet. Allerdings werden bei einer weiteren Schicht ebenfalls neue Aerosolpartikel an den Leiterbahnrandern aufgebracht. Beide Prozesse führen gemeinsam zur Formierung einer neuen Leiterbahnkontur.

Die Überlagerung zwischen Abscheide- und Glättungsprozessen können in Anlehnung an Bild 40 mit Hilfe eines modifizierten Glättungsprozesses beschrieben werden. In Bild 45 ist die Veränderung der spektralen Leistungsdichte $PSD(q) \sim q^\alpha$ einer Randkontur (a) mit der Korrelationswellenzahl q_k und der negativen Steigung α während des Glättungsprozesses in doppeltlogarithmischer Auftragung schematisch dargestellt.

Hierbei zeigen (b) und (c) verschiedene Stadien der Glättung. Die zusätzlich eingefügte Wellenzahl q_3 trennt dabei die zuvor beschriebenen Teilprozesse. Für Wellenzahlen im Bereich zwischen q_2 und q_3 erfolgt bereits eine vollständige Kantenglättung durch Fließprozesse der Tinte. Im Bereich zwischen q_1 und q_2 ist der Glättungsprozess im Gange und unterhalb von q_1 hat dieser noch nicht begonnen. Für Wellenzahlen größer q_3 findet zwar ein Glättungsprozess statt, dieser wird allerdings durch erneute Aerosolabscheideprozesse überlagert und zeigt die ursprüngliche negative Steigung α . In (d) ist der betrachtete Wellenzahlbereich komplett ausgeglättet.

4.2.3 Definition des Oversprays

Der Begriff Overspray beschreibt im Kontext von aerosolbasierten Drucktechnologien den Partikelauflage neben der Leiterbahnkontur. Diese Partikel besitzen keine direkte Verbindung mit der Leiterbahn und leisten dementsprechend keinen Beitrag zur Leitfähigkeit, schränken allerdings das Leiterbahnlayout zum Teil erheblich ein. Die Zielsetzung liegt somit in der Minimierung des Oversprays. [9]

Um den Einfluss der Prozessparameter zu bewerten und ein Optimum abzuleiten, bedarf es der Quantifizierung des Oversprays anhand einer statistisch aussagekräftigen Kenngröße. Wie bereits für die Leiterbahnkontur, so bildet auch für die Erfassung des Oversprays die in Kapitel 4.2 beschriebene binäre Maske die Datengrundlage für die weiteren Berechnungen. Die um die Leiterbahn extrahierten Bereiche mit Beschichtung repräsentieren dabei den Overspray. Eine Integration der logischen Matrix in Längsrichtung, senkrecht zur Leiterbahnorientierung, liefert die Intensität als relative Kenngröße. Diese beinhaltet sowohl Informationen zur Größe und Dichteverteilung der applizierten Partikel als auch über deren Abstand zur Leiterbahnkontur.

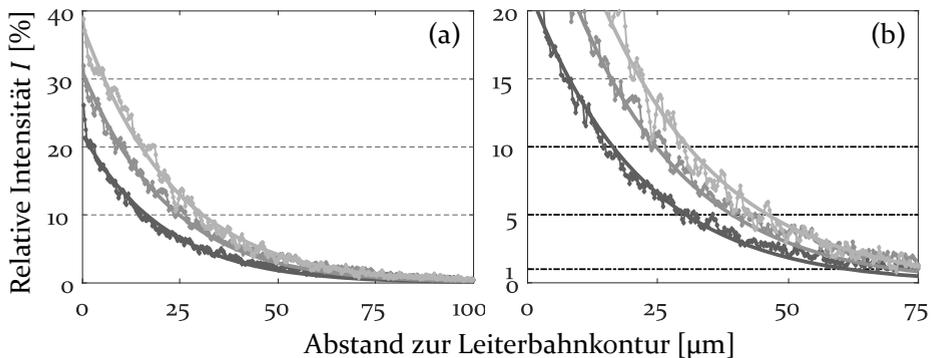


Bild 46: Exemplarische Darstellung des Oversprays (a) und vergrößerte Darstellung mit den verwendeten Grenzwerten von zehn, fünf und ein Prozent (b)

Bild 46 zeigt beispielhaft die daraus abgeleitete Intensitätsverteilung des Oversprays in Abhängigkeit vom Abstand zur Leiterbahnkontur. Die Auswertung des Oversprays bezieht sich dabei ausschließlich auf alle Bereiche, die keine Schnittmenge mit der Leiterbahnkontur besitzen. Der Abstand zur Leiterbahnkontur wird demzufolge vom äußersten Punkt der Leiterbahn aus bestimmt. Aufgrund der Line Edge Roughness startet der Overspray somit nicht bei 100 Prozent, d.h. an einer idealen Randkontur,

sondern darunter. Der Verlauf der relativen Intensität des Oversprays kann durch die Flanke einer Gaußschen Normalverteilung beschrieben werden.

Die quantitative Charakterisierung des Oversprays und die Ableitung von Prozessabhängigkeiten erfolgt durch die Auswertung der Distanz zur Leiterbahnkontur, bei der die Intensität des Oversprays unter einen entsprechenden Grenzwert fällt. Mit Hilfe der Verteilungsfunktionen können dabei auch Werte über den erfassten Messbereich hinaus extrapoliert werden. Dies ist vor allem bei der Analyse von kleinen Grenzwerten erforderlich. Für die praktische Auswertung des Abklingens des Oversprays wird der Abfall der Intensität auf zehn, fünf bzw. ein Prozent verwendet.

Transportprozesse: Einfluss auf den Overspray

Aerosolbasierte Drucktechnologien führen nach der Applikation funktionaler Tinten zu nachgelagerten Transportprozessen auf der Substratoberfläche. Diese Prozesse wirken sich neben der Leiterbahnoberfläche (Kapitel 4.2.1) und der Leiterbahnkontur (Kapitel 4.2.2) auch auf den Overspray aus. Bedingt durch das Fließverhalten der Tinten steigt die Leiterbahnbreite an - Bereiche des Oversprays werden Teil der Leiterbahn.

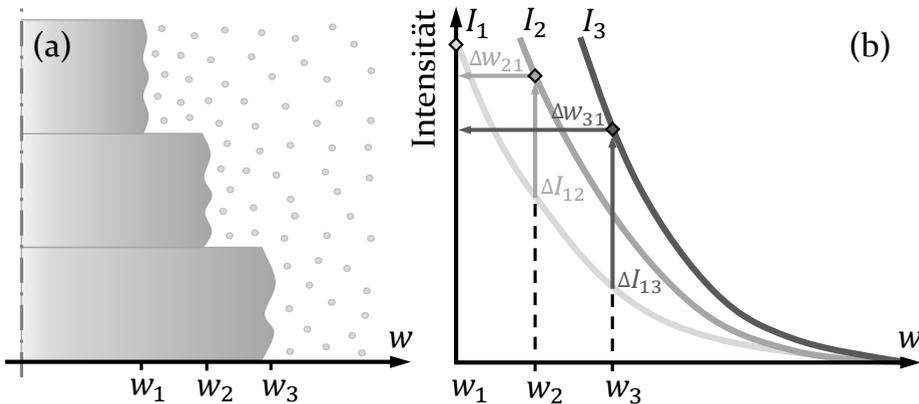


Bild 47: Schematische Darstellung der Leiterbahnbreite und des Oversprays für einen Anstieg der Schichtanzahl (a) sowie die Auswirkungen auf die Intensität des Oversprays (b)

Dieser Effekt lässt sich durch die methodische Variation der Schichtanzahl nachweisen. Hierbei ist zu beachten, dass mit zunehmender Anzahl an Schichten nicht nur die Leiterbahnbreite, sondern auch die Intensität des Oversprays zunimmt. Bild 47 zeigt die resultierenden Auswirkungen der beiden Teilprozesse schematisch am Beispiel dreier Leiterbahnen mit einer bis drei Schichten. Die Leiterbahnbreite, die analog zu Bild 39 symmetrisch

zur Leiterbahnmitte gewählt ist, nimmt dabei sukzessive von w_1 über w_2 auf w_3 zu. Die Bereiche mit Overspray sinken dementsprechend flächenmäßig, steigen allerdings in ihrer Intensität an. Für die Verteilung des Oversprays bedeutet dies einen linearen Anstieg der Amplitude mit der Schichtanzahl und eine Erhöhung der Intensität um $\Delta I_{12} = I_2 - I_1$ beziehungsweise $\Delta I_{13} = I_3 - I_1$. Simultan verschiebt sich allerdings auch der betrachtete Ausschnitt der Normalverteilung des Oversprays um $\Delta w_{21} = w_1 - w_2$ beziehungsweise $\Delta w_{31} = w_1 - w_3$. Je nach Intensität der beiden Teilprozesse dominiert entweder der Abscheideprozess und eine Erhöhung der Schichtanzahl führt zu einer Erhöhung des Oversprays oder die Fließprozesse dominieren und eine Erhöhung der Schichtanzahl resultiert in einer Reduktion des Oversprays.

Eine grundlegende und vor allem differenzierte Analyse der beiden Teilprozesse hilft dabei ein besseres Verständnis über die Ausprägung des Oversprays zu erlangen und ermöglicht eine effizientere Prozessoptimierung. De facto ist für die Analyse der Prozessabhängigkeiten auch die Mittelwertbildung über alle Schichten möglich, allerdings würde dies zu einem hohen Informationsverlust führen. Die Auswertung sollte daher unter Berücksichtigung der Schichtanzahl stattfinden.

4.2.4 Differenzierung des spezifischen Widerstands

Die Ermittlung des Leiterbahnwiderstands wird mittels Vierleitermessung durchgeführt. Hierbei erfolgt die Stromzufuhr und die Abnahme der am Widerstand hochohmig abfallenden Spannung getrennt über jeweils zwei Leitungen. Der Vorteil einer Vierleiter-Messanordnung liegt darin, dass die Widerstände der Zuleitung und Kontaktierung vernachlässigbar sind. Die Messmethode eignet sich daher vor allem für kleine Widerstände. [134, 135] Für das verwendete Messsystem ergibt sich in Abhängigkeit der verwendeten Messbereiche bis 32 m Ω , 320 m Ω und 3200 m Ω eine Messauflösung von 1 $\mu\Omega$, 10 $\mu\Omega$ beziehungsweise 100 $\mu\Omega$. [136]

Der gemessene Widerstand R , der über die Länge l der Leiterbahn bestimmt wird, kann auf den Widerstand pro Längeneinheit $\zeta = R/l$ normiert werden. In der Literatur finden beide Kenngrößen für die Charakterisierung der Leiterbahn Anwendung. [28, 33, 64, 67]

Für die Berechnung des spezifischen Widerstands $\rho = R \cdot A/l = \zeta \cdot A$ wird der Widerstand pro Längeneinheit ζ auf die Querschnittsfläche A der Leiterbahn bezogen. Mit dem spezifischen Widerstand werden absolute

Vergleiche zum metallischen Silber möglich, unabhängig von den jeweiligen Anordnungen und Versuchsbedingungen. [33, 41–43, P3] Dabei ist allerdings für höhere Substratrauigkeiten gemäß Bild 38 zwischen der real abgeschiedenen Querschnittsfläche A_r und der gemessenen Querschnittsfläche A_m zu unterscheiden. Damit ergeben sich die spezifischen Widerstände ρ_r und ρ_m .

In Kapitel 5.2.4 werden beide Varianten des spezifischen Widerstands berechnet, um den Einfluss der Oberflächentopographie auf den spezifischen Widerstand von gedruckten Leiterbahnen bewerten zu können.

5 Quantitative Analyse und Evaluierung von Oberflächen und gedruckten Leiterbahnen

Die Funktionalisierung mittels digitaler Drucktechnologien wird durch zwei entscheidende Faktoren geprägt, den Druckprozess und die Substratoberfläche. Nach aktuellem Stand der Technik wird für aerosolbasierte Drucktechnologien primär der Druckprozess analysiert und die Substratoberfläche nicht, beziehungsweise nicht ganzheitlich, in dem zu untersuchenden Sachverhalt berücksichtigt (Kapitel 2). Für die Funktionalisierung von Faserverbundwerkstoffen in Sandwichbauweise liegt die Problematik allerdings gerade in einer technischen Oberfläche mit entsprechend geringerer Güte im Vergleich zu den konventionellen Materialien wie unter anderem Polymeren oder Glas (Kapitel 3). Eine umfangreiche Methodik zur Analyse der Druckqualität unter Berücksichtigung der Substratqualität, wie in Kapitel 4 vorgestellt, ist somit von essenzieller Bedeutung.

Für die Evaluierung der Substratqualität und der wechselseitigen Beeinflussung mit der Druckqualität werden hierzu Substrate unterschiedlicher Oberflächenqualität hergestellt. Dabei wird der Pressvorgang für die Herstellung der Sandwichbauteile, der in Kapitel 3.1 beschrieben wurde, modifiziert. Durch eine Variation der Anpresskraft und der Trennschichten während des Pressprozesses können Substrate mit unterschiedlicher Aufprägung und daraus resultierend variierender Oberflächengüte hergestellt werden. Diese werden in Abschnitt 5.1 beschrieben und hinsichtlich ihrer Oberflächenwechselwirkung und Oberflächentopographie charakterisiert.

Tabelle 2: Statistische Versuchsplanung mit den Einflussgrößen Düsenabstand d und Druckgeschwindigkeit v

$d \backslash v$	1000 [mm/min]	2000 [mm/min]
2 [mm]	V_1	V_4
4 [mm]	V_3	V_2

Neben der Oberflächenqualität wird die Anzahl der Leiterbahnschichten methodisch von eins bis zehn variiert. Zudem werden zwei für den Druckprozess ausschlaggebende Parameter in einem übergeordneten, statistischen Versuchsplan (DOE, *Design of Experiment*) der Ausprägung 2^2

analysiert: der Düsenabstand d zwischen der Düse als Aerosolquelle und dem Substrat sowie der relativen Verfahrgeschwindigkeit v zwischen Düse und Substrat, die der Aufbringungsgeschwindigkeit des Aerosols entspricht. Der Düsenabstand d wird dabei zwischen 2 mm und 4 mm variiert, die Druckgeschwindigkeit v zwischen 1000 mm/min und 2000 mm/min (siehe Tabelle 1). Die Umsetzung dieses DOE dient der Untersuchung eines breiten Parameterraums und ermöglicht Aussagen über allgemeingültige Zusammenhänge zwischen der Oberflächenqualität und der Druckqualität. Hierbei wurden diese beiden Prozessparameter bewusst auf Grund ihres großen Effekts auf das Druckergebnis und der sehr guten Reproduzierbarkeit gewählt.

In Abschnitt 5.2 wird für die gedruckten Leiterbahnen sowohl die Druckqualität anhand der drei Kenngrößen (Leiterbahnquerschnitt, Leiterbahnkontur und Overspray) charakterisiert als auch der spezifische Widerstand ermittelt. Hierfür erfolgt eine Analyse der Schichtanzahl, der Substratoberfläche und des DOE. Der Fokus liegt dabei auf der Einflussanalyse der Substratrauheit auf den gemessenen Leiterbahnquerschnitt und den resultierenden spezifischen Widerstand. Glättungsprozesse, die sich auf die Leiterbahnoberfläche, die Leiterbahnkontur und den Overspray auswirken, werden darüber hinaus berücksichtigt.

Mit dem aufgeführten Versuchsplan sollen dabei Kernaussagen aus der Literatur (siehe Kapitel 2.3.1) bezüglich aerosolbasierter Drucktechnologien verifiziert und auf dieser Basis zusätzlich der Einfluss der Substratrauheit auf die Kenngrößen quantifiziert werden. Folgende Thesen sind dabei zu prüfen:

- Mit steigender Schichtanzahl nehmen die Leiterbahnhöhe, -breite und -querschnittsfläche linear zu
- Eine Zunahme des Düsenabstands resultiert in einem linearen Anstieg der Leiterbahnbreite
- Die Druckgeschwindigkeit ist indirekt proportional zur Leiterbahnquerschnittsfläche

5.1 Analyse von Substratoberflächen für aerosolbasierte Drucktechnologien

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Anwendung der in Kapitel 4.1 vorgestellten Methodik zur ganzheitlichen Charakterisierung von Substraten für aerosolbasierte Drucktechnologien. Die zu untersuchenden Substrate sind

Verbundwerkstoffe in Sandwichbauweise, die im Bereich der Luftfahrt eingesetzt werden. In Abschnitt 5.1.1 werden hierfür die Oberflächenwechselwirkungen und in Abschnitt 5.1.2 die Oberflächentopographie analysiert.

5.1.1 Oberflächenwechselwirkung

In Anlehnung an das Vorgehen zur Charakterisierung von Substratmaterialien bezüglich ihrer Oberflächenwechselwirkung in Bild 20 ist zu prüfen, inwieweit Vorbehandlungsstrategien für Substrate oder Anpassungen der Rezepturen für Tinten erforderlich sind. Generell gilt, dass ein gutes Benetzungsverhalten vorliegt, wenn der absolute Wert der Oberflächenspannung der Tinte γ_L kleiner oder gleich dem der Oberflächenenergie der Substrate γ_S ist und die relativen Verhältnisse der dispersen und polaren Anteile übereinstimmen. [51, 90] Diese Angaben liegen für die funktionalen Tinten meist von Seiten der Hersteller vor. Somit muss lediglich für die zum Einsatz kommenden Substratmaterialien die freie Oberflächenenergie bestimmt werden.

Methode nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble

Die Berechnung der freien Oberflächenenergie wird mit Hilfe der OWRK-Methode durchgeführt. Diese basiert auf der Kontaktwinkelmessung von mindestens zwei Flüssigkeiten mit bekannten dispersen und polaren Anteilen der Oberflächenspannung. Für eine höhere statistische Signifikanz werden für die hier durchgeführten Untersuchungen allerdings drei Flüssigkeiten verwendet. Die Oberflächenspannungen sowie die dispersen und polaren Anteile der Flüssigkeiten Wasser, Glycerol und Formamid sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Oberflächenspannung γ_L sowie die dispersen und polaren Anteile γ_L^D und γ_L^P für die drei verwendeten Testflüssigkeiten Wasser, Glycerol und Formamid [137]

	γ_L [mN/m]	γ_L^D [mN/m]	γ_L^P [mN/m]
Wasser	72.8	21.8	51.0
Glycerol	63.4	37.0	26.4
Formamid	58.2	39.5	18.7

Im vorliegenden Fall wird der Kontaktwinkel des liegenden Tropfens mittels Goniometer mit einer Genauigkeit von $\pm 2^\circ$ [85] erfasst. Zur Kompensation der Streuung wird für jede Flüssigkeit eine Messreihe im Umfang von zehn Einzelmessungen durchgeführt. Die Messungen erfolgen

bei Raumtemperatur. In jeder einzelnen Messreihe wird der Kontaktwinkel über einen Zeitraum von fünf Minuten gemessen.

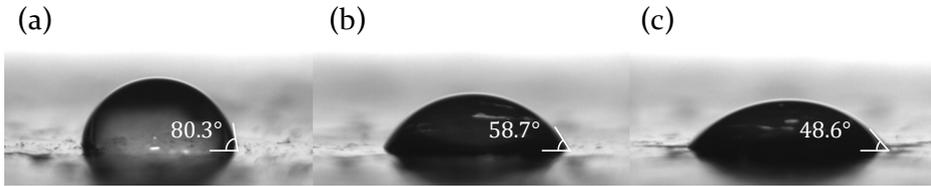


Bild 48: Exemplarische Kontaktwinkelmessung der drei verschiedenen Testflüssigkeiten auf den verwendeten Faserverbundwerkstoffen: (a) Wasser 80.3°, (b) Glycerol 58.7° und (c) Formamid 48.6°

Bild 48 zeigt die Messung von Kontaktwinkeln im Equilibrium für die drei verwendeten Testflüssigkeiten auf den zu untersuchenden Faserverbundwerkstoffen. Der Kontaktwinkel θ nimmt dabei von (a) Wasser (80.3°) über (b) Glycerol (58.7°) nach (c) Formamid (48.6°) mit sinkender Oberflächenspannung γ_L ab.

Für die Berechnung der freien Oberflächenenergie γ_S werden die Kontaktwinkel verwendet, die sich nach 30 Sekunden einstellen. Die Kontaktwinkel weisen allerdings eine sehr hohe zeitliche Stabilität auf, wodurch die Wahl der Zeitkomponente nur zu geringen Unterschieden in der Auswertung führt. [P3] Die über die Versuchsreihen gemittelten Kontaktwinkel der drei Flüssigkeiten lassen sich mit den Oberflächenspannungen aus Tabelle 3 gemäß dem OWRK-Modell nach der Formel (4.5) in die xy -Wertepaare in Tabelle 4 umrechnen.

Tabelle 4: OWRK-Methode für die drei verwendeten Testflüssigkeiten Wasser, Glycerol und Formamid mit den berechneten x - und y -Werten

	$x = \sqrt{\gamma_L^P / \gamma_L^D}$	$y = (\gamma_L \cdot (1 + \cos \theta)) / (2 \sqrt{\gamma_L^D})$
Wasser	1.53	9.41
Glycerol	0.84	7.28
Formamid	0.69	8.25

In Bild 49 sind die xy -Wertepaare aus Tabelle 4 graphisch dargestellt. Die resultierende Ausgleichsgerade besitzt eine Steigung von 1.90 und einen y -Achsenabschnitt von 6.38. Die daraus abgeleiteten Anteile für die freie Oberflächenenergie ergeben sich zu 3.6 mN/m für die polare Komponente γ_S^P und zu 40.7 mN/m für die disperse Komponente γ_S^D . Daraus errechnet sich in Summe eine gesamte freie Oberflächenenergie γ_S von 44.3 mN/m.

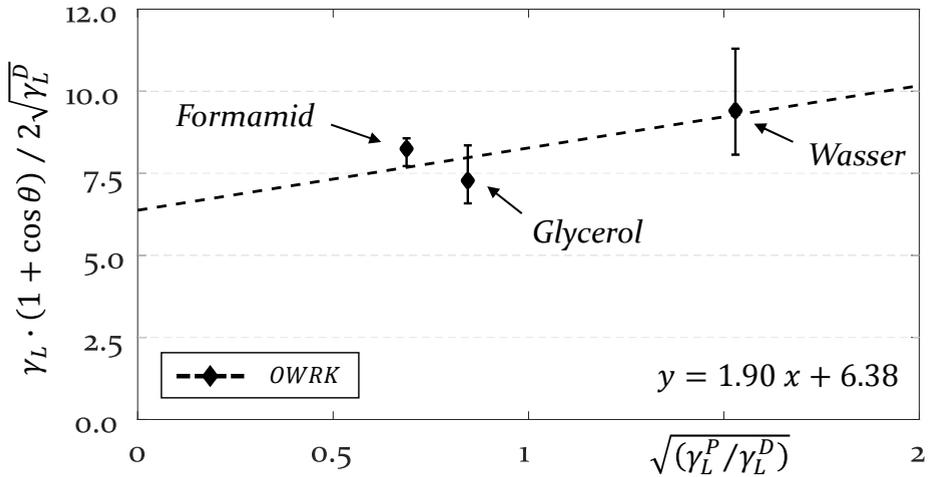


Bild 49: Graphische Darstellung der OWRK-Methode für die Berechnung der polaren und dispersen Anteile γ_S^P und γ_S^D der verwendeten Faserverbundwerkstoffe

Die beiden Komponenten der verwendeten Zweikomponenten-Silbernanopartikeltinte besitzen Oberflächenspannungen von 52 mN/m beziehungsweise 29 mN/m, [38] die somit den Wert der freien Oberflächenenergie umfassen. Damit ist eine Vorbehandlung der Substrate nicht erforderlich. Das Mischungsverhältnis wird empirisch bestimmt, hinsichtlich der Druckqualität optimiert und auf 3:1 eingestellt.

5.1.2 Oberflächentopographie

Für eine gezielte Variation der Oberflächenqualität wird der in Kapitel 3 beschriebene Pressprozess zur Herstellung von Sandwichkomponenten modifiziert, um damit sechs Substrate (R1 bis R6) mit unterschiedlicher Aufprägung und daraus resultierend variierender Oberflächengüte herzustellen.

Dabei wird, wie Tabelle 5 zu entnehmen ist, sowohl die Anpresskraft, die auf die Verbundwerkstoffe wirkt, als auch die Trennschichten, die sich zum Schutz von Substrat und Presse zwischen diesen befinden, variiert. Die Anpresskraft wird für R2 niedriger gewählt als für die übrigen Substrate. Für die Substrate R3 bis R6 wird des Weiteren Sandpapier mit unterschiedlicher Körnung auf der Trennfolie eingesetzt, um eine zusätzliche Aufprägung und damit verbunden eine erhöhte Substratrauheit zu erzielen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass bewusst Anpresskraft und Aufprägung zur Variation der Substratrauheit gewählt wurden, um eine Fluktuation in der Qualität des Herstellungsprozesses zu simulieren und zusätzliche, nachgelagerte Substratbehandlungen zu vermeiden.

Tabelle 5: Variation der Korngröße, der Aufprägung und der relativen Anpresskraft sowie die resultierende Rauheit (taktil R_a , optisch S_a 20x-/50x-Objektiv) für die Substrate R_1 - R_6

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
Korngröße [μm]	-	-	25.8	35.0	58.5	82.0
Anpresskraft (rel.)	↑	↓	↑	↑	↑	↑
R_a [μm]	0.42	0.92	1.08	1.27	2.16	2.88
$S_a(20x)$ [μm]	1.18	1.49	3.64	3.57	6.02	8.93
$S_a(50x)$ [μm]	0.82	0.85	1.97	2.13	2.60	3.98

Die Datengrundlage zur Charakterisierung der Substrate beruht auf Aufnahmen des Laserscanmikroskops. Bild 50 zeigt für jedes aufgeführte Substratmaterial (R_1 , R_2 , R_3 und R_5) eine zusammengesetzte Aufnahme aus 625 Einzelbildern mit 20-fachem Objektiv. Der Grafik ist zu entnehmen, dass zum einen eine erhöhte Anpresskraft (R_1 , R_3 und R_5) zu einer stärkeren Durchprägung des Honigwabenkernmaterials führt und zum anderen die Verwendung von Sandpapier (R_3 und R_5) in einer zusätzlichen Aufprägung in Relation zur Korngröße resultiert.

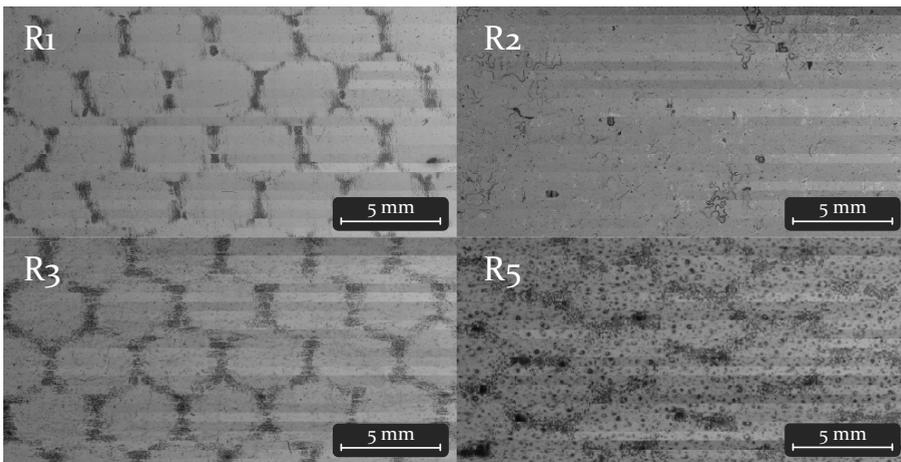


Bild 50: Zusammengesetzte Aufnahme aus einzelnen Laserscanmikroskopbildern für die Substrate R_1 , R_2 , R_3 und R_5 ; die Anpresskraft für R_2 ist niedriger als für die übrigen Substrate; R_3 und R_5 mit zusätzlicher Aufprägung mit Sandpapier unterschiedlicher Körnung

Bild 51 zeigt den arithmetischen Mittenrauwert R_a einer taktilen Messung für die Variation der Korngröße. Der Zusammenhang zwischen Korngröße und aufgeprägter Rauheit für die Substrate $R_3 - R_6$ ist dabei linear. Die Korngrößen zwischen $25.8 \mu\text{m}$ und $82.0 \mu\text{m}$ resultieren in R_a -Werten von $1.08 \mu\text{m}$ bis $2.88 \mu\text{m}$. Für die beiden Substrate R_1 und R_2 ohne Körnung ergeben sich R_a -Werte von $0.42 \mu\text{m}$ beziehungsweise $0.92 \mu\text{m}$. Eine höhere Anpresskraft führt somit trotz Durchprägung der Honigwabenkernstruktur zu einer niedrigeren Rauheit. Die R_a -Werte für R_1 und R_2 sind zusätzlich in Bild 51 eingetragen und entsprechen extrapolierten, fiktiven Korngrößen von $11.7 \mu\text{m}$ und $25.6 \mu\text{m}$.

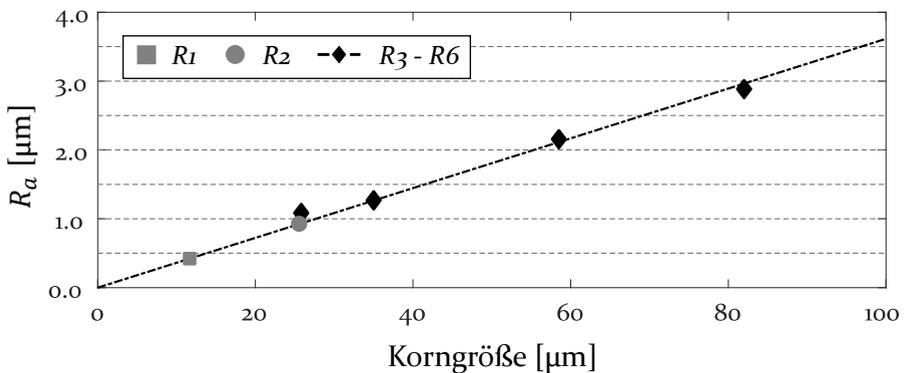


Bild 51: Arithmetischer Mittenrauwerte R_a einer taktilen Messung für die Substrate $R_1 - R_6$; R_2 mit niedrigerer Anpresskraft und $R_3 - R_6$ mit zusätzlicher Aufprägung mit Sandpapier (Körnung: $25.8 - 82 \mu\text{m}$)

Die taktilen Messergebnisse dienen der Prüfung der optischen Datengrundlage, die für die in Kapitel 4.1.5 beschriebene spektrale Charakterisierung der Substrate benötigt wird. Eine Gegenüberstellung der taktilen R_a -Werte zu den optischen S_a -Werten ist Bild 52 (a) zu entnehmen. Dabei werden für die optischen Messungen zwei Objektive (20x und 50x) verwendet, die mit verschiedenen Ortsauflösungen unterschiedliche Scanbereiche abdecken. Der Zusammenhang zwischen der taktilen und optischen Messung ist linear. Die Steigungen differieren allerdings voneinander und weichen beide von eins ab. Die Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Scanbereichen und Ortsauflösungen der verwendeten Messsysteme. [112]

Für die optischen Messungen werden neben den arithmetischen Mittenrauwerten S_a , dem methodischen Vorgehen in Bild 26 entsprechend, auch die quadratischen Mittenrauwerte S_q bzw. σ_{RMS}^h berechnet, um gemäß dem Parsevalschen Theorem den Vergleich mit den aus dem Frequenzraum ermittelten quadratischen Mittenrauwerten σ_{RMS}^q ziehen zu können. Die

Rauheits-Kenngrößen zeigen dabei einen linearen Zusammenhang mit einer Steigung von $m = 1.27$ (Bild 52, b).

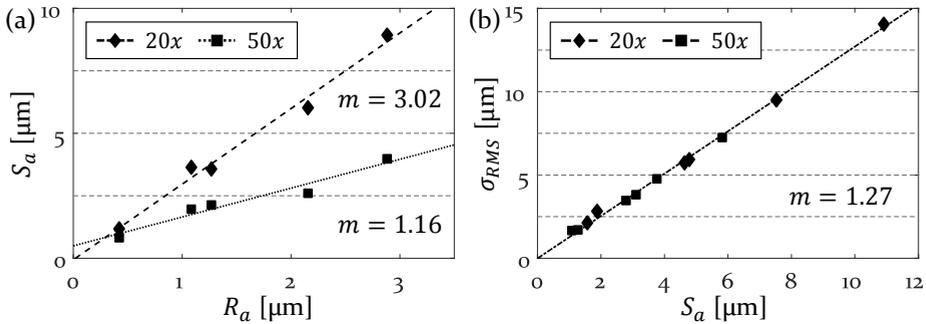


Bild 52: Gegenüberstellung des taktilen Mittenrauwers R_a zum optischen Mittenrauwert S_a (a) sowie des arithmetischen Mittenrauwers S_a zum quadratischen Mittenrauwert σ_{RMS} der optischen Messung (b)

Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit der Beziehung $R_q = \sqrt{\pi/2} R_a \cong 1.25 R_a$, die für eine Gaußsche Normalverteilung zutrifft. [113] Damit kann die aufgeprägte Rauheitsverteilung als nahezu normalverteilt angenommen werden.

Charakterisierung mittels Spektraler Leistungsdichte

Für eine fundierte Analyse der Oberflächengüte unter Berücksichtigung lateraler Effekte werden die in Kapitel 4.1.5 definierten Master-PSDs für die Substrate R1 bis R6 berechnet. Bild 53 zeigt die spektrale Leistungsdichte im doppeltlogarithmischen Maßstab. Für die Substrate mit niedriger Rauheit R1 und R2 ergibt sich über den gesamten Wellenzahlbereich eine konstante Steigung von $\alpha = -2.6$, die PSD-Kurve weicht lediglich bei hohen Wellenzahlen von der Geraden ab. Dieses Verhalten ist dem Rauschen des Messsystems geschuldet und wurde bereits in Kapitel 4 behandelt.

Der Pressprozess, der für die Substrate R3 – R6 durch eine Aufprägung mit Sandpapier der Korngrößen von $25.8 \mu\text{m} - 82.0 \mu\text{m}$ umgesetzt wird, generiert auf der Substratoberfläche laterale Strukturen, die in ihrer Ausprägung deutlich variieren und im Vergleich zu R1 und R2 zu einem starken Anstieg der spektralen Leistungsdichte PSD^{2D} führen. Die Erhöhung der Intensität betrifft dabei für alle Substrate R3 – R6 im Wesentlichen den Wellenzahlbereich $q \leq 0.1 \mu\text{m}^{-1}$. Der Kurvenverlauf für Wellenzahlen $q > 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ entspricht dem der Substrate R1 und R2. Aus der Grenzwellenzahl $q = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ ergibt sich über die Beziehung $\lambda = 2\pi/q$ eine Wellenlänge von etwa $60 \mu\text{m}$. Die verwendeten Substrate differieren somit

für laterale Strukturen in einem aus der Fourier-Analyse ermittelten Wellenlängenbereich ab $\lambda \geq 60 \mu\text{m}$. Die Grenzwellenlänge ist dabei größer als die verwendeten Korngrößen. Dies ist darin begründet, dass zum einen durch den Prägeprozess lateral deutlich breitere Strukturen auf den Substraten im Vergleich zu den Korngrößen erzeugt werden, zum anderen sind Wellenlängen ein Maß für die Periodizität von Strukturen und damit größer als die Strukturbreiten bzw. die entsprechenden Korrelationslängen. [117, 138] Die statistische Verteilung der Sandpartikel führt zudem zu einer Überlagerung der aufgeprägten Strukturen und begründet die breite Variation der spektralen Leistungsdichte PSD^{2D} im Wellenzahlbereich $q \leq 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ bzw. $\lambda \geq 60 \mu\text{m}$. Die PSD-Analyse identifiziert für die vorliegenden Substrate den Rauigkeitsbereich, der durch den Aufprägeprozess unter Verwendung von Sandpapier unterschiedlicher Korngrößen modifiziert wird.

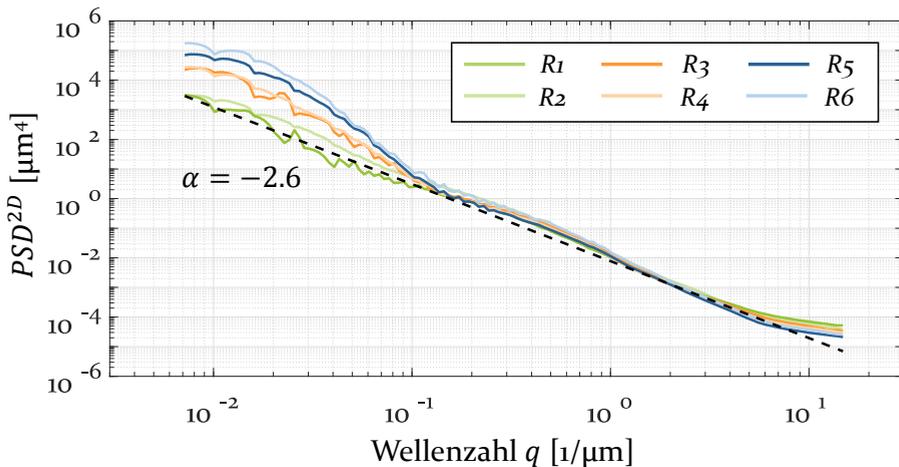


Bild 53: Spektrale Leistungsdichte für die Substrate R1 bis R6 mit der Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ und negativer Steigung $\alpha = -2.6$

Die Quantifizierung der Rauheit für die Substrate R1 – R6 erfolgt mit Hilfe der Standardabweichung σ_{RMS} , die sich gemäß Formel (4.20) direkt aus dem Integral der mit der jeweiligen Wellenzahl q gewichteten spektralen Leistungsdichte PSD^{2D} innerhalb vorgegebener Grenzen berechnen lässt.

In Bild 54 ist die quadratische Mittenrauheit σ_{RMS} für variable Wellenzahlbereiche q dargestellt: (a) für das Intervall $[q_{min} = 0.006 \mu\text{m}^{-1}, q]$ und (b) für das Intervall $[q, q_{max} = 15 \mu\text{m}^{-1}]$. Bei der Verwendung von $q_{min} = 0.006 \mu\text{m}^{-1}$ als untere Integrationsgrenze steigt die quadratische Mittenrauheit σ_{RMS} mit zunehmender Wellenzahl q in halblogarithmischer

Darstellung steil an und geht für Wellenzahlen $q > 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ in eine Sättigung über (Bild 54, a).

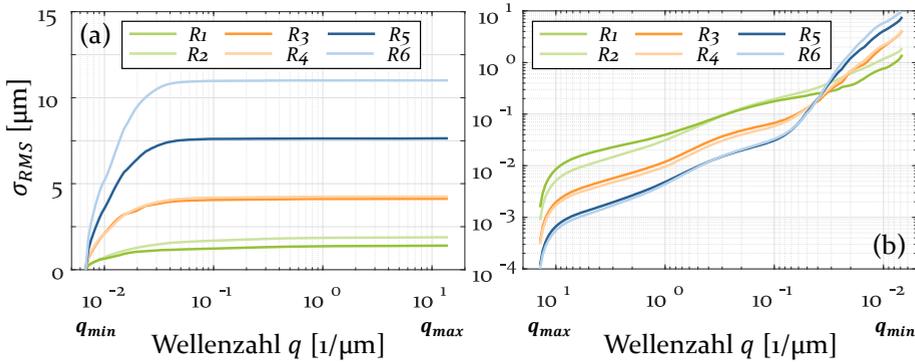


Bild 54: Oberflächenrauheit σ_{RMS} in Abhängigkeit der Wellenzahl q , berechnet aus der spektralen Leistungsdichte für das Intervall $[q_{min} = 0.006 \mu\text{m}^{-1}, q]$ (a) und für das Intervall $[q, q_{max} = 15 \mu\text{m}^{-1}]$ (b) für die Substrate R1 bis R6

Für die Betrachtung hoher Wellenzahlen in einem Intervall mit oberer Integrationsgrenze bei $q_{max} = 15 \mu\text{m}^{-1}$ ergibt sich im doppellogarithmischen Maßstab für alle Substrate zunächst eine geringe, aber kontinuierliche Zunahme für σ_{RMS} (Bild 54, b). Die dabei auftretende relative Verschiebung der PSD-Kurvenverläufe für R1 – R6 ist durch den jeweiligen Beitrag des hochfrequenten Rauschens bestimmt und sollte nicht überinterpretiert werden. Von Bedeutung ist allerdings die Änderung der Steigung von $\sigma_{RMS}(q)$ für die Substrate R3 – R6 bei einer Wellenzahl von ca. $0.1 \mu\text{m}^{-1}$. Für R1 und R2 lässt sich dagegen im Rahmen der statistischen Schwankungen kein Abknicken beobachten. Die Steigung $\sigma_{RMS}(q)$ im doppellogarithmischen Maßstab bleibt für diese beiden Substrate über den gesamten Wellenzahlbereich nahezu konstant.

Die aus dem Frequenzraum, d.h. aus den PSDs, berechneten Werte σ_{RMS}^q stimmen quantitativ mit den aus dem Ortsraum ermittelten quadratischen Mittenrauwerten σ_{RMS}^h überein. Das Parsevalsche Theorem ist damit erfüllt und bestätigt, dass die spektralen Leistungsdichten korrekt bestimmt sind. [112, 118]

5.2 Analyse von Leiterbahnen für aerosolbasierte Drucktechnologien

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Anwendung der in Kapitel 4.2 vorgestellten Methodik zur Analyse aerosolbasierter Leiterbahnen. In Abschnitt 5.2.1 werden hierzu die Leiterbahnquerschnitte, d.h. die Leiterbahnquerschnittsflächen, -breiten und -höhen bestimmt. In Abschnitt 5.2.2 wird die Leiterbahnkontur erfasst und in Abschnitt 5.2.3 der Overspray evaluiert. Für die Untersuchung der jeweiligen Kenngrößen wird die Anzahl an Leiterbahnschichten methodisch von eins bis zehn variiert. Der Einfluss der Substratrauheit auf die betrachteten Kenngrößen wird dabei im Detail analysiert. Zudem werden die Auswirkungen der statistischen Versuchsplanung, d.h. der Druckgeschwindigkeit v und des Düsenabstands d , ermittelt. Transportprozesse werden hierbei in allen Abschnitten charakterisiert und deren Effekt auf die einzelnen Kenngrößen diskutiert. Abschließend wird in Abschnitt 5.2.4 der spezifische Widerstand bestimmt und die Leiterbahnquerschnittsfläche, die Substratrauheit und deren Wechselwirkung als entscheidende Einflussfaktoren identifiziert.

5.2.1 Berechnung der Leiterbahnquerschnitte

Die Ergebnisse der Variation der Leiterbahnschichtanzahl für einen Düsenabstand d von 2 mm und einer Druckgeschwindigkeit v von 1000 mm/min (a) und 2000 mm/min (b) sind in Bild 55 dargestellt. Mit jeder Iteration, d.h. mit jeder weiteren Applikation funktionaler Tinte, nimmt die gesamte Querschnittsfläche zu. Dabei vergrößert sich bei steigender Schichtanzahl sowohl die Leiterbahnhöhe als auch die Leiterbahnbreite. Aufgrund der hohen Positionier- bzw. Wiederholgenauigkeit des verwendeten Drucksystems sowie der konstant gehaltenen Druckparameter lässt sich die Verbreiterung der Leiterbahn im Wesentlichen auf Fließprozesse der Tinte auf der Substratoberfläche nach der Abscheidung zurückführen. Die Leiterbahnbreiten liegen dabei in einem Bereich von 300 μm nach der ersten und bei 500 μm (a) beziehungsweise 400 μm (b) nach der zehnten Schicht. Die Leiterbahnhöhe nimmt bei halber Druckgeschwindigkeit entsprechend deutlich schneller mit jeder Schicht zu. Ab einer Leiterbahnhöhe zwischen 25 μm und 30 μm stellt sich bei einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min ein Sättigungseffekt ein und beschreibt damit die maximale Höhe, die mit der verwendeten Kombination von Substrat und Tinte erzielt werden kann.

Die abgebildeten und im weiteren Verlauf analysierten Leiterbahnquerschnitte repräsentieren jeweils eine geometrische Mittelung über 2238 Einzelquerschnitte an drei über die Leiterbahn verteilten Messausschnitten.

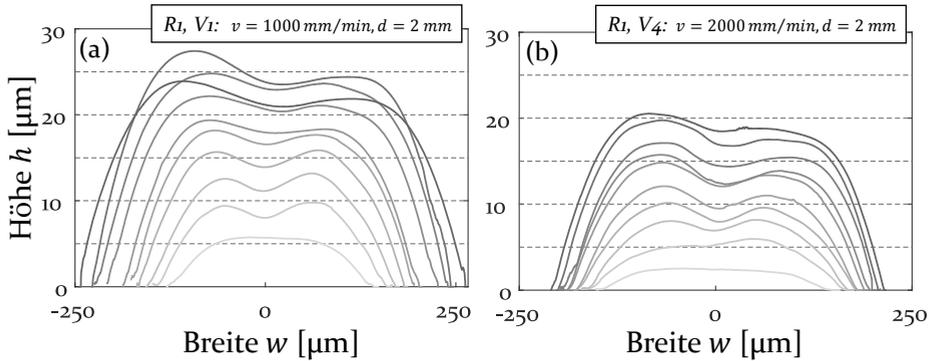


Bild 55: Leiterbahnquerschnitt in Abhängigkeit der Schichtanzahl (symbolisiert durch Grauwerte; Variation eins bis zehn von hell nach dunkel) für Substratmaterial R_1 , Düsenabstand 2 mm und Druckgeschwindigkeiten von (a) 1000 mm/min sowie (b) 2000 mm/min

In Bild 56 sind die drei Leiterbahnkenngrößen (Querschnittsfläche, -breite und -höhe) in Abhängigkeit von der Schichtanzahl dargestellt. In einem ersten Schritt werden hierbei nur die beiden Substratmaterialien mit den niedrigsten Oberflächenrauheiten R_1 und R_2 betrachtet, um den prinzipiellen Verlauf der Kenngrößen in Relation zur Schichtanzahl zu ermitteln. Für die Analyse werden die Korrelationskurven berechnet, die auf den geometrisch gemittelten Kenngrößen der beiden Substratmaterialien basieren.

Für die Querschnittsfläche ergibt sich dabei ein durch den Ursprung linear ansteigender Verlauf mit einer Steigung von $1052 \mu\text{m}^2$. Für die Leiterbahnbreite ergibt sich ebenfalls ein linearer Verlauf mit einer Steigung von $29,7 \mu\text{m}$ und einem y-Achsenabschnitt von $235 \mu\text{m}$. Es stellen sich somit in Abhängigkeit der Schichtanzahl Leiterbahnbreiten im Bereich von $265 \mu\text{m}$ bis $530 \mu\text{m}$ ein. Für die Leiterbahnhöhe wird generell nicht das absolute Maximum, sondern das 99 %-Quantil des Querschnittsprofils verwendet, da aufgrund der Querschnittskontur mehrere Maxima vorliegen können. Der Kurvenverlauf nähert sich asymptotisch einem Grenzwert zwischen $27 \mu\text{m}$ und $28 \mu\text{m}$.

Diese Limitierung in der Leiterbahnhöhe, die sich aus dem Zusammenspiel von Druckprozess und Substrat ergibt, kann im vorliegenden Fall mit zusätzlichen Schichten nicht übertroffen werden.

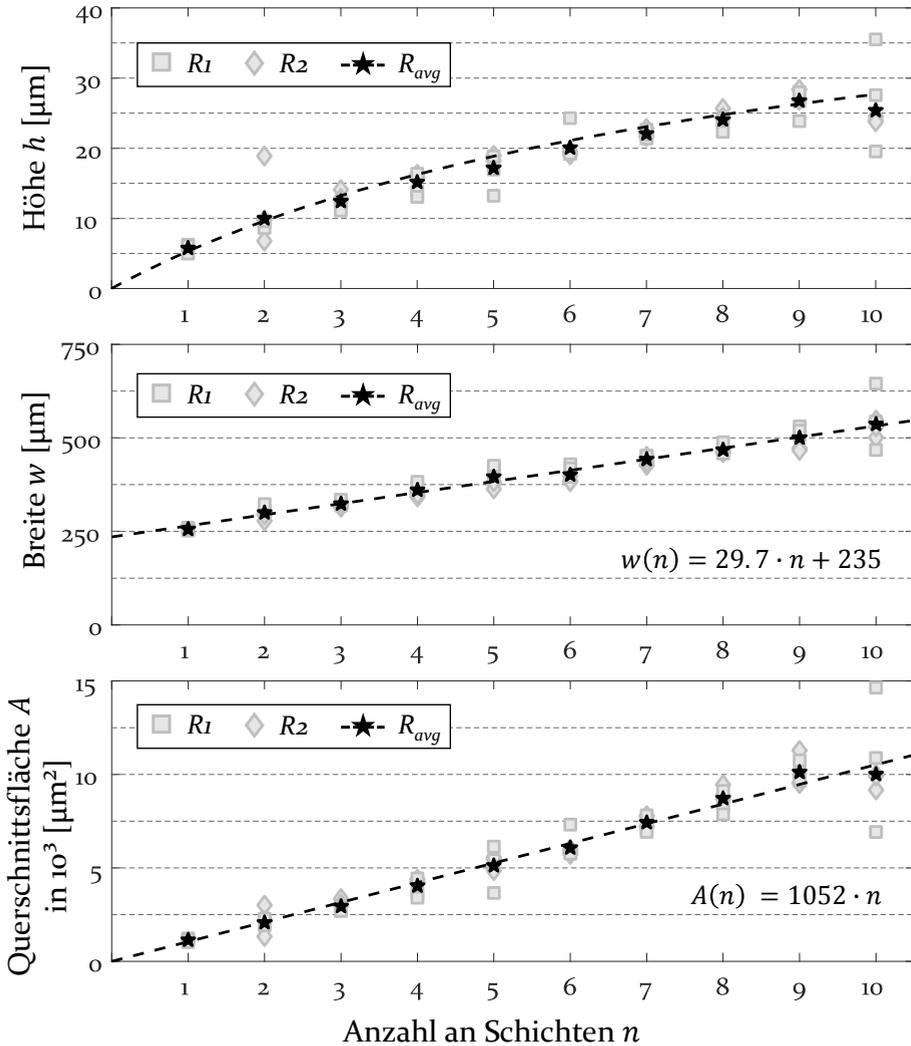


Bild 56: Querschnittsfläche, -breite und -höhe für die Substrate R1 und R2 sowie deren Mittelwert R_{avg} in Abhängigkeit der Anzahl an Schichten (Düsenabstand 2 mm, Druckgeschwindigkeit 1000 mm/min)

Einfluss der Substratrauheit auf die Druckqualität

Der Einfluss einer höheren Oberflächenrauheit auf den Leiterbahnquerschnitt kann anhand der Substrate R3 bis R6 aus Bild 57 entnommen werden.

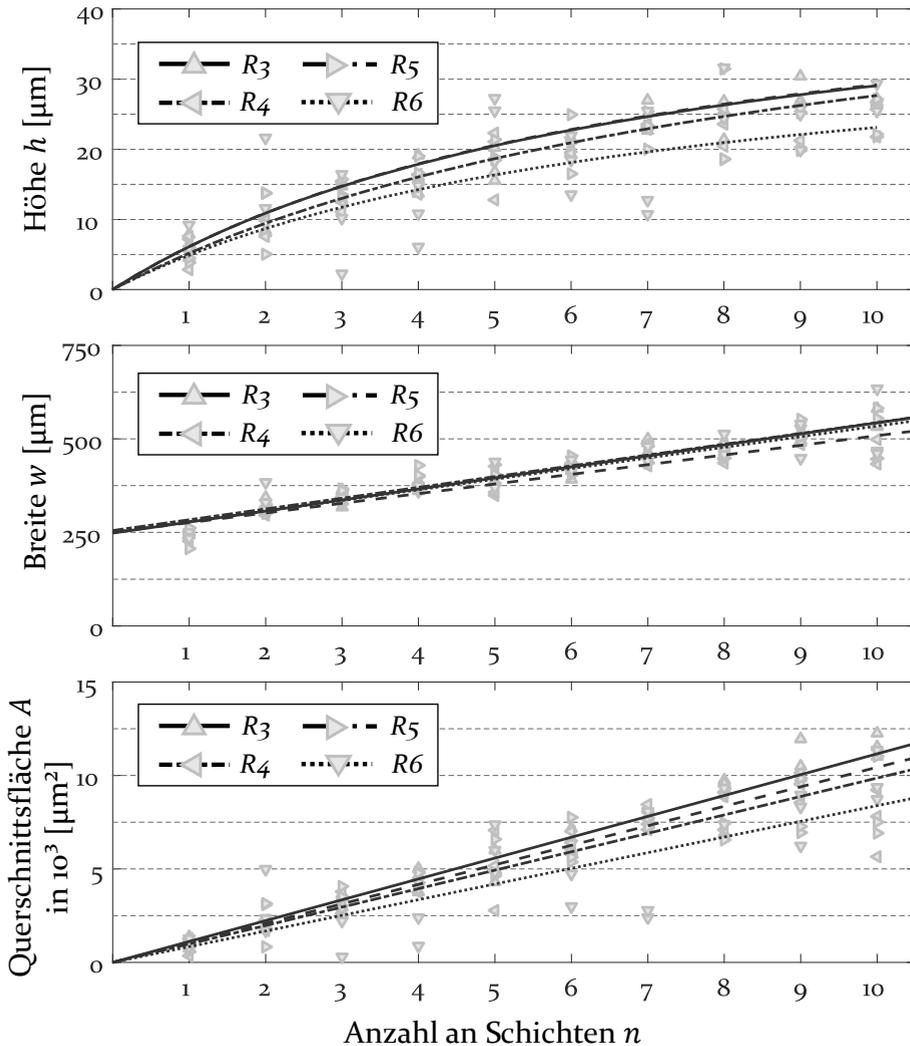


Bild 57: Querschnittsfläche, -breite und -höhe für die Substrate R3 bis R6 in Abhängigkeit der Anzahl an Schichten (Düsenabstand 2 mm, Druckgeschwindigkeit 1000 mm/min)

Die Korrelationen zeigen hierbei allesamt die im vorherigen Abschnitt beschriebenen prinzipiellen Kurvenverläufe, unterscheiden sich allerdings quantitativ teilweise deutlich. Die stärksten Effekte sind dabei für die Höhe

und die Querschnittsfläche der Leiterbahnen zu verzeichnen. Für die Querschnittsflächen ergeben sich mit zunehmender Substratrauheit geringere Geradensteigungen, die zudem mit einer erhöhten Streuung der Datengrundlage einhergehen. Diese hohe Varianz liegt auch für die Leiterbahnhöhe vor. Der Kurvenverlauf entspricht hierbei auch dem prinzipiellen, asymptotischen Verlauf. Die Steigungen der Kurven bei niedriger Schichtanzahl und die Grenzwerte der Leiterbahnhöhen fallen allerdings mit steigender Substratrauheit geringer aus. Die Kurvenverläufe der Leiterbahnbreite weisen alle dieselbe Abhängigkeit auf. Auswirkungen der Rauheit sind nicht ersichtlich.

Diese Ergebnisse sind konsistent mit der in Bild 38 schematisch aufgezeigten Gegenüberstellung zwischen gemessenem und realem Leiterbahnquerschnitt. Aufgrund der Tatsache, dass alle Substrate R₁ bis R₆ innerhalb einer Versuchsreihe (V₁ mit Düsenabstand $d = 2\text{ mm}$ und Druckgeschwindigkeit $v = 1000\text{ mm/min}$) bei konstanten Prozessparametern gedruckt werden, kann von einer homogenen Aerosolabscheidung ausgegangen werden. Das aufgebrachte Volumen und die daraus resultierende reale Querschnittsfläche müssen somit unabhängig von der Substratrauheit sein. Für die gemessene Querschnittsfläche ergeben sich allerdings stets geringere Werte, da die Grenzfläche zwischen Tinte und Substrat aufgrund des optischen Messprinzips nicht erfasst werden kann.

Eine quantitative Betrachtung ist in Bild 58 aufgeführt. Dabei sind für die Substrate R₁ bis R₆ die geometrischen Mittelwerte der berechneten Querschnittsfläche für zehn Schichten auf der primären y-Achse und die der Leiterbahnbreite auf der sekundären y-Achse gegen die aus den Master-PSDs ermittelten quadratischen Mittenrauwerte σ_{RMS} aufgetragen. Hierbei sei angemerkt, dass die entsprechenden Werte exemplarisch für zehn Schichten gewählt sind und repräsentativ für den Verlauf der Kenngrößen sind. Es ist zu erkennen, dass die Leiterbahnbreite unabhängig von der Substratrauheit ist. Die Leiterbahnhöhen verhalten sich wie die Leiterbahnquerschnittsflächen und sind aus Redundanzgründen nicht separat aufgeführt.

Für die Leiterbahnquerschnittsfläche ergibt sich zunächst ein konstanter Verlauf, größere Rauheitswerte führen allerdings zu einer deutlichen Abnahme der gemessenen Querschnittsflächen. Für Kenngrößen für deren Berechnung die Leiterbahnquerschnittsfläche erforderlich ist, wie unter anderem der spezifische Widerstand, sollte – soweit möglich – die Querschnittsfläche von Referenzproben desselben Substrats bei gleichzeitig höherer Oberflächengüte verwendet werden. Im vorliegenden Fall können

die Querschnittsflächen für die Substrate R1 bis R4 eingesetzt bzw. idealerweise ein extrapolierter Wert $\sigma_{RMS} \rightarrow 0$ verwendet werden.

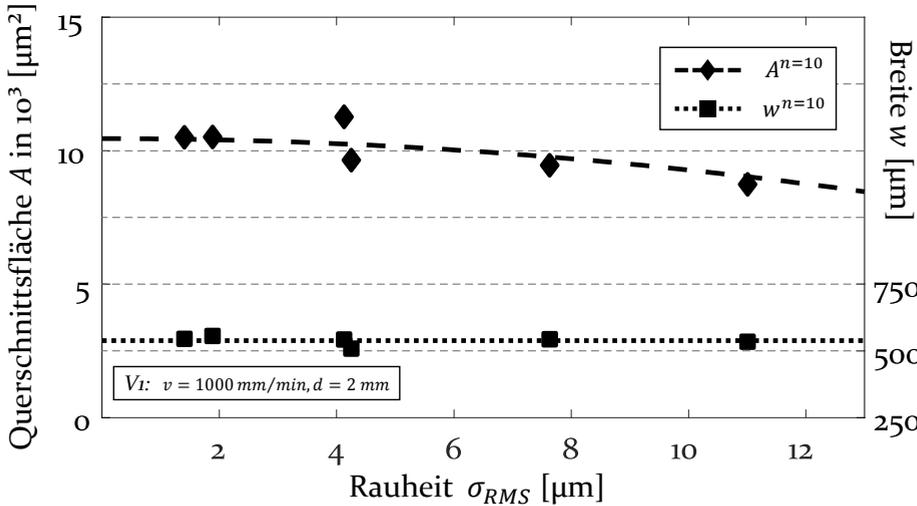


Bild 58: Gemessene Leiterbahnquerschnittsfläche und -breite nach zehn Schichten in Abhängigkeit der Substratrauheit (Düsenabstand 2 mm, Druckgeschwindigkeit 1000 mm/min)

Für eine schnelle Charakterisierung der Substrate und die Prüfung inwieweit die Leiterbahnquerschnittsfläche mittels Laserscannmikroskop verwendet werden kann, ist die taktile Messung gut geeignet. Aus dem für die verwendeten Substrate spezifischen, linearen Zusammenhang zwischen optischer und taktile Messung ergibt sich für die Umrechnung der quadratischen Mittenrauwerte der Master-PSD σ_{RMS}^q in die entsprechenden taktilen Mittenrauwerte R_a ein Faktor von 3.6 (siehe Bild 52). In Anlehnung an Bild 58 kann die Querschnittsfläche für eine Substratrauheit von $\sigma_{RMS} < 4 \mu\text{m}$ als nahezu konstant betrachtet werden. Somit errechnet sich für den taktilen Mittenrauwert ein Grenzwert von $R_a \approx 1 \mu\text{m}$.

Analyse von Druckgeschwindigkeit und Düsenabstand

Die bisherigen Ergebnisse wurden alle innerhalb einer Versuchsreihe erzielt. Im Folgenden werden der Düsenabstand d und die Druckgeschwindigkeit v gemäß Tabelle 1 variiert.

Bild 59 zeigt die für die Leiterbahnen gemessenen Querschnittsflächen, -breiten und -höhen für die Versuchsreihen V1 bis V4, bei denen der Düsenabstand auf 2 mm und 4 mm und die Druckgeschwindigkeit auf 1000 mm/min und 2000 mm/min eingestellt werden. Für die Auswertung

des DOE werden zunächst erneut nur die beiden Substrate R1 und R2 mit höherer Oberflächengüte betrachtet.

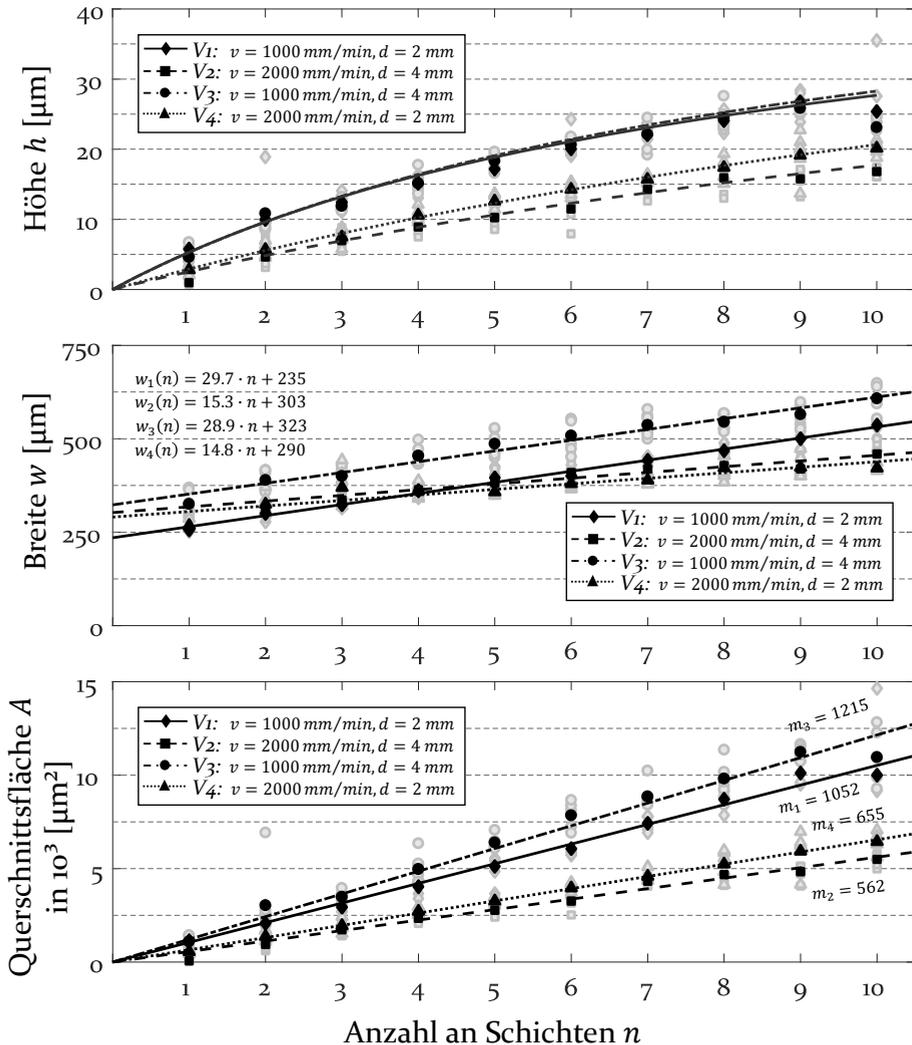


Bild 59: Querschnittsfläche, -breite und -höhe für die Substrate R1 und R2 in Abhängigkeit der Schichtanzahl n , der Variation des Düsenabstands d und der Druckgeschwindigkeit v

Für die Querschnittsfläche ergibt sich eine lineare Regression durch den Ursprung, für die Breite eine lineare Steigung mit y-Achsenabschnitt und für die Leiterbahnhöhe ein Anstieg mit einer Sättigung zwischen 27 μm und 28 μm . Die Sättigung der Leiterbahnhöhe stellt sich bei einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min, d.h. für die Versuchsreihen V1 und V3, unabhängig von dem gewählten Düsenabstand ein. In diesem Fall liegen

die Kurvenverläufe von V_1 und V_3 übereinander. Für die Versuchsreihen V_2 und V_4 mit einer höheren Druckgeschwindigkeit von 2000 mm/min ergeben sich keine Sättigungseffekte. Die Zunahme der Leiterbahnhöhe fällt dabei für einen Düsenabstand von 4 mm (V_2) geringer gegenüber 2 mm (V_4) aus.

Die Leiterbahnbreite nimmt bei einer niedrigeren Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1 und V_3) im Vergleich zu 2000 mm/min (V_2 und V_4) stärker zu, eine Erhöhung des Düsenabstands von 2 mm (V_1 und V_4) auf 4 mm (V_2 und V_3) führt zu einem Anstieg des y-Achsenabschnitts, allerdings in unterschiedlicher Ausprägung.

Die Querschnittsfläche weist generell für eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1 und V_3) gegenüber 2000 mm/min (V_2 und V_4) eine signifikant höhere Steigung auf. Ein Anstieg des Düsenabstands von 2 mm (V_1 und V_4) auf 4 mm (V_2 und V_3) zeigt allerdings einen widersprüchlichen Effekt in den Geradensteigungen. Diese Inkonsistenz ist auf die in Kapitel 2.4 beschriebene zeitliche Drift des Aerosolmassenstroms zurückzuführen. Deshalb ist neben der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Optimierung des Layouts zur Minimierung der Drift innerhalb einer Versuchsreihe die Versuchsdurchführung bewusst in der vorliegenden Reihenfolge gewählt worden, um systematischen Tendenzen für die weitere Auswertung extrahieren zu können.

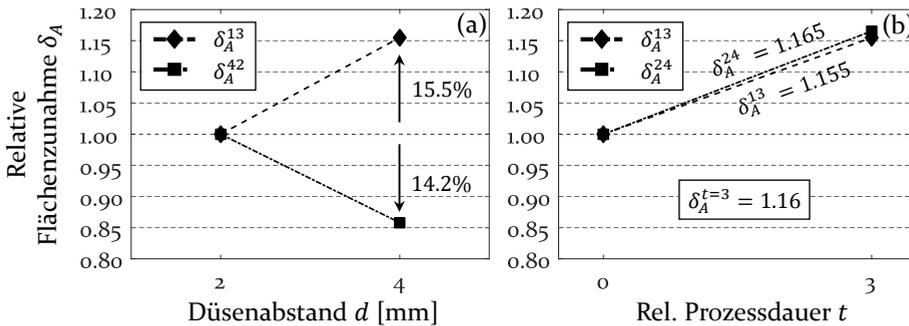


Bild 60: Relative Flächenzunahme δ_A in Abhängigkeit des Düsenabstands d (a) und in Abhängigkeit der Zeit t (b; dimensionslos, abgeleitet aus der Prozessdauer)

Um den Effekt der zeitlichen Drift des Aerosolmassenstroms zu verdeutlichen wurde die relative Flächenzunahme in Abhängigkeit des Düsenabstands bei konstanter Druckgeschwindigkeit aufgetragen (Bild 60, a). Die relative Flächenzunahme ergibt sich dabei als Quotient der jeweils betrachteten Steigungen der Querschnittsflächen, z.B. $\delta_A^{13} = m_3/m_1$ für die Änderung von V_1 zu V_3 . Eine Erhöhung des Düsenabstands von 2 mm

auf 4 mm ergibt bei einer Geschwindigkeit von 1000 mm/min eine relative Flächenzunahme von 15.5 % ($m_1 = 1052 \mu\text{m}^2$, $m_3 = 1215 \mu\text{m}^2$), bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 2000 mm/min sinkt diese jedoch um 14.2 % ($m_2 = 562 \mu\text{m}^2$, $m_4 = 655 \mu\text{m}^2$). Wird hingegen der zeitliche Bezug innerhalb der Versuchsreihe für die jeweiligen Druckgeschwindigkeiten und unabhängig vom Düsenabstand betrachtet, so ergeben sich die relativen Flächenzunahmen $\delta_A^{13} = 1.155$ und $\delta_A^{24} = 1.165$ (Bild 60, b). Dies resultiert in einem durchschnittlichen Zuwachs von 16 % über eine relative Prozessdauer t von drei dimensionslosen Zeiteinheiten, die sich aus der Druckgeschwindigkeit und der Drucksequenz ergeben. Unter der Annahme einer linearen zeitabhängigen Drift des Massenstroms [49] können die Querschnitte entsprechend korrigiert werden. Die Faktoren für die zeitliche Korrektur bezogen auf V_1 betragen 8 % für V_2 , 16 % für V_3 und 24 % für V_4 .

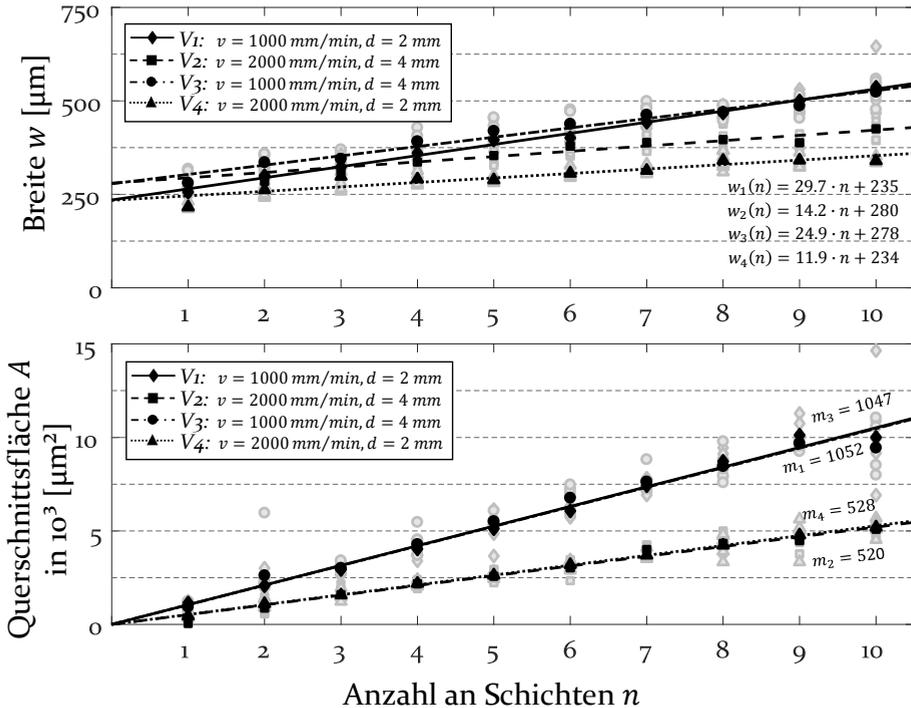


Bild 61: Querschnittsfläche und -höhe für die Substrate R1 und R2 in Abhängigkeit der Anzahl an Schichten n , der Variation des Düsenabstands d und der Druckgeschwindigkeit v nach Bereinigung der zeitabhängigen Drift des Aerosolmassenstroms

In Bild 61 sind die von der Drift des Massenstroms bereinigten Leiterbahnenkenngrößen angegeben. Die korrigierte Relation zwischen der Querschnittsfläche und der Schichtanzahl weist sowohl für eine Druck-

geschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1 und V_3) mit Werten von $1052 \mu\text{m}^2$ und $1047 \mu\text{m}^2$ als auch für eine Druckgeschwindigkeit von 2000 mm/min (V_2 und V_4) mit Werten von $528 \mu\text{m}^2$ und $520 \mu\text{m}^2$ jeweils nahezu identische Steigungen auf. Damit ist die Querschnittsfläche indirekt proportional zur Druckgeschwindigkeit und unabhängig vom Düsenabstand. Somit können die erwarteten Ergebnisse nachgewiesen und die zugrunde liegende Methodik validiert werden.

Für die Leiterbahnbreite ergibt sich ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen Steigung und Druckgeschwindigkeit. Für den Schnittpunkt mit der y -Achse zeigt sich nach der Driftbereinigung eine klare Abhängigkeit vom Düsenabstand, unabhängig von der Druckgeschwindigkeit. Dieser beträgt $235 \mu\text{m}$ für einen Düsenabstand von 2 mm (V_1 und V_4) und $280 \mu\text{m}$ für einen Düsenabstand von 4 mm (V_2 und V_3). Die Analyse der Leiterbahnhöhe liefert aufgrund des Sättigungseffekts keine weiteren Erkenntnisse und ist deshalb nicht erneut aufgeführt.

Einflussanalyse der Substratrauheit im Parameterraum des DOE

Im Folgenden wird evaluiert, inwieweit sich die in Bild 58 dargestellten Abhängigkeiten der gemessenen Leiterbahnquerschnitte von der Substratrauheit in dem untersuchten Parameterraum des DOE bestätigen. Hierzu werden in Bild 62 für die Substrate R_1 bis R_6 die geometrischen Mittelwerte der Querschnittsfläche gegen die aus den Master-PSDs ermittelten quadratischen Mittenrauwerte σ_{RMS} aufgetragen, allerdings erweitert auf alle vier Versuchsreihen ($V_1 - V_4$).

Es ist zu erkennen, dass sich die gemessene Querschnittsfläche für alle Versuchsreihen mit steigender Substratrauheit reduziert. Die Ergebnisse können dabei anhand ihrer Druckgeschwindigkeit beziehungsweise der daraus resultierenden Abscheidevolumina in zwei Cluster analog zu Bild 61 aufgeteilt werden. Für die beiden Gruppen mit $v = 1000 \text{ mm/min}$ (V_1 und V_3) sowie mit $v = 2000 \text{ mm/min}$ (V_2 und V_4) ergeben sich hierbei abfallende Kurvenverläufe mit einem zur Verfahrgeschwindigkeit indirekt proportionalen Achsenabschnitt. Die niedrige Streuung der Versuchsreihen untereinander verdeutlicht die Aussagekraft der Kurven. Das Bestimmtheitsmaß ist hierbei für die höhere Druckgeschwindigkeit von $v = 2000 \text{ mm/min}$ (V_2 und V_4) besonders hoch. Die gemessenen Querschnittsflächen in Abhängigkeit von der σ_{RMS} -Rauheit bestätigen dadurch die zuvor getroffenen Aussagen. Selbiges gilt für die Leiterbahnbreiten, deren Verlauf analog Bild 58 für alle Versuchsreihen unabhängig von der Substratrauheit ist und deshalb nicht erneut graphisch dargestellt wurde.

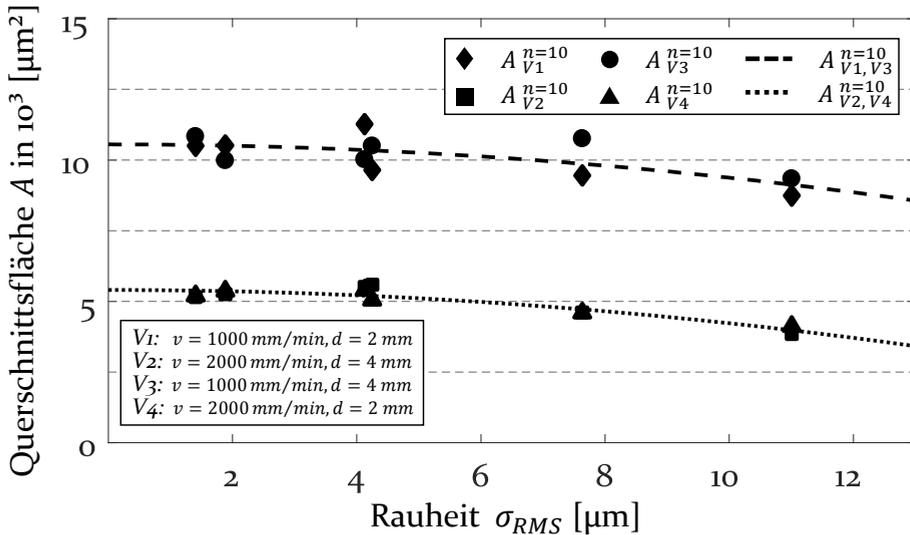


Bild 62: Gemessene Querschnittsfläche der Leiterbahnen nach zehn Schichten in Abhängigkeit von der Substratrauheit für alle vier Versuchsreihen (V1 bis V4) des DOE

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die quantitative Abhängigkeit der gemessenen Querschnittsfläche von der Substratrauheit nur für die vorliegende Studie und die betrachteten wellenzahlabhängigen Rauigkeitskomponenten der PSD-Kurven (Bild 53) in der strengen Form Gültigkeit besitzt. Es sollte jedoch stets beachtet werden, dass der Anstieg der Substratrauheit zu einer messbedingten Reduzierung der Leiterbahnquerschnittsfläche führt, da die Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterbahn nicht erfasst werden kann. Die Analyse der Leiterbahnen unter Berücksichtigung der Grenzflächenschicht wurde in der Literatur nicht detailliert untersucht. [29, 14, 13] Gerade im Hinblick auf die Evaluierung des spezifischen Widerstands ist diese von entscheidender Bedeutung und wird in Kapitel 5.2.4 im Detail behandelt.

Transportprozesse: Glättung der Leiterbahnoberfläche

Die Problematik bei der Bestimmung der Querschnittsfläche in Abhängigkeit der Substratrauheit sowie die daraus resultierende Abweichung gemessener und realer Werte lässt sich mit Hilfe der spektralen Leistungsdichte erklären. Der Vergleich der wellenzahlabhängigen Rauigkeitskomponenten von Substrat und Leiterbahn ermöglicht eine exakte Bewertung des Glättungsprozesses und damit verbunden auch Rückschlüsse auf das Fließverhalten funktionaler Tinten nach der Aerosolabscheidung auf der Substratoberfläche.

Liegt kein Fließverhalten vor und die Substratrauheit entspricht der der Leiterbahnoberfläche, so kann die reale Querschnittsfläche aus diesen Ergebnissen abgeleitet werden. Finden allerdings Fließprozesse statt, so wird die Substratoberfläche geglättet und Aussagen über die Grenzfläche sind auf dieser Datenbasis nicht möglich.

In Bild 63 ist die spektrale Leistungsdichte der Substrat- und Leiterbahnoberfläche, aufgeschlüsselt nach der Schichtanzahl, aufgetragen. Die Auswertung bezieht sich dabei auf die geometrisch gemittelten Werte der Substrate mit niedriger Rauheit R₁ und R₂ über alle Versuchsreihen V₁ bis V₄.

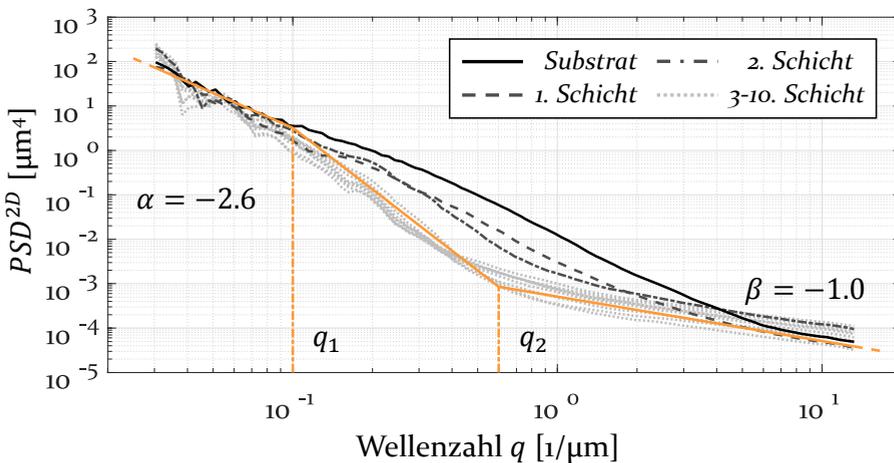


Bild 63: Spektrale Leistungsdichte ohne Abscheidung und nach 1 - 10 Schichten, geometrisch gemittelt über die Substrate R₁ und R₂ und die Versuchsreihen V₁ bis V₄ sowie die Beziehungen $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit $\alpha = -2.6$ und $PSD(q) \sim q^\beta$ mit $\beta = -1.0$

Für den Kurvenverlauf des Substrats stellt sich, wie bereits in Bild 53 dargestellt, eine Abhängigkeit $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit einer über den gesamten Wellenzahlbereich konstanten Steigung von $\alpha = -2.6$ ein. Mit zunehmender Aerosolabscheidung nimmt die Intensität der spektralen Leistungsdichte für Wellenzahlen größer q_1 ab, die Rauigkeit sinkt und die Substratoberfläche wird geglättet. Dieser Effekt ist vor allem für Aerosolabscheidungen ausgehend vom initialen Zustand der Substratrauheit bis hin zur dritten Schicht markant und bleibt danach für die weiteren Schichten 4 - 10 nahezu konstant.

Gemäß der schematischen Darstellung in Bild 40, liegt für Wellenzahlen größer q_2 vollständige Glättung vor. Die spektrale Leistungsdichte folgt dabei im doppeltlogarithmischen Maßstab einer negativen Steigung von $\beta = -1$ und resultiert somit in einer Abhängigkeit von $PSD(q) \sim q^{-1}$.

Dieses Verhalten identifiziert viskoses Volumenfließen als dominanten Transportprozess. [128]

Die PSD-Analyse zeigt, dass eine Aerosolabscheidung zu einem Glättungsprozess der Substrate führt und somit die Oberflächenrauigkeit reduziert. Demzufolge ermöglicht die Charakterisierung der gedruckten Leiterbahnen mittels Laserscanmikroskop keine Rückschlüsse auf die Grenzfläche zwischen Substrat und funktionaler Tinte. Dies bedeutet auch, dass die Abweichung der gemessenen von der realen Querschnittsfläche, die sich aufgrund des tatsächlich abgeschiedenen Aerosolvolumens ergeben würde, nicht auf Basis einer einzelnen Messung, sondern nur im Zuge einer Versuchsreihe mit Substraten unterschiedlicher Oberflächenrauheit ermittelt werden kann.

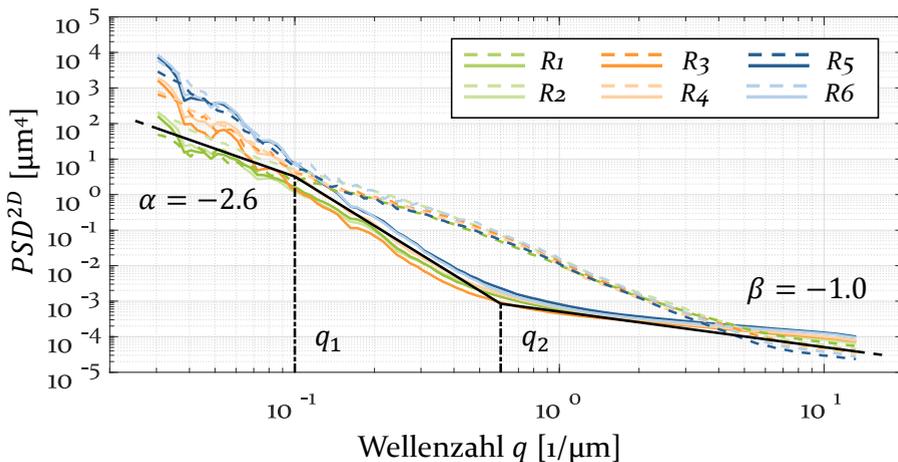


Bild 64: Spektrale Leistungsdichte für die Substrate R1 bis R6 ohne Abscheidung und nach einer Abscheidung von 4 – 10 Schichten, jeweils gemittelt für die Versuchsreihen V1 bis V4 sowie die Beziehungen $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit $\alpha = -2.6$ und $PSD(q) \sim q^\beta$ mit $\beta = -1.0$

Inwieweit der Glättungsprozess von der Substratrauigkeit beeinflusst wird, zeigt Bild 64. Hier sind die spektralen Leistungsdichten für die Substrate R1 bis R6 sowie die entsprechenden Kurvenverläufe der Leiterbahnoberfläche gemittelt über die Schichten 4 bis 10 zusammengefasst. Alle Werte beziehen sich dabei auf die Versuchsreihen V1 bis V4.

Die Substrate mit niedriger Rauheit R1 und R2 zeigen erneut die konstante Steigung von $\alpha = -2.6$ über den gesamten Wellenzahlbereich. Die Substrate R3 – R6 folgen ebenfalls diesem Kurvenverlauf für Wellenzahlen $q > 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ und weichen im Wesentlichen nur im Wellenzahlbereich $q \leq 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ ab (siehe Bild 53).

Mit zunehmender Aerosolabscheidung nimmt die Intensität der spektralen Leistungsdichte der Leiterbahnoberfläche aller Substrate R₁ – R₆ für Wellenzahlen größer q_1 ab. Der Kurvenverlauf für Wellenzahlen größer q_2 weist erneut eine negative Steigung von $\beta = -1$ auf. Diese Abhängigkeit von $PSD(q) \sim q^{-1}$ trifft für alle Substrate zu. Tendenziell liegen die PSD-Kurven der Leiterbahnoberflächen für die Substrate R₅ und R₆ marginal über denen der Substrate R₁ bis R₄, folgen dann allerdings dem gleichen Kurvenverlauf. Im Wellenzahlbereich $q \leq 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ ergeben sich dagegen keine signifikanten Änderungen bei den Kurvenverläufen mit und ohne Abscheidung. Die verschiedenen Intensitätsniveaus der Substrate R₁ – R₆ bleiben bestehen. Der Wellenzahl $q_2 = 0.6 \mu\text{m}^{-1}$ entspricht über die Beziehung $\lambda = 2\pi/q$ eine äquivalente Wellenlänge von $\lambda_2 = 10 \mu\text{m}$ bis zu der eine komplette Glättung der Oberfläche nach Abscheidung von mindestens 3 - 4 Schichten erreicht wird. Bei dieser Schichtanzahl liegt die Leiterbahnhöhe im Bereich von $10 \mu\text{m}$. Eine partielle Glättung findet zwischen q_2 und q_1 mit einer Wellenzahl von $q_1 = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ und einer Wellenlänge von $\lambda_1 = 63 \mu\text{m}$ statt.

Die PSD-Analyse ermöglicht eine detaillierte Bewertung der Ergebnisse und zeigt, dass die Differenzierung in der Rauigkeit der Substrate, die durch den Aufprägeprozess generiert wurden, in einem Rauigkeitsbereich liegen, der vom Glättungsprozess nicht betroffen ist. Eine Aussage über die Intensität des Glättungsprozesses auf im hochfrequenten Bereich variierende Substratrauigkeiten kann deshalb im vorliegenden Fall nicht getroffen werden.

5.2.2 Bewertung der Leiterbahnkontur

Ein ideales Drucksystem würde unter der Prämisse eines uniformen Aerosolstrahls Leiterbahnen mit einer klar definierten Randkontur erzeugen. In der Realität differieren gedruckte Leiterbahnen allerdings teilweise erheblich vom idealen Zustand [16, 64] und weisen, wie in Bild 43 dargestellt, eine Variation der Leiterbahnkontur auf. Eine exakte Analyse der Line Edge Roughness und die Evaluierung der Einflussfaktoren ermöglicht dabei die Optimierung des Drucksystems und daraus abgeleitet die Reduzierung der Leiterbahnabstände innerhalb des Drucklayouts. Die Auswertung kann dabei sowohl im Ortsraum als auch im Frequenzraum durchgeführt werden.

Einfluss der Substratrauheit auf die Druckqualität

Die relative Positionsabweichung der Leiterbahnkontur vom Mittelwert lässt sich im Ortsraum gut in Form eines Histogramms darstellen. Die Standardabweichung σ sowie die Halbwertsbreite können dabei als Maß für die Güte der Randkontur verwendet werden. Je geringer diese Werte ausfallen, umso besser ist die Qualität der Leiterbahnen. Bild 65 zeigt die Histogramme der LER für die Substrate R₁ (a) und R₆ (b) für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1). Als Datenbasis für die Erstellung der Histogramme werden jeweils alle zehn Variationen der Schichtanzahl in dreifacher Ausführung, d.h. insgesamt 30 Einzelmessungen herangezogen.

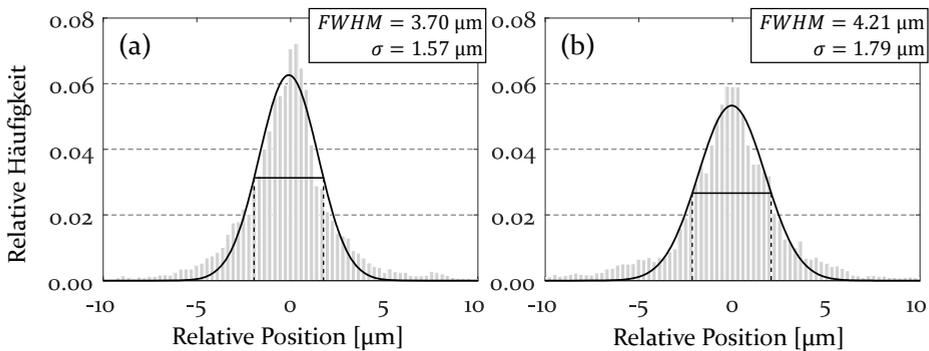


Bild 65: Relative Häufigkeitsverteilung der Line Edge Roughness für die Substrate R₁ (a) und R₆ (b) für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min

Die Häufigkeitsverteilungen lassen sich dabei sehr gut durch Gaußsche Normalverteilungen beschreiben. Die Standardabweichungen σ ergeben sich zu $\sigma = 1.57 \mu\text{m}$ für das Substrat R₁ mit der niedrigsten Oberflächenrauigkeit und zu $\sigma = 1.79 \mu\text{m}$ für das Substrat R₆ mit der höchsten Oberflächenrauigkeit. Die entsprechenden Halbwertsbreiten (FWHM) sind $3.70 \mu\text{m}$ und $4.21 \mu\text{m}$. Damit ist die Variation der Line Edge Roughness über die gesamte Bandbreite der untersuchten Substratrauigkeiten hinweg vergleichsweise gering.

Die Analyse der spektralen Leistungsdichte, die in Kapitel 4.1.4 eingeführt und deren Anwendung für die Randkontur in Kapitel 4.2.2 ausführlich beschrieben wurde, ermöglicht eine detailliertere Aussage unter Berücksichtigung lateraler Strukturen. In Bild 66 sind dazu die spektralen Leistungsdichten der gemittelten Randkonturen für die Substrate R₁ – R₆ für die Versuchsreihe V_1 mit einem Düsenabstand von 2 mm und einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min dargestellt. Für alle Kurvenverläufe bilden jeweils 30 Einzelmessungen die Datengrundlage.

Alle PSD^{1D} -Kurven der Leiterbahnkonturen auf den Substraten R1 – R6 zeigen über einen weiten Wellenzahlbereich einen nahezu identischen Verlauf. Dies gilt für den Kurvenverlauf im Wellenzahlbereich $q > 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ und insbesondere für $q > 1 \mu\text{m}^{-1}$, in dem alle Kurven der Beziehung $PSD(q) \sim q^{-2}$ folgen. Für Wellenzahlen $q \leq 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ weicht die spektrale Leistungsdichte der Randkonturen auf den Substraten R5 und R6 mit den höchsten Oberflächenrauigkeiten ab und zeigt eine leicht erhöhte Intensität. Wellenzahlen kleiner $0.1 \mu\text{m}^{-1}$ entsprechen über die Beziehung $\lambda = 2\pi/q$ Wellenlängen größer $60 \mu\text{m}$. Dies deckt sich mit den Lichtbildern der Mikroskopaufnahmen, bei denen für R5 und R6 teilweise Formabweichungen der Leiterbahnen mit lateralen Ausprägungen größer $100 \mu\text{m}$ erkennbar sind.

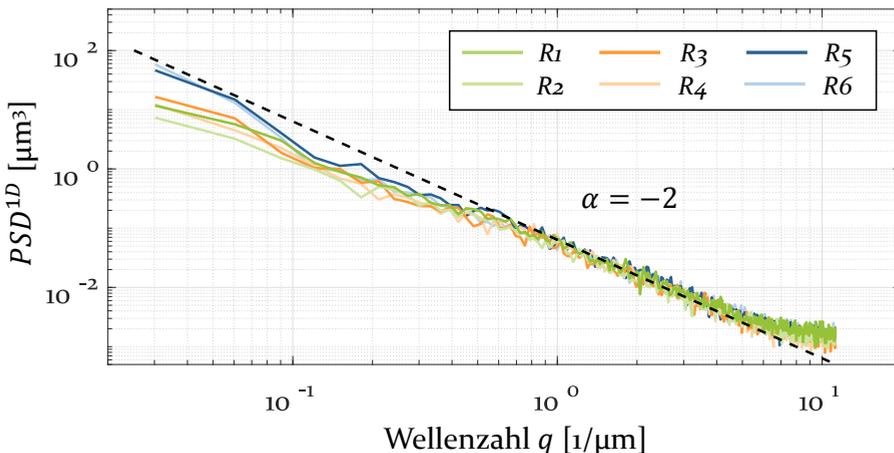


Bild 66: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für die Substrate R1 – R6 für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min sowie die Beziehung $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit negativer Steigung $\alpha = -2$

Die Flächen unter den PSD^{1D} -Kurven, die direkt der Varianz σ^2 entsprechen (vgl. Formeln (4.12) – (4.14)), stimmen dabei mit den Werten der Standardabweichungen σ der Substrate R1 und R6 aus den Histogrammen im Ortsraum (Bild 65) überein. Die Ergebnisse aus dem Orts- und Frequenzraum sind somit konsistent. Der Wellenzahlbereich, der zu den geringen Unterschieden in der Line Edge Roughness führt, kann mit Hilfe der PSD^{1D} -Kurven identifiziert und auf Wellenzahlen kleiner $0.1 \mu\text{m}^{-1}$ zurückgeführt werden.

Analyse von Druckgeschwindigkeit und Düsenabstand

Die bisherigen Ergebnisse zur Auswertung der Leiterbahnkontur beziehen sich auf die Datengrundlage der ersten Versuchsreihe V₁. Für eine erweiterte Betrachtung des Parameterraums und einer daraus abgeleiteten Bewertung der Einflussfaktoren werden im Folgenden die Ergebnisse des DOE mit einer variierenden Kombination aus Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit beschrieben.

Bild 67 gibt einen Überblick über die Line Edge Roughness für alle vier Versuchsreihen V₁ – V₄ des DOE, dargestellt in Histogrammen mit repräsentativen Normalverteilungskurven und bezogen auf R₁. Die Datenbasis für alle Histogramme stellen jeweils die zuvor genannten 30 Einzelmessungen jeder Probe dar. Die kleinste Standardabweichung von $\sigma = 1.57 \mu\text{m}$ ergibt sich für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V₁). Eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min auf 2000 mm/min führt bei einem konstanten Düsenabstand von 2 mm zu einem Anstieg auf $\sigma = 2.16 \mu\text{m}$ (V₄).

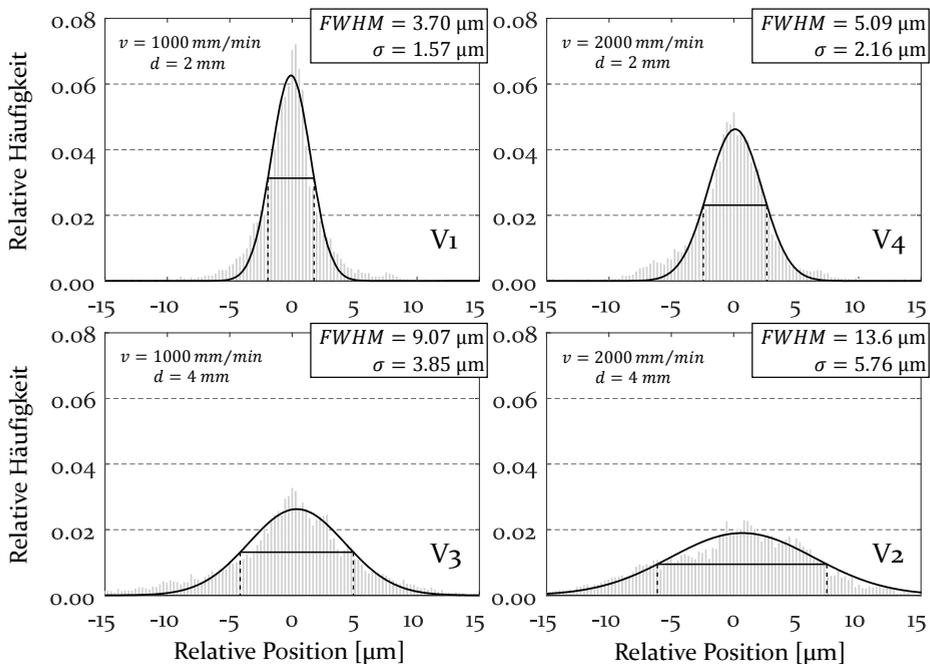


Bild 67: Relative Häufigkeitsverteilung der Line Edge Roughness für das Substrat R₁ bei den verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe V₁ – V₄

Ein wesentlich deutlicherer Effekt ergibt sich für einen größeren Düsenabstand von 4 mm. In diesem Fall steigen die entsprechenden Standardabweichungen für die beiden Druckgeschwindigkeiten auf $\sigma = 3.85 \mu\text{m}$ (V_3) bzw. $\sigma = 5.76 \mu\text{m}$ (V_2). Somit führt die Erhöhung des Düsenabstands von 2 mm auf 4 mm zu einem, bezogen auf die Standardabweichung σ , durchschnittlichen Anstieg der Line Edge Roughness von 250 %. Der Einfluss der Druckgeschwindigkeit fällt demgegenüber geringer aus und bewegt sich im Bereich zwischen 40 % und 50 %.

Die beiden Parameter Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit, die im Rahmen des DOE untersucht werden, zeigen gegenüber der zuvor beschriebenen Analyse der Substratrauigkeiten von $R_1 - R_6$ einen deutlich größeren Einfluss auf die Ausprägung der Line Edge Roughness.

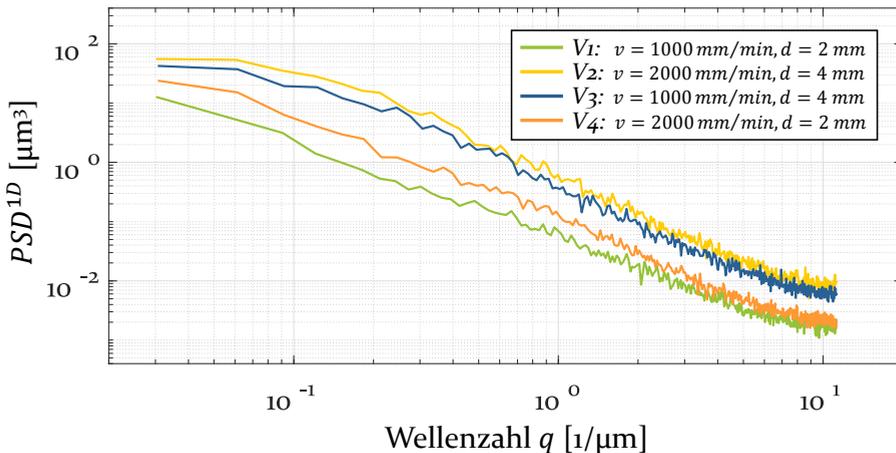


Bild 68: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für das Substrat R_1 bei den verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe $V_1 - V_4$

In Bild 68 sind entsprechend zu Bild 67 die spektralen Leistungsdichten der gemittelten Randkonturen auf derselben Datenbasis für die Versuchsreihen $V_1 - V_4$ zusammengefasst. Die vier PSD^{1D} -Kurven spannen einen relativ großen Intensitätsbereich auf. Konsistent mit den Ergebnissen der Histogramme liegt die PSD^{1D} -Kurve für einen Düsenabstand von 2 mm und einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1) auf dem niedrigsten Intensitätsniveau. Die Reihenfolge der ansteigenden Line Edge Roughness kann die im Ortsraum abgeleitete Sequenz von V_1 über V_4 zu V_3 und V_2 bestätigen. Dabei ist ebenfalls der markante Anstieg der Intensität für eine Erhöhung des Düsenabstands von 2 mm auf 4 mm zu erkennen.

Die über einen weiten Wellenzahlbereich parallelen Kurvenverläufe bestätigen gleiche Mechanismen der Line Edge Roughness auf unterschiedlichen Intensitätsniveaus. Eine detaillierte Auswertung ist an dieser Stelle allerdings nicht möglich, denn die Mittelung über alle Schichten, die die Datengrundlage für die Analyse der Einflussfaktoren bildet, führt zu einem hohen Informationsverlust. Eine differenzierte Betrachtung der Schichtanzahl und damit der Transportprozesse, die für das Verständnis des Druckprozesses von hoher Bedeutung ist, wird im Folgenden thematisiert.

Transportprozesse: Glättung der Leiterbahnkontur

Aerosolbasierte Druckprozesse initiieren Fließverhalten auf der Substratoberfläche. Dabei fließt die Silbertinte in den Kantenbereich der Leiterbahn, vergrößert deren Breite und definiert eine neue Leiterbahnkontur. Mit zunehmender Schichtanzahl verstärkt sich dieser Effekt. Die Glättung der Leiterbahnoberfläche steht somit in einem direkten Zusammenhang mit der Glättung der Leiterbahnkontur. Für letztere liegt allerdings ein prinzipieller Unterschied vor. Wie in Kapitel 4.2.2 diskutiert, wird neben der Glättung der Leiterbahnkontur diese auch parallel durch den erneuten Schichtauftrag geprägt.

Für die Evaluierung des Glättungsprozesses muss die Analyse der Leiterbahnkontur schichtabhängig erfolgen. Dies ist allerdings mit einem Verlust an statistischer Genauigkeit verbunden. Deshalb wird als Kompromiss zwischen Informationstiefe und statistischer Genauigkeit eine Aufspaltung in drei Gruppen mit niedriger ($n = 1 - 3$), mittlerer ($n = 4 - 6$) und hoher ($n = 7 - 9$) Schichtanzahl angewendet. Gleichzeitig erfolgt eine Mittelung über alle Substrate R1 - R6, um die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu verbessern. Dies ist aufgrund des geringen Einflusses der Substratraueheit auf die LER (Bild 65 und Bild 66) möglich.

Bild 69 zeigt die Analyse der Line Edge Roughness im Ortsraum für eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min und einen Düsenabstand von 2 mm (V1, a) sowie für einen Düsenabstand von 4 mm (V3, b). In beiden Fällen ist eine Reduktion der Standardabweichung σ bei steigender Schichtanzahl zu erkennen. Die Glättungseffekte fallen dabei für die Versuchsreihe V1 mit einem geringen Abstand von Aerosolquelle bzw. Druckdüse zu Substrat deutlich stärker aus. Mit Hilfe der Häufigkeitsverteilungen kann bereits die glättende Wirkung weiterer Leiterbahnschichten bewiesen werden. Dies bedeutet, dass sich durch den Fließprozess Randkonturen mit einer niedrigeren Line Edge Roughness gegenüber der primär gedruckten Leiterbahn einstellen.

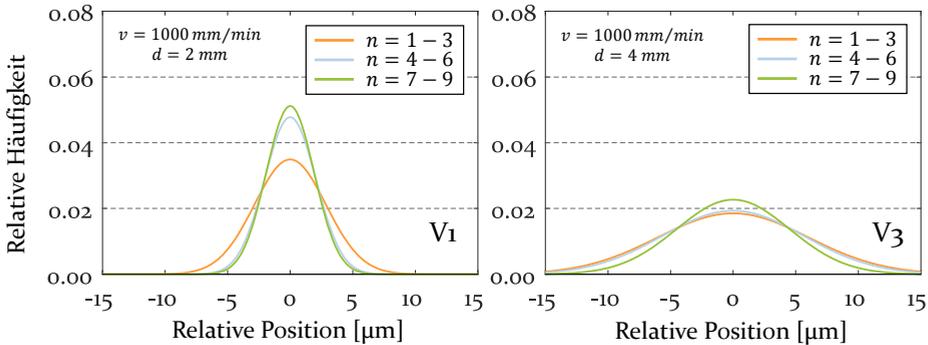


Bild 69: Relative Häufigkeitsverteilung der Line Edge Roughness für die Substrate R1 – R6 bei unterschiedlicher Anzahl an abgeschiedenen Schichten n für die Versuchsreihe V₁ mit $d = 2 \text{ mm}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$ (links) und V₃ mit $d = 4 \text{ mm}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$ (rechts)

Für eine Betrachtung der wellenzahlabhängigen Komponenten sind die spektralen Leistungsdichten der LER bei unterschiedlicher Anzahl an abgeschiedenen Schichten für eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min und einen Düsenabstand von 4 mm in Bild 70 sowie für einen Düsenabstand von 2 mm in Bild 71 dargestellt.

In Bild 70 verlaufen die PSD^{1D} -Kurven parallel, das Niveau der Intensität nimmt allerdings mit zunehmender Anzahl an Schichten geringfügig ab. Die gestrichelte Linie spiegelt dabei den theoretischen Kurvenverlauf aus Bild 24 wider. Für niedrige Wellenzahlen ergibt sich ein konstanter Wert, der bei höheren Schichtanzahlen niedriger ausfällt. Für hohe Wellenzahlen stellt sich eine Abhängigkeit $PSD(q) \sim q^\alpha$ mit einer konstanten, negativen Steigung von $\alpha = -2$ ein. Der Schnittpunkt beider Geraden definiert die Korrelationswellenzahl q_k und trennt korrelierte von nicht korrelierten Wellenzahlbereichen.

Die beobachtete Abhängigkeit der PSD-Kurven für Wellenzahlen größer q_k mit einer negativen Steigung von $\alpha = -2$ wurde ebenfalls im Bereich der Lithographie in Folge umfangreicher Untersuchungen als typischer Verlauf der LER charakterisiert. [119] Für diesen Spezialfall kann die Korrelationslänge L_k analytisch aus der Korrelationswellenzahl q_k gemäß der Relation $L_k = 1/q_k$ berechnet werden. [139] Die Korrelationslänge L_k differenziert dabei, inwieweit zwei Positionen auf der Randkontur im Mittel korreliert sind oder nicht. Eine Korrelation liegt vor, falls der laterale Abstand kleiner als die Korrelationslänge L_k ist. [117, 138].

Im vorliegenden Fall mit einer Korrelationswellenzahl $q_k = 0.085 \mu\text{m}^{-1}$ errechnet sich die Korrelationslänge zu $L_k = 11.8 \mu\text{m}$. Dies bedeutet, dass für die Leiterbahnkontur bei den gewählten Druckparametern laterale Strukturen mit einer Ausdehnung von $11.8 \mu\text{m}$ und kleiner korreliert sind.

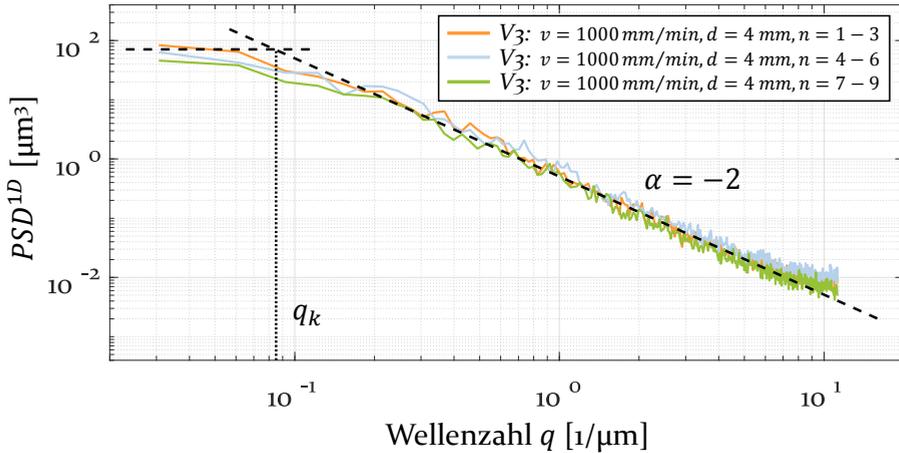


Bild 70: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für einen Düsenabstand von 4 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_3) bei unterschiedlicher Anzahl an abgeschiedenen Schichten n

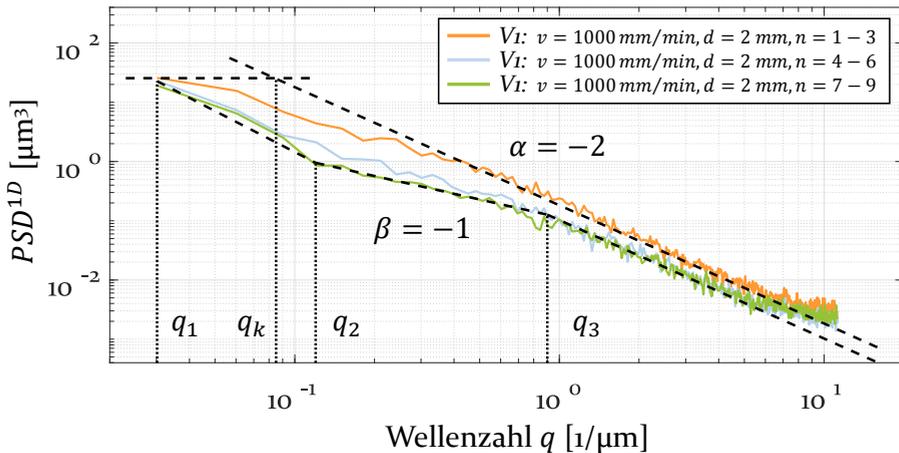


Bild 71: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für einen Düsenabstand von 2 mm und eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1) bei unterschiedlicher Anzahl an abgeschiedenen Schichten n

Der Glättungsprozess zeigt in Bild 71 für einen geringen Düsenabstand von 2 mm deutlich stärkere Ausprägungen. Auch hier liegen die PSD-Kurven

mit zunehmender Anzahl an Schichten auf niedrigeren spektralen Intensitätsniveaus. Die Kurvenverläufe weichen allerdings im Vergleich zu den in Bild 70 dargestellten im Bereich niedriger Wellenzahlen deutlich von der Relation $PSD(q) \sim q^{-2}$ ab.

Die Kurvenverläufe zeigen damit die beiden Ausprägungen des Glättungsprozesses, die sich auf die Leiterbahnkontur auswirken können, zum einen ein Absenken des Intensitätsniveaus der PSD-Kurven, zum anderen eine geringere Steigung. Beide Glättungsprozesse führen zu einer absoluten Reduktion des LER, ihre jeweilige Ausprägung ist dabei von der Leiterbahnbreite und dem Durchmesser des Aerosolstrahlkegels auf Höhe der Substratebene abhängig. Für die Leiterbahnbreite, die im Normalfall geringer als der maximale Aerosolstrahlkegel ist, bildet sich mit jeder weiteren Schicht eine neue, statistisch normalverteilte Leiterbahnkante. Aufgrund der gegen die Ränder des Aerosolstrahlkegels reduzierten Intensität an Aerosolpartikeln nimmt die absolute LER und damit das Niveau der PSD-Kurve ab. Wellenzahlbereiche, die nicht mehr durch einen erneuten Aerosolpartikelaufrag abgedeckt werden und bereits geglättet sind, zeigen sich in der PSD-Kurve durch eine reduzierte Steigung.

Beide Ausprägungen der Glättung werden für den PSD-Kurvenverlauf für eine hohe Schichtanzahl von $n = 7 - 9$ deutlich. Hierbei sinkt das Intensitätsniveau der Geraden mit Steigung $\alpha = -2$ durch eine Reduktion der Aerosolintensität gegen die Ränder des Aerosolstrahlkegels. Zudem ändert sich der Kurvenverlauf ab einer Wellenzahl von $q_3 = 0.9 \mu\text{m}^{-1}$, bei der die Steigung im doppeltlogarithmischen Maßstab von $\alpha = -2$ auf $\beta = -1$ übergeht. Für Wellenzahlen $q < q_3$ ergibt sich somit zusätzlich eine Glättung der Randkontur durch viskoses Fließen von Silbertinte in den Bereich der Randkontur.

Das bedeutet, dass für Wellenzahlen im Bereich $q < q_3$ die viskosen Volumenfließprozesse der Leiterbahn ebenfalls die Randkontur beeinflussen und eine signifikante Glättung bewirken. Unabhängig davon folgt die PSD-Kurve für $q > q_3$ weiterhin der Relation $PSD(q) \sim q^{-2}$, verursacht durch eine parallele Aufbringung neuer Aerosolpartikel. Die Summe beider Prozesse führen gemeinsam zur Formierung einer neuen Leiterbahnkontur und zu den in Bild 71 dargestellten PSD-Kurven.

Dieses Verhalten deckt sich sehr gut mit den in Bild 45 beschriebenen schematischen Kurvenverläufen und bestätigt somit die zugrunde liegende Modellvorstellung. Dabei folgen die PSD-Kurven für einen Düsenabstand von 4 mm (Bild 70) für niedrige Schichtanzahlen $n = 1 - 3$ dem Verlauf in Bild 45 (a) und zeigen für höhere Schichtanzahlen $n = 7 - 9$ den Übergang

zu Bild 45 (b). Die PSD-Kurven für den kleineren Düsenabstand von 2 mm (Bild 71) verlaufen bereits für niedrige Schichtanzahlen $n = 1 - 3$ gemäß Bild 45 (b) und gehen für höhere Schichtanzahlen $n = 7 - 9$ zum Schema in Bild 45(c) über.

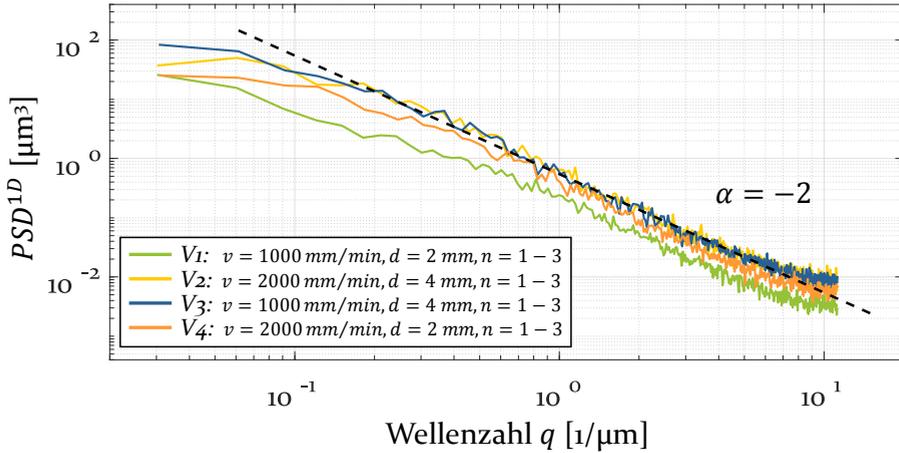


Bild 72: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für die verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe $V_1 - V_4$ bei einer niedrigen Anzahl an abgeschiedenen Schichten $n = 1 - 3$

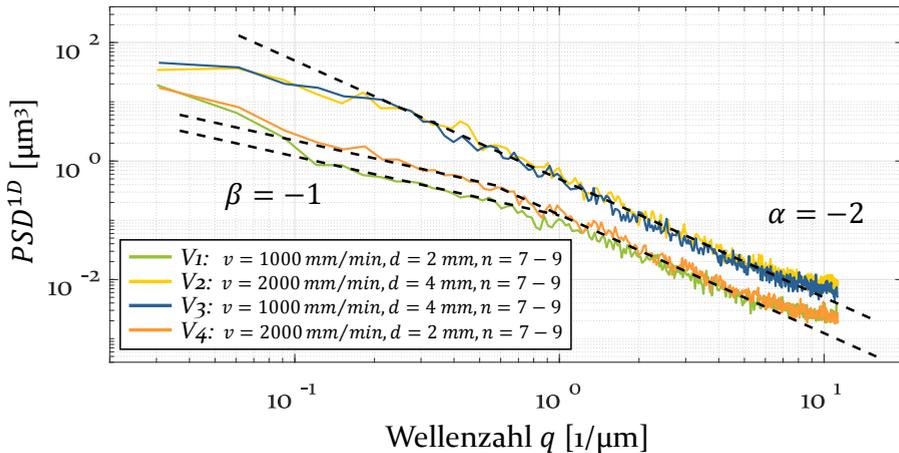


Bild 73: Spektrale Leistungsdichte der gemittelten Randkonturen für die verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit der DOE Versuchsreihe $V_1 - V_4$ bei einer hohen Anzahl an abgeschiedenen Schichten $n = 7 - 9$

Die bisherigen Analysen der Randkontur haben gezeigt, dass die dominierenden Einflussfaktoren die des DOE sind. Um die Effekte des Glättungsprozesses auch in Bezug auf die verschiedenen Kombinationen von Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit zu verdeutlichen, werden die PSD-Kurven für alle Versuchsreihen $V_1 - V_4$ bei niedriger Schichtanzahl $n = 1 - 3$ in Bild 72 und bei hoher Schichtanzahl $n = 7 - 9$ in Bild 73 zusammengefasst.

Für niedrige Schichtanzahlen $n = 1 - 3$ (Bild 72) weicht lediglich die PSD-Kurve mit einem Düsenabstand von 2 mm und einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min (V_1) bereits bei höheren Wellenzahlen von der Relation $PSD(q) \sim q^{-2}$ ab, während alle weiteren PSD-Kurven (V_2, V_3 und V_4) vergleichbar zur Darstellung in Bild 70 verlaufen.

Für hohe Schichtanzahlen $n = 7 - 9$ (Bild 73) zeichnen sich zwei Gruppen deutlich ab: Für einen Düsenabstand von 4 mm (V_2 und V_3) verlaufen die PSD-Kurven vergleichbar zu der Darstellung in Bild 70. Die beiden Kurven mit einem Düsenabstand von 2 mm (V_1 und V_4) weichen beide bei einer Wellenzahl von $q_3(V_1) = 1 \mu\text{m}^{-1}$ und $q_3(V_4) = 0.6 \mu\text{m}^{-1}$ von der Relation $PSD(q) \sim q^{-2}$ ab und gehen in eine Abhängigkeit $PSD(q) \sim q^{-1}$ über.

Zusammenfassend lassen sich zwei Kernaussagen für die PSD-Analyse der Randkontur ableiten:

- Abnahme in der **Steigung**: Identifiziert Transportprozesse und definiert Wellenzahlbereiche in denen Glättungsprozesse stattfinden
- Abnahme im **Niveau**: Identifiziert einen Rückgang in der Rauigkeit der Randkontur sowie in der Intensität des Oversprays

Damit erschließt sich ein umfassendes Bild für das Verhalten der Randkontur in Bezug auf den Düsenabstand und die Druckgeschwindigkeit sowie die Substratrauigkeit und die Schichtanzahl.

5.2.3 Evaluierung des Oversprays

Der Overspray wird durch den Anteil des Aerosolpartikelaufrags neben der Leiterbahnkontur definiert, bei dem keine direkte Verbindung zur Leiterbahn besteht. Bedingt durch das viskose Fließen der funktionalen Silbertinte in Richtung der Kantenbereiche verbreitert sich die Leiterbahn. Dadurch werden neue Bereiche, die zuvor dem Overspray zugeordnet wurden, Teil der Leiterbahn – eine neue Leiterbahnkontur formiert sich. Damit ist das Verhalten des Oversprays direkt an das der Leiterbahnkontur gebunden: Je höher die Rauigkeit der Leiterbahnkontur ist, umso größer ist die Ausprägung des Oversprays – beziehungsweise umgekehrt – je stärker die Glättung der Leiterbahnkontur ausfällt, d.h. umso größer q_3 (siehe Bild 71), umso stärker wird die Intensität des Oversprays reduziert. Im Folgenden wird der Overspray quantitativ charakterisiert und der Einfluss der verschiedenen Versuchsparameter untersucht. Im Anschluss erfolgt die Analyse der Auswirkungen von Transportprozessen auf den Overspray.

Einfluss der Substratrauheit auf die Druckqualität

Eine quantitative Auswertung des Oversprays für die Substrate unterschiedlicher Rauigkeit R_1 – R_6 zeigt keine Unterschiede in den Ergebnissen – der Overspray ist unabhängig von der Substratrauheit. Auf eine graphische Darstellung wurde an dieser Stelle verzichtet.

Analyse von Druckgeschwindigkeit und Düsenabstand

In Bild 74 ist der Overspray in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit (a) und vom Düsenabstand (b) dargestellt. Als Maßzahl für die Ausprägung und Bewertung des Oversprays dient dabei der Abstand zur Leiterbahnkontur, bei der, wie in Bild 46 beschrieben, die Intensität des Oversprays unter einen bestimmten Grenzwert fällt. Für diese und die folgenden Graphiken wurde ein Grenzwert von fünf Prozent verwendet. Für einen konstanten Düsenabstand (a) liegt die Ausdehnung des Oversprays bei einer Druckgeschwindigkeit von 2000 mm/min mit Werten von 38 μm und 84 μm um jeweils 20 % – 25 % höher als für eine Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min mit Werten von 30 μm und 70 μm . Bei einer konstanten Druckgeschwindigkeit (b) ist der Overspray für einen Düsenabstand von 4 mm (70 μm und 84 μm) um einen Faktor von 2.2 – 2.3 höher als bei 2 mm (30 μm und 38 μm).

Die relativen Änderungen des Oversprays in Abhängigkeit der DOE-Parameter sind vergleichbar zu den Ergebnissen der Leiterbahnkontur und bestätigen die wechselseitige Beziehung der beiden Kenngrößen.

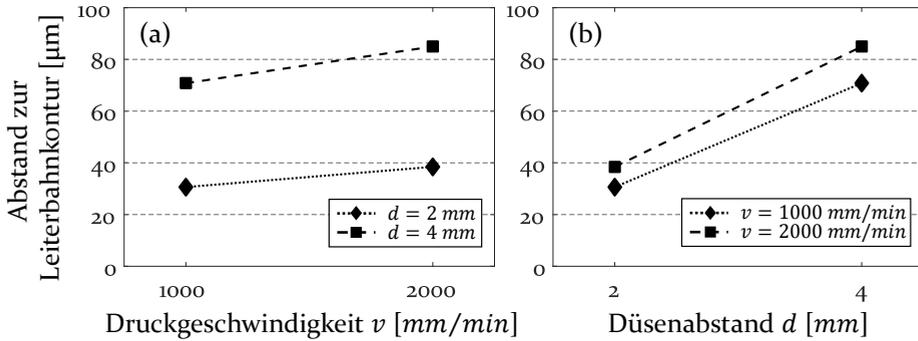


Bild 74: Overspray (Abstand zur Leiterbahnkontur bei einer Intensität von fünf Prozent) in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit (a) und vom Düsenabstand (b)

Transportprozesse: Einfluss auf den Overspray

Der Einfluss des Glättungsprozesses der Randkontur auf den Overspray kann mit Hilfe einer schichtabhängigen Analyse evaluiert werden. Bild 75 liefert einen Überblick über die Intensitätsverteilung des Oversprays in Abhängigkeit vom Abstand zur Leiterbahnkontur und in Abhängigkeit von der Schichtanzahl für alle vier Versuchsreihen $V_1 - V_4$. Die Variation der Schichten von eins bis zehn innerhalb der einzelnen Versuchsreihen ist in Graustufen dargestellt - von hell nach dunkel entspricht dies einem sukzessiven Anstieg der Schichtanzahl.

Wie zuvor beschrieben zeigt die Versuchsreihe V_1 mit einem Düsenabstand von 2 mm und einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min die niedrigste Intensität an Overspray. Darüber hinaus ist eine deutliche Abhängigkeit der Intensitätskurvenverläufe von der Schichtanzahl zu erkennen. Je höher die Schichtanzahl umso niedriger fällt der Overspray sowohl in Intensität als auch in Ausdehnung aus. Eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min auf 2000 mm/min führt bei konstantem Düsenabstand von 2 mm (V_4) zu keiner Änderung in der Kurvenssequenz. Während sich bei einer geringen Schichtanzahl marginale Unterschiede zeigen, ergeben sich dagegen für eine hohe Anzahl an abgeschiedenen Aerosolschichten deutlich höhere Intensitäten und eine größere Ausdehnung des Oversprays für V_4 im Vergleich zu V_1 . Diese Unterschiede sind auf die abgeschiedene Aerosolmenge zurückzuführen, die sich mit einer Änderung der Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min auf 2000 mm/min

halbiert. Die Ergebnisse der Schichten 1 - 10 von V_4 müssen somit mit denen der Schichten 1 - 5 von V_1 verglichen werden, dabei zeigt sich ein zueinander konsistentes Verhalten.

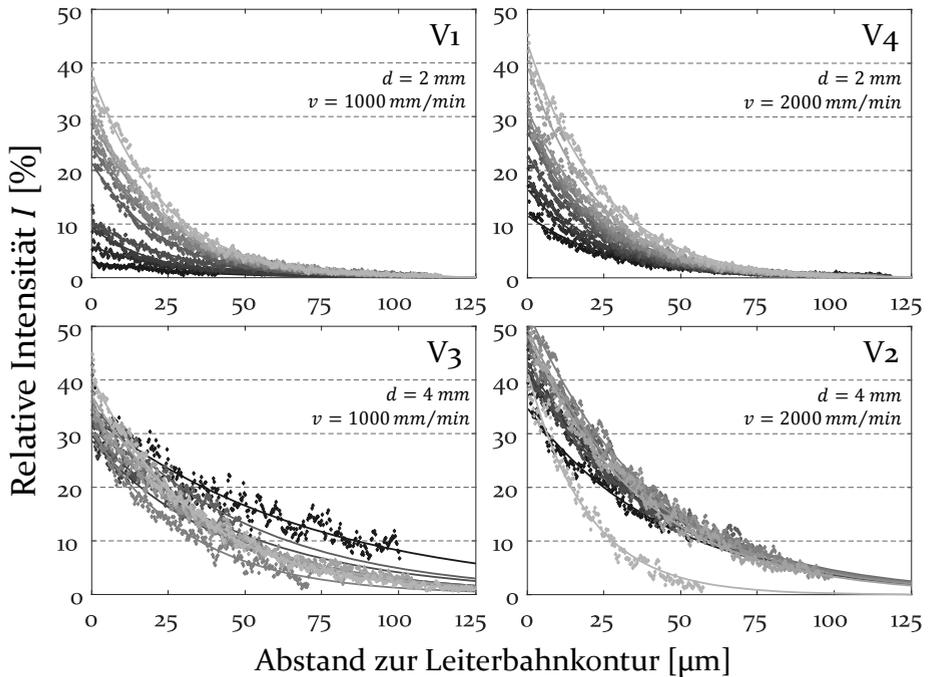


Bild 75: Entwicklung des Oversprays mit steigender Schichtanzahl (Variation eins bis zehn von hell nach dunkel), dargestellt für die verschiedenen Versuchsreihen des DOE ($V_1 - V_4$)

Ein differierendes Verhalten mit einer markant höheren Ausdehnung des Oversprays ergibt sich für einen Düsenabstand von 4 mm für die beiden Versuchsreihen V_3 und V_2 mit einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min und 2000 mm/min. Dabei sind keine klaren Tendenzen der Kurven mit einer Zunahme der Schichtanzahl zu erkennen. Im Rahmen der statistischen Streuung bleiben sowohl die Intensität als auch die Ausdehnung des Oversprays auf einem vergleichbaren Niveau.

Die hier gezeigten Ergebnisse bestätigen das in Kapitel 4.2.3 vorgestellte Modellverständnis zum Overspray – die Intensität des Oversprays kann als Flanke einer Gaußschen Normalverteilung in Abhängigkeit des Abstands zur Leiterbahnkontur beschrieben werden. Mit zunehmender Schichtanzahl reduzieren Glättungsprozesse der Leiterbahnkontur den Overspray. Gleichzeitig wird mit jeder weiteren Schicht erneut Overspray appliziert.

Die Sequenz der Kurvenverläufe kann dabei in unterschiedlichen Reihenfolgen resultieren, je nachdem wie sich die Änderung der Leiterbahnweite im Vergleich zur Ausdehnung des Aerosolstrahlkegels verhält.

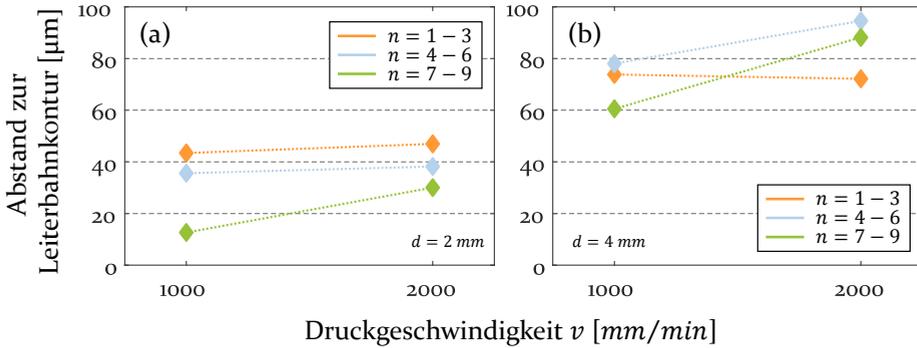


Bild 76: Abhängigkeit des Oversprays (Abstand zur Leiterbahnkontur bei einer Intensität von fünf Prozent) vom Düsenabstand (a: 2 mm, b: 4 mm) und von der Druckgeschwindigkeit bei variierender Anzahl an abgeschichteten Schichten n

Einen quantitativen Überblick über den Einfluss der Schichtanzahl n liefert Bild 76, in der der Overspray in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit für die beiden Düsenabstände 2 mm (a) und 4 mm (b) aufgetragen ist. Analog der Analyse der Randkontur wird auch hier eine Aufspaltung in drei Gruppen mit niedriger ($n = 1 - 3$), mittlerer ($n = 4 - 6$) und hoher ($n = 7 - 9$) Schichtanzahl verwendet, um einen praktikablen Kompromiss zwischen Granularität der Ergebnisse und statistischer Signifikanz zu erreichen.

Der größte Effekt zeigt sich für den Düsenabstand. Die Ausdehnung des Oversprays fällt für 2 mm (a) deutlich geringer als für 4 mm (b) aus. Der Overspray nimmt bei einem Düsenabstand von 2 mm kontinuierlich von niedriger ($n = 1 - 3$) zu hoher Schichtanzahl ($n = 7 - 9$) ab. Die Ergebnisse für den Düsenabstand von 4 mm zeigen hingegen keine klaren Tendenzen und bestätigen das Fazit aus Bild 75.

In Bild 77 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Form eines Spinnendiagramms dargestellt. Gegenüber Bild 76 sind neben den Ergebnissen der Einzelversuche auch die errechneten Mittelwerte für den Düsenabstand und die Druckgeschwindigkeit angegeben. Die farbigen Flächen beschreiben die Gruppen mit niedriger ($n = 1 - 3$), mittlerer ($n = 4 - 6$) und hoher ($n = 7 - 9$) Schichtanzahl. Die Asymmetrie veranschaulicht das unterschiedliche Verhalten des Oversprays bzgl. der beiden Parameter Düsenabstand und Druckgeschwindigkeit. In Abhängigkeit des

Drucklayouts, der Leiterbahnabstände und der Geometrie des Grundkörpers kann auf dieser Basis eine Optimierung der Prozesszeit unter Berücksichtigung des minimal notwendigen Druckabstands realisiert werden.

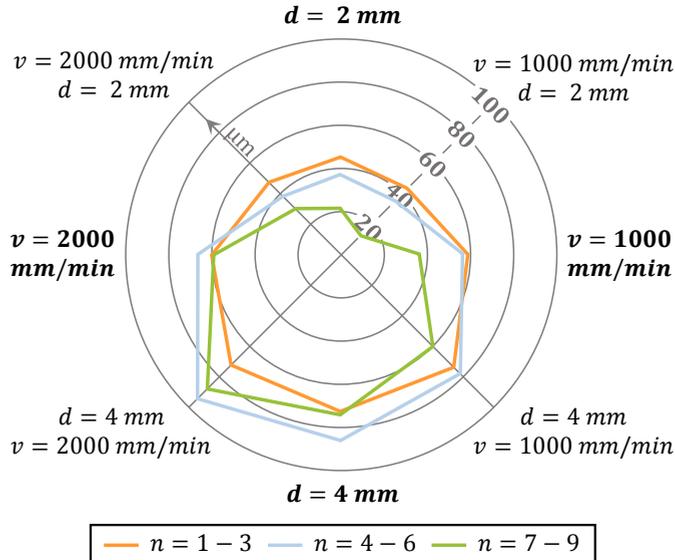


Bild 77: Overspray (Abstand zur Leiterbahnkontur bei einer Intensität von fünf Prozent, eingezeichnet bis $100\ \mu\text{m}$) in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit v , dem Düsenabstand d und der Anzahl an abgeschiedenen Schichten n

5.2.4 Ermittlung des spezifischen Widerstands

Im Folgenden wird der Einfluss der Substratrauheit auf den gemessenen Widerstand analysiert. Dies erfolgt anhand der drei in Kapitel 4.2.4 vorgestellten Kenngrößen, dem Widerstand pro Längeneinheit ζ und den spezifischen Widerständen ρ_m und ρ_r bezogen auf die gemessenen und real abgeschiedenen Leiterbahnquerschnittsflächen A_m und A_r . Die Evaluierung erfolgt dabei über die gesamte Versuchsreihe des DOE.

Widerstand pro Längeneinheit

Die Auswertung der gemessenen Widerstände erfolgt anhand von Kurvenverläufen, die sich aus der Korrelation mit der Schichtanzahl n ergeben. Dies ermöglicht die Mittelung über zehn Messpunkte und reduziert den Fehler einzelner Messungen. Somit ergibt sich über alle Versuchsreihen hinweg für jede Substratrauheit ein charakteristischer Kurvenverlauf.

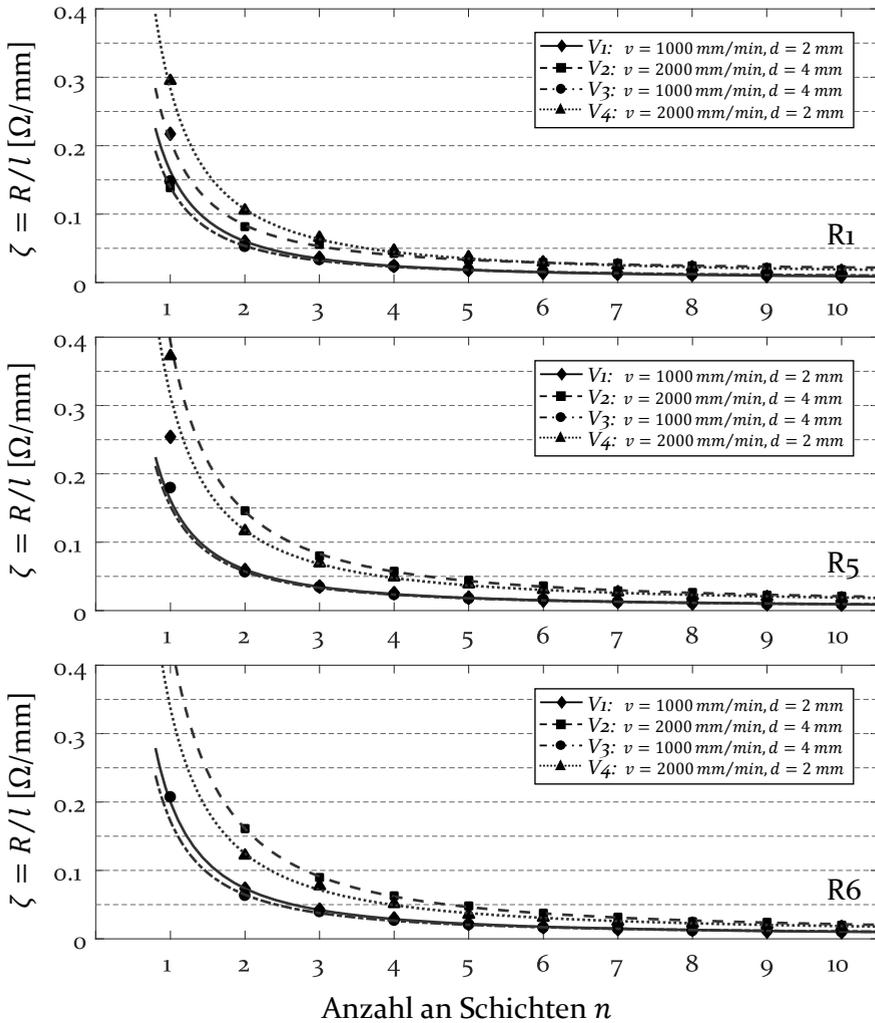


Bild 78: Widerstand pro Längeneinheit ζ der DOE-Versuchsreihen V1 - V4 in Abhängigkeit von der Anzahl an Schichten n und der Substratrauheit exemplarisch für R1, R5 und R6

In Bild 78 ist der Widerstand pro Längeneinheit $\zeta = R/l$ für die Versuchsreihen V1 - V4 über die Schichtanzahl aufgetragen. Die Abbildung untergliedert sich dabei in eine differenzierte Betrachtung der exemplarisch ausgewählten Substrate R1, R5 und R6. Es ist zu erkennen, dass der Widerstand pro Längeneinheit stets mit zunehmender Schichtanzahl n abnimmt. Dabei nähert sich ζ asymptotisch dem Wert 0.01 Ω/mm für eine Druckgeschwindigkeit von $v = 1000$ mm/min und dem Wert 0.02 Ω/mm für eine Druckgeschwindigkeit von $v = 2000$ mm/min an.

Die Druckgeschwindigkeit wirkt sich somit direkt proportional auf den Widerstand aus. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus der Literatur, sowohl bezüglich der Schichtanzahl [27] als auch der Druckgeschwindigkeit [33]. Für die Variation des Düsenabstands ist keine signifikante Tendenz zu verzeichnen.

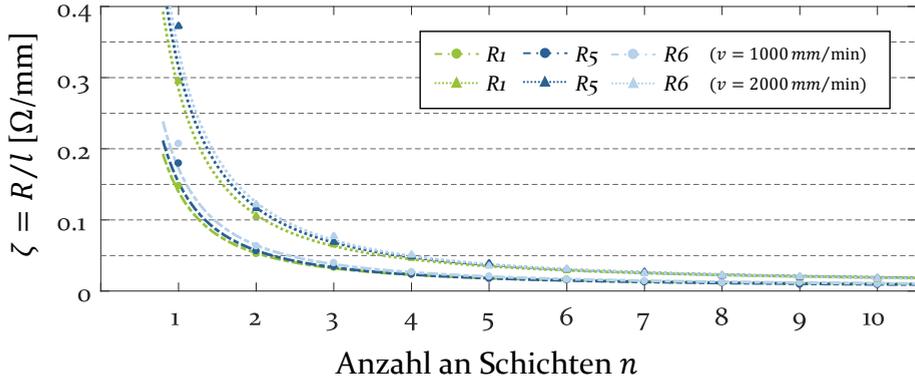


Bild 79: Widerstand pro Längeneinheit ζ in Abhängigkeit von der Schichtanzahl n und der Substratrauheit R_1 , R_5 und R_6 für verschiedene Druckgeschwindigkeiten v

Für einen direkten Vergleich der Substrate R_1 , R_5 und R_6 sind in Bild 79 die Widerstände pro Längeneinheit für die beiden Druckgeschwindigkeiten $v = 1000 \text{ mm/min}$ (V_3) und $v = 2000 \text{ mm/min}$ (V_4) in Abhängigkeit der Schichtanzahl dargestellt. Hierdurch lassen sich die beiden Einflussfaktoren der Druckgeschwindigkeit und der Substratrauigkeit quantitativ sehr gut vergleichen. Bei einer Verdopplung der Druckgeschwindigkeit ergibt sich erwartungsgemäß eine Verdopplung des Widerstands. [33] Der Einfluss einer höheren Substratrauigkeit auf den Widerstand fällt demgegenüber geringer aus und beträgt zwanzig Prozent. Dennoch ist die Auswirkung signifikant und somit muss die effektiv leitfähige Querschnittsfläche A_e mit ansteigender Substratrauigkeit sinken.

Spezifischer Widerstand

Für die Umrechnung der gemessenen Widerstandswerte pro Längeneinheit ζ in die spezifischen Widerstände ρ ist die Querschnittsfläche entscheidend. In Bild 62 wurden bereits die geometrischen Mittelwerte der gemessenen Querschnittsflächen in Abhängigkeit von der Rauigkeit σ_{RMS} beschrieben. In diesem Fall wurden allerdings zur Evaluierung der Prozessparameter die Querschnittsflächen um die zeitliche Drift bereinigt. Für die Berechnung des spezifischen Widerstands sind dagegen die tatsächlich abgeschiedenen Querschnittsflächen relevant. Diese sind in

Bild 80 für die Versuchsreihen $V_1 - V_4$ aufgetragen. Dabei können die Querschnittsflächen $A_m(\sigma_{RMS})$ anhand ihrer Abhängigkeit von der Substratrauhigkeit σ_{RMS} ermittelt und die real abgeschiedenen Querschnittsflächen $A_r = A_m(\sigma_{RMS} \approx 0)$ extrapoliert werden.

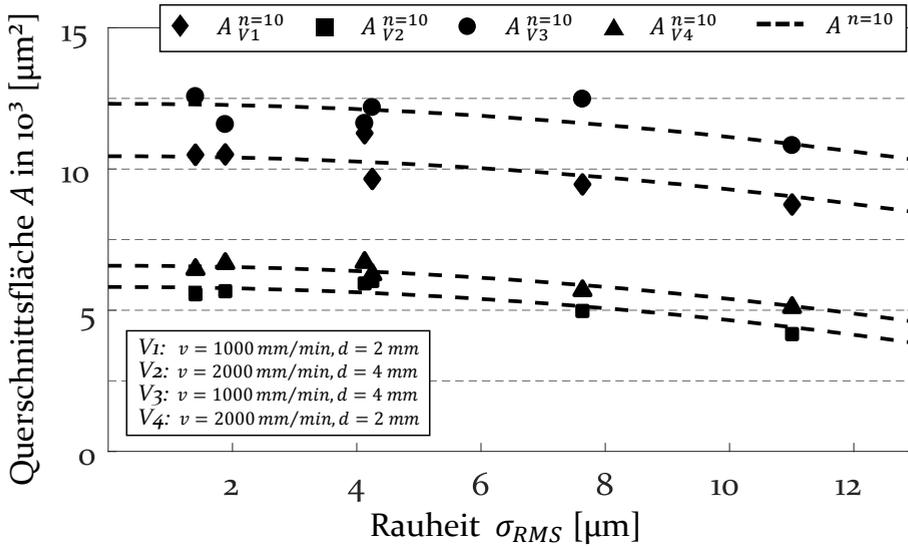


Bild 80: Gemessene Querschnittsfläche der Leiterbahnen nach zehn Schichten in Abhängigkeit von der Substratrauhigkeit für alle Versuchsreihen ohne Korrektur der zeitlichen Drift

In Bild 81 ist der spezifische Widerstand in Abhängigkeit der Querschnittsfläche für die Substrate R_1, R_5 und R_6 und die Versuchsreihen V_3 und V_4 aufgetragen. Dabei zeigen (a) und (b) die spezifischen Widerstände ρ_r über die realen Querschnittsflächen A_r und (c) und (d) die spezifischen Widerstände ρ_m über die gemessenen Querschnittsflächen A_m .

Die Kurvenverläufe nehmen mit ansteigender Querschnittsfläche ab und erreichen asymptotisch spezifische Widerstände im Bereich von $0.08 \Omega\mu\text{m}^2/\text{m} - 0.12 \Omega\mu\text{m}^2/\text{m}$. Betrachtet man die real abgeschiedene Querschnittsfläche A_r (a, b), so ergeben sich für zunehmende Substratrauhigkeiten höhere spezifische Widerstände ρ_r – es gilt $A_e < A_r$.

Demgegenüber führt die Auswertung von ρ_m (c, d) mit dem gemessenen Querschnitt A_m zu widersprüchlichen Ergebnissen mit geringeren Werten für hohe Substratrauhigkeiten (R_5 und R_6) im Vergleich zu niedrigen Substratrauhigkeiten (R_1). Die effektiv leitfähige Querschnittsfläche muss folglich größer als die gemessene Querschnittsfläche sein – es gilt $A_e > A_m$.

Somit liegt die effektiv leitfähige Querschnittsfläche A_e , analog zu Bild 38, zwischen den beiden Extremen A_r und A_m : $A_r > A_e > A_m$. Damit ergibt sich für den spezifischen Widerstand $\rho_r < \rho_e < \rho_m$. Eine allgemeingültige Quantifizierung ist allerdings nicht möglich, da die effektiv leitfähige Querschnittsfläche unter anderem von den Dimensionen der Leiterbahn abhängig ist.

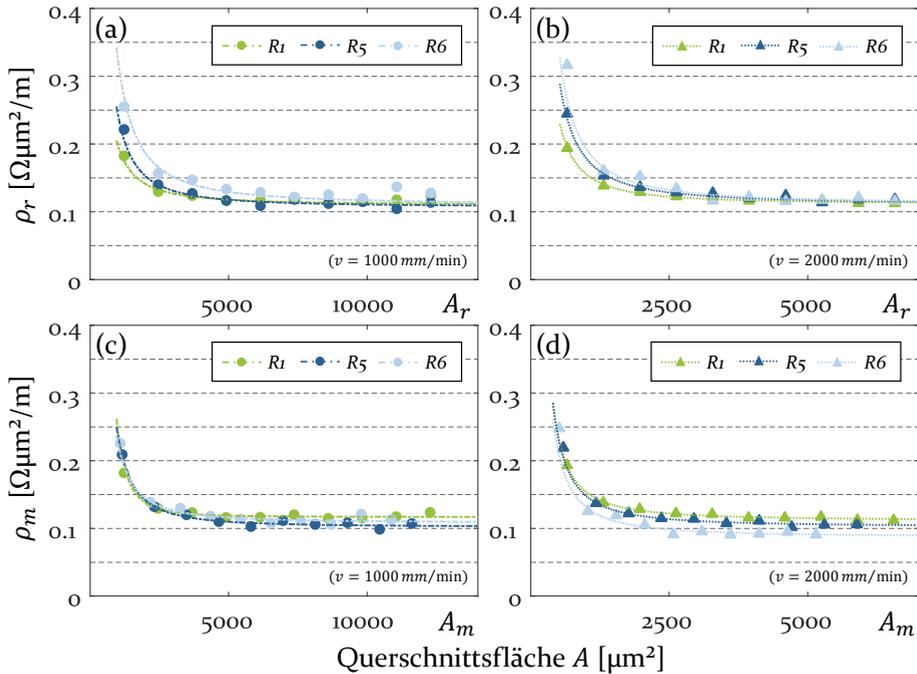


Bild 8: Spezifische Widerstände ρ_r und ρ_m in Abhängigkeit der jeweiligen Querschnittsflächen A_r (a, b) und A_m (c, d) für die Substrate R1, R5 und R6 und die Druckgeschwindigkeiten (a, c) $v = 1000 \text{ mm/min}$, (b, d) $v = 2000 \text{ mm/min}$

In der Praxis ist die Änderung des spezifischen Widerstands in Abhängigkeit der Substratrauheit bei konstanten Druckbedingungen, d.h. konstanter Abscheidemenge, von Bedeutung, um den Druckprozess entsprechend dem Substratmaterial anzupassen bzw. zu optimieren. Dieser Zusammenhang ist, aufgeschlüsselt nach der Leiterbahnhöhe, in Bild 82 exemplarisch für eine Druckgeschwindigkeit von 2000 mm/min (V_2 und V_4) dargestellt.

Die Werte sind dabei auf den niedrigsten spezifischen Widerstand ρ_r normiert, der bei zehn Schichten ($h \geq 15 \mu\text{m}$) auf einer optimalen Substratoberfläche ($\sigma_{RMS} \approx 0$) erreicht wird. Mit ansteigender Substratrauheit nimmt der spezifische Widerstand zu. Dieser Effekt ist für Leiterbahnen mit einer geringen Höhe besonders ausgeprägt. Für Leiterbahnen mit einer

Höhe größer 15 μm reduziert sich der Einfluss der Substratrauheit signifikant und beläuft sich auf etwa zehn Prozent für hohe Substratrauigkeiten. Dieses Ergebnis wird ebenfalls durch die Versuchsreihen V1 und V3 mit einer Druckgeschwindigkeit von 1000 mm/min bestätigt, bei denen Leiterbahnhöhen zwischen 27 und 28 μm erreicht werden.

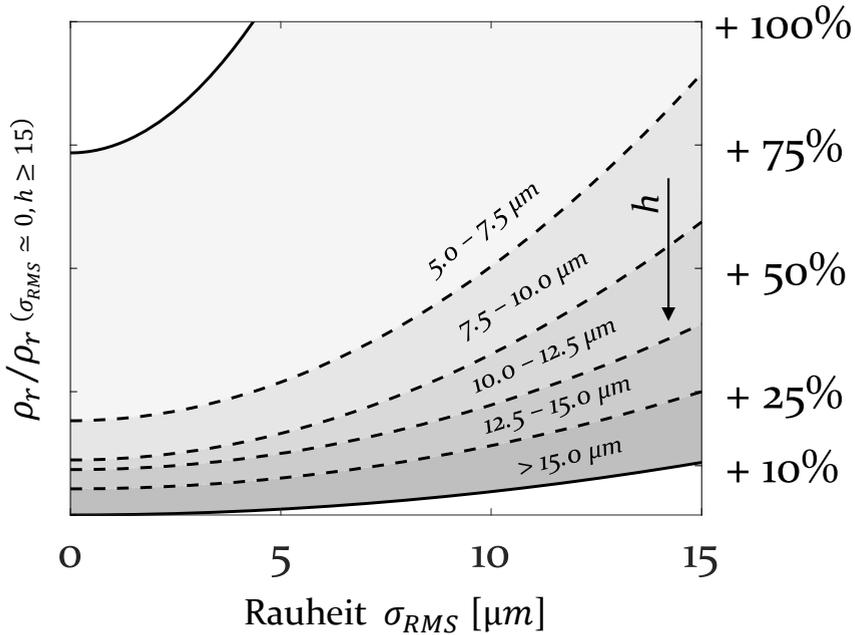


Bild 82: Relative Änderung des spezifischen Widerstands ρ_r bezogen auf $\rho_r(\sigma_{RMS} \approx 0, h \geq 15)$ in Abhängigkeit der Substratrauheit σ_{RMS} und der Leiterbahnhöhe h

An dieser Stelle sei angemerkt, dass der vorgestellte Zusammenhang in dieser strengen Form nur für die verwendeten Druckbedingungen und gewählten Rauigkeitsbereiche zutrifft. Der allgemeine Einfluss der Substratrauheit und Leiterbahnhöhe auf den spezifischen Widerstand kann allerdings abstrahiert werden und zur Orientierung dienen.

5.3 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Charakterisierung gedruckter Leiterbahnen wurde eine neue und leistungsfähige Methodik entwickelt, die darüber hinaus die Eigenschaften der Substrate vollumfänglich berücksichtigt. Die Analyse der mittels aerosolbasierter Drucktechnologie applizierten Leiterbahnen erfolgt dabei anhand von Mikroskopaufnahmen, die sowohl das Höhenprofil als auch die Laserintensität beinhalten. Mit einer entsprechenden Bildanalyse wird hierdurch die Datengrundlage für eine simultane Auswertung der Leiterbahnquerschnitte, der Leiterbahnkontur und des Oversprays gelegt. Die Substrate werden bezüglich ihrer Oberflächenwechselwirkung evaluiert, um gegebenenfalls erforderliche Vorbehandlungsstrategien abzuleiten und kompatible Tinten zu identifizieren. Zudem wird die Oberflächentopographie umfassend anhand der spektralen Leistungsdichte beschrieben.

Tabelle 6: Einfluss der Prozessparameter auf die Leiterbahneigenschaften

	Querschnittsfläche	Linienbreite	Linienhöhe	Line Edge Roughness	Overspray	Widerstand pro Länge	Spezifischer Widerstand
Schichtanzahl	↑↑	↑	↑↑	↓	↓	↓↓	↓
Rauheit	↓	-	↓	-	-	↑	↑
Druckgeschwindigkeit	↓↓	↓	↓↓	↑	↑	↑↑	↑
Düsenabstand	-	↑	↓	↑↑	↑↑	-	-

korreliert: ↓↓ stark indirekt, ↓ indirekt, - nicht, ↑ direkt, ↑↑ stark direkt

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Anzahl an Leiterbahnschichten, der Druckgeschwindigkeit, des Düsenabstands als auch der Substratrauheit auf die Leiterbahneigenschaften im Detail untersucht. Die Ergebnisse verdeutlichen hierbei die enge Verflechtung der Leiterbahneigenschaften. Die Effekte sind in Tabelle 6 zusammengefasst und bestätigen die zu Beginn von Kapitel 5 genannten Thesen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass der spezifische Widerstand generell mit zunehmender Schichtanzahl abnimmt und asymptotisch einen Grenzwert erreicht. Zudem steigt mit zunehmender Substratrauigkeit der spezifische Widerstand, wodurch sich eine effektive Querschnittsfläche für die Leitfähigkeit ergibt, die zwischen realer und gemessener Querschnittsfläche liegt.

Des Weiteren konnten mit der vorgestellten Methodik und unter Verwendung der PSDs Glättungseffekte der Silbernanopartikelntinte nach dem Abscheideprozess auf der Substratoberfläche quantifiziert werden. Als dominanter Transportprozess wurde dabei viskoses Fließen identifiziert.

Dies wurde sowohl auf Basis der Leiterbahnoberfläche als auch anhand der Leiterbahnkontur nachgewiesen.

Für alle betrachteten Untersuchungen und gezeigten Ergebnisse ist eine umfangreiche Datengrundlage und damit verbunden automatisierte Datenaufbereitung und -auswertung unabdingbar, um allgemeingültige Aussagen auf statistisch fundierter Basis zu treffen. Zusammenfassend vermittelt die entwickelte Methodik ein umfassendes und tiefgehendes Verständnis über den Druckprozess und stellt einen entscheidenden Schritt für weitere Optimierungen dar.

6 Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien mittels Laser-Transmissions-Messsystem

In diesem Kapitel wird ein neu entwickeltes Messsystem zur Analyse von aerosolbasierten Drucktechnologien mittels Laser-Transmissions-Messprinzip vorgestellt. Hierzu werden die physikalischen Grundlagen sowie der Aufbau und mögliche Integrationsvarianten in Kapitel 6.1 beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 6.2 die für die in situ Messung zum Einsatz kommenden Messstrategien erläutert. Diese eignen sich für die Echtzeitdetektion von Prozessschwankungen und Prozesseinbrüchen und ermöglichen darüber hinaus auch Zusammenhänge zwischen den erfassten Kenngrößen und dem Massenstrom sowie Prozessparametern herzustellen. Das Kapitel 6.3 rundet die Thematik mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick über Echtzeitanalysesysteme für aerosolbasierte Drucktechnologien ab.

6.1 Entwicklung eines Laser-Transmissions-Messsystems

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Grundlagen und der Umsetzung des neu entwickelten Laser-Transmissions-Messsystems. Hierzu wird in Kapitel 6.1.1 die Problematik, die aerosolbasierte Drucksysteme nach aktuellem Stand der Technik in Bezug auf die Prozessstabilität aufweisen, beleuchtet und die Signifikanz neuer Lösungswege abgeleitet. In Kapitel 6.1.2 wird die Funktionsweise des vorgestellten Messsystems beschrieben und die mathematisch-physikalischen Grundlagen für die Beschreibung der Transmission erläutert. Der Aufbau sowie mögliche Integrationsvarianten einer in situ Messung in aerosolbasierten Drucksystemen werden in Kapitel 6.1.3 thematisiert.

6.1.1 Motivation und Hintergrund

Der Massenstrom aerosolbasierter Drucksysteme kann nicht direkt, sondern nur indirekt anhand seiner Prozessparameter eingestellt werden. Der Einfluss und die Wirkung der Prozessparameter auf den Aerosolstrahl sind daher von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden wird deshalb der Aerosolstrahl – im Gegensatz zur Darstellung in Kapitel 4 und 5 – nicht als

Einzelkenngröße (Kapitel 2.3.1) betrachtet, sondern anhand seiner Prozessparameter (Kapitel 2.3.2) aufgeschlüsselt. Der Fokus liegt hierbei auf den in Kapitel 2 vorgestellten Abhängigkeiten von den Volumenströmen Atomizer, VI-Exhaust, VI-Sheath und Sheath.

In der Praxis erfolgt die Einflussanalyse der Prozessparameter auf den Massenstrom innerhalb des gesamten Parameterraums und muss für jede Anlage individuell ermittelt werden. Der Massenstrom wird dabei diskontinuierlich mittels Hochpräzisionswaage bestimmt. Mit diesem Vorgehen werden Arbeitspunkte im Parameterraum identifiziert und Tendenzen einzelner Einflussfaktoren abgeleitet. Mit diesem indirekten Verfahren kann allerdings weder die Reproduzierbarkeit noch die Stabilität des Prozesses gewährleistet werden. [9] Zudem ist das Vorgehen mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden und inadäquat für zukunftsorientierte Technologien.

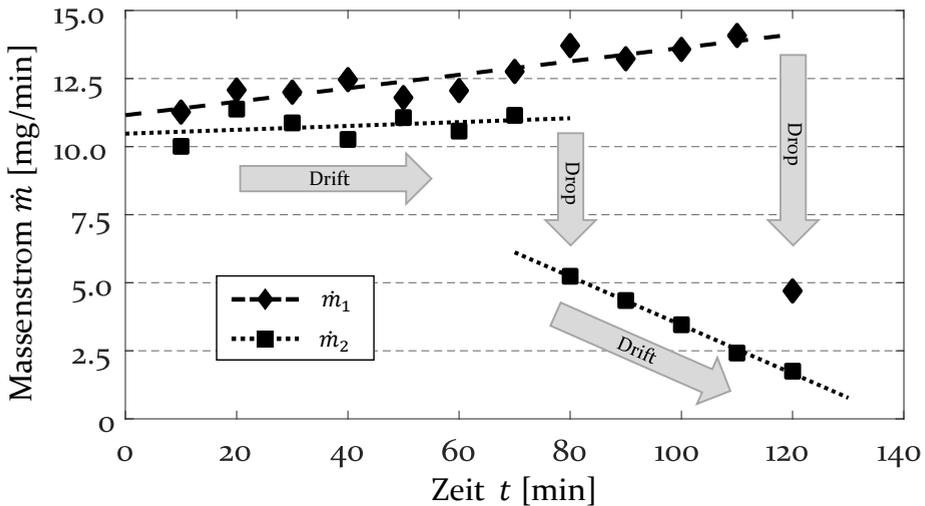


Bild 83: Massenstrom \dot{m}_1 und \dot{m}_2 von zwei Versuchsreihen als Funktion der Zeit mit einer zeitabhängigen Massenstromdrift und einem Einbruch des Massenstroms zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Die Problematik der Prozessschwankungen bzw. der Massenstromdrift sind vielfach in der Literatur beschrieben. [16, 49, 56] In Bild 83 sind exemplarisch für das verwendete Drucksystem zwei Untersuchungen des Massenstroms \dot{m} über eine Prozessdauer von zwei Stunden gezeigt. Als funktionale Tinte wird dabei eine Silbernanopartikelntinte verwendet. Die Volumenströme Atomizer, VI-Exhaust, VI-Sheath und Sheath werden auf 1000 sccm, 1700 sccm, 1000 sccm und 400 sccm eingestellt. Die Ermittlung

der gedruckten Tintenmenge erfolgt diskontinuierlich alle zehn Minuten via offline Messung.

Es ist zu erkennen, dass sich jeweils eine Drift des Massenstroms \dot{m} über die Zeit t in unterschiedlicher Ausprägung einstellt. Des Weiteren tritt in beiden Fällen ein unvorhergesehener Prozesseinbruch (*drop*), d.h. ein sprunghafter Rückgang des Massenstroms zu unterschiedlichen Zeitpunkten, auf. Dieser ereignet sich in der einen Versuchsreihe innerhalb der letzten zehn Minuten nach einer Prozessdauer von knapp zwei Stunden, im anderen Fall bereits nach 70 - 80 Minuten. Dieses Verhalten ist in der Regel in einer Verunreinigung des Systems begründet. [16, 49]

Für eine Stabilisierung des Druckprozesses, d.h. der Einstellung eines konstanten Massenstroms, ist die Detektion von Prozessschwankungen und Prozesseinbrüchen durch ein kontinuierliches Monitoring zwingend erforderlich. Die Zielstellung des neu entwickelten Laser-Transmissions-Messsystems liegt in einer direkten Charakterisierung des Aerosolstrahls mittels in situ Messverfahren, um einen kontinuierlichen Massenstrom und eine konstante Druckqualität gewährleisten zu können.

6.1.2 Funktionsweise und mathematische Beschreibung

Für die Partikelanalyse eignen sich optische Verfahren, die eine Messung in einem laufenden Prozess ermöglichen und in Echtzeit Änderungen in den Prozessbedingungen registrieren können. Dabei kann generell zwischen zwei Verfahren unterschieden werden: Das Extinktions- bzw. Transmissionsmessverfahren, bei dem die Änderung der Lichtintensität beim Durchstrahlen eines Messobjekts in Vorwärtsrichtung analysiert wird und das Streulichtmessverfahren, bei dem das von einem Messobjekt gestreute Licht detektiert wird. Die elastische Lichtstreuung an Partikeln wird mit der Mie-Theorie beschrieben und für Partikel in der Größenordnung der Lichtwellenlänge als Mie-Streuung bezeichnet. Die Intensität und Winkelabhängigkeit der Lichtstreuung ist dabei abhängig von der Partikelgröße. [140-142]

Unabhängig vom Verfahren kann die Analyse hierbei entweder an einzelnen Partikeln oder an einem Partikelkollektiv erfolgen. Bei einer Einzelpartikelanalyse wird jedes einzelne Partikel klassifiziert und eine Partikelgrößenverteilung ermittelt.

Bei der Messung eines Partikelkollektivs wird hingegen das Summensignal, d.h. das resultierende Signal aller Partikel, ausgewertet. Entscheidend für die Auswahl der Analysemethode ist die Partikelkonzentration, die Partikelgröße sowie die Intensität bzw. Intensitätsänderung des Messsignals. [142, 143]

In der vorliegenden Arbeit wird für die Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien ein Transmissionsmessverfahren für die Analyse an einem Partikelkollektiv eingesetzt.

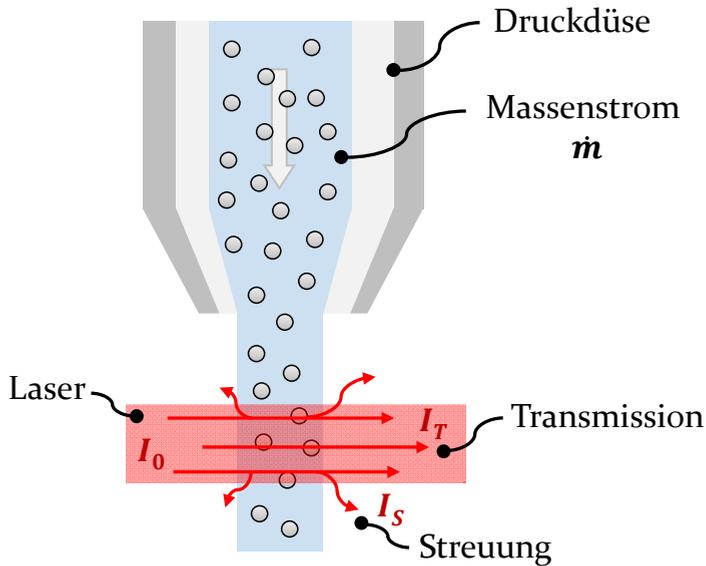


Bild 84: Funktionsweise des Laser-Transmissions-Messsystems zur Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien

In Bild 84 ist die Funktionsweise des entwickelten Laser-Transmissions-Messsystems dargestellt. Der Aerosolstrahl tritt dabei mit einem Massenstrom \dot{m} aus der Druckdüse aus und kreuzt einen Laserstrahl, der senkrecht zum Partikelstrahl verläuft. Die eingestrahelte Intensität des Lasers I_0 verringert sich dabei um die an den Partikeln gestreute und absorbierte Intensität I_S und I_A auf den Wert der transmittierten Intensität I_T :

$$I_0 = I_T + I_S + I_A = I_T + I_E \quad (6.1)$$

Die Summe der gestreuten und absorbierten Intensität I_S und I_A wird als Extinktionsintensität I_E bezeichnet.

Bild 85 (a) zeigt schematisch die Intensitätsänderung des Laserstrahls beim Durchdringen des als homogen angenommenen Aerosolstrahls. Die extinktionsbedingte, infinitesimale Intensitätsänderung dI beim Durchqueren einer Strecke dz im Aerosolstrahl ist proportional zur Intensität I , zur Anzahlkonzentration Φ_N und zum Extinktionsquerschnitt C_E der Aerosolpartikel:

$$dI = -\Phi_N \cdot C_E \cdot I \cdot dz \quad (6.2)$$

Eine Integration über die Strecke l ergibt

$$\int_{I_0}^{I_l} \frac{dI}{I} = \int_0^l -\Phi_N \cdot C_E \cdot dz \quad (6.3)$$

und resultiert in einer Schwächung der Intensität von I_0 auf I_l :

$$\ln\left(\frac{I_l}{I_0}\right) = -\Phi_N \cdot C_E \cdot l \quad (6.4)$$

Dieser Zusammenhang ist als Lambert-Beersches Gesetz bekannt und lässt sich mit Hilfe der Exponentialfunktion auch in der Form

$$I_l = I_0 \cdot e^{-\Phi_N \cdot C_E \cdot l} \quad (6.5)$$

darstellen. [142, 144, 145] Für die zu erwartenden Intensitätsänderungen kleiner zehn Prozent und damit für kleine Werte des Exponenten lässt sich die Exponentialfunktion linear gemäß $e^{-x} \approx (1 - x)$ mit einer maximalen Abweichung von 0.5 % nähern und die Gleichung vereinfacht sich zu:

$$I_l \approx I_0(1 - \Phi_N \cdot C_E \cdot l) \quad (6.6)$$

Die Schwächung der Intensität ist somit direkt linear zur Strecke l , die der Laser durch den Aerosolstrahl zurücklegt. Im vorliegenden Fall ist diese,

wie Bild 85 (b) zeigt, allerdings variabel und abhängig von der Eintrittsposition des Lasers in den als zylindrisch angenommenen Aerosolstrahl. [55, 146]

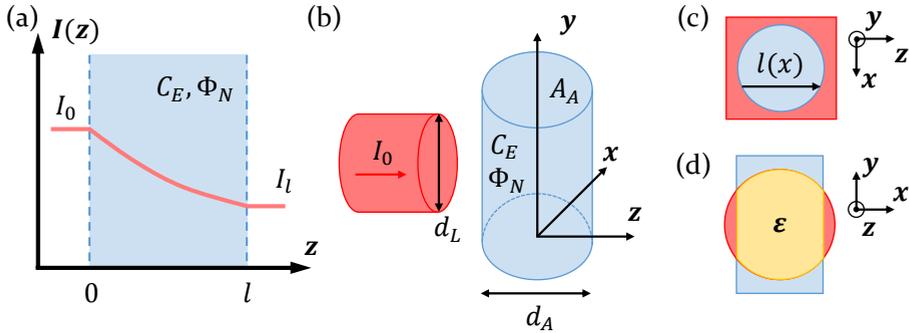


Bild 85: (a) Intensitätsänderung des Laserstrahls beim Durchdringen des Aerosolstrahls mit dem Extinktionsquerschnitt C_E , der Anzahlkonzentration Φ_N und der Strecke l sowie (b) deren schematische Darstellung und die projizierten Schnittflächen in (c) xz -Ebene und (d) xy -Ebene

Die Betrachtung der xz -Ebene in Bild 85 (c) liefert die Beziehung $l(x) = 2 \cdot z(x)$ und spannt den Wertebereich von $-d_A/2 \leq l(x) \leq d_A/2$ auf. Dabei steht d_A für den Durchmesser des Aerosolstrahls. Für die transmittierte und vom Aerosol geschwächte Intensität $I_T^{Aerosol}$ ergibt sich die Gleichung

$$I_T^{Aerosol} = I_0 \cdot \frac{1}{d_A} \int_{-d_A/2}^{d_A/2} (1 - \Phi_N \cdot C_E \cdot 2 \cdot z(x)) dx \quad (6.7)$$

die unter Verwendung der Kreisgleichung $x^2 + z^2 = (d_A/2)^2$ und nach Integration den Zusammenhang

$$I_T^{Aerosol} = I_0 \cdot (1 - \pi/4 \cdot C_E \cdot d_A \cdot \Phi_N) \quad (6.8)$$

liefert. Für eine vollständige Erfassung des Aerosolstrahls in xy -Ebene wird der Durchmesser des Lasers d_L größer als der Durchmesser des Aerosolstrahles d_A gewählt. In Bild 85 (d) ist der Anteil der relativen Schnittfläche ϵ eingezeichnet, mit der der Laser den Aerosolstrahl trifft. Die Schwächung der Intensität erfolgt somit nur für diesen Anteil ϵ , während der Anteil

$(1 - \varepsilon)$ des Laserstrahls ungehindert den Photodetektor mit der einstrahlenden Intensität I_0 trifft. Damit ergibt sich für die transmittierte Intensität

$$I_T = \varepsilon \cdot (1 - \pi/4 \cdot C_E \cdot d_A \cdot \Phi_N) \cdot I_0 + (1 - \varepsilon) \cdot I_0 \quad (6.9)$$

und für die Transmission $T = I_T/I_0$ die Beziehung:

$$T = I_T/I_0 = (1 - \varepsilon \cdot \pi/4 \cdot C_E \cdot d_A \cdot \Phi_N) \quad (6.10)$$

Die Transmission ist somit linear proportional zur Anzahlkonzentration der Aerosolpartikel Φ_N . Der Zusammenhang zwischen Anzahlkonzentration Φ_N und Massenstrom \dot{m} kann durch die Annahme einer homogenen Dichteverteilung [33] der Aerosolpartikel ρ_A im Volumenstrom Q_A über die Beziehung $\dot{m} = \rho_A \cdot Q_A$ hergestellt werden. Dabei ist die Dichte $\rho_A = m_p \cdot \Phi_N$ das Produkt aus der Masse der Aerosolpartikel m_p und der Anzahlkonzentration Φ_N . Der Volumenstrom $Q_A = dV_A/dt = A_A \cdot dy/dt$ ergibt sich aus dem Aerosolvolumen V_A , das sich mit der Querschnittsfläche $A_A = \pi \cdot (d_A/2)^2$ und einer Geschwindigkeit $v_A = dy/dt$ von der Düse in y-Richtung zum Substrat bewegt. Für den Massenstrom \dot{m} erhält man damit die Beziehung

$$\dot{m} = \rho_A \cdot \frac{dV_A}{dt} = \rho_A \cdot A_A \cdot v_A = m_p \cdot \Phi_N \cdot \pi \cdot (d_A/2)^2 \cdot v_A \quad (6.11)$$

mit der in Gleichung (6.10) die Anzahlkonzentration Φ_N durch den Massenstrom \dot{m} substituiert werden kann:

$$T = \frac{I_T}{I_0} = 1 - \varepsilon \cdot \frac{C_E}{m_p \cdot d_A} \cdot \frac{\dot{m}}{v_A} \quad (6.12)$$

Die Transmission T liegt somit für einen Massenstrom von $\dot{m} = 0$ bei 100 % und nimmt mit zunehmendem Massenstrom linear ab. Damit eignet sich die Transmissionsmessung für die Quantifizierung des Massenstroms und insbesondere zum Monitoring aerosolbasierter Drucktechnologien. Es

ist allerdings zu berücksichtigen, dass dieser direkte Zusammenhang zwischen Transmissionsänderung und Massenstrom nur für konstante Prozessbedingungen gilt, insbesondere für konstante Partikelstrahlbedingungen mit konstanter Partikelgrößen- und Partikelgeschwindigkeitsverteilung sowie konstantem Teilchenstrahldurchmesser. So weisen Aerosolpartikel unterschiedlicher Größe ein unterschiedliches Streulichtverhalten [140–142] auf, das sich auch auf die Transmission auswirkt. Zudem führt eine Fokussierung des Aerosolstrahls, z.B. durch eine Erhöhung des Sheath-Flow, zu einer Reduktion des Aerosolstrahldurchmessers bzw. der Querschnittsfläche A_A und damit über die Beziehung $\dot{m} = \rho_A \cdot A_A \cdot v_A$ und aufgrund der Massenerhaltung direkt zu einer Erhöhung von v_A [33]. Des Weiteren wirkt sich eine Änderung der geometrischen Anordnung von Laser- und Aerosolstrahl auf die Parameter ε und d_A und damit ebenfalls direkt auf die Transmission aus.

Die Gültigkeit der Gesetzmäßigkeit (6.12) und die praktische Anwendung werden in Kapitel 6.2.3 vertieft. Dabei wird sowohl die Korrelation der Transmissionsänderung mit dem Massenstrom als auch mit Prozessparametern näher betrachtet.

6.1.3 Aufbau und Integrationsvarianten

Die beiden Hauptkomponenten für den Aufbau des vorgestellten Messsystems zur Partikelanalyse sind ein Laser als Lichtquelle und ein Photodetektor zur Erfassung des transmittierten Lichts.

Der zum Einsatz kommende Laser ist der **iBEAM-SMART-633-S** der Firma TOPTICA Photonics AG. Die Wellenlänge des emittierten monochromatischen Lichts beträgt 633 nm mit einer Genauigkeit von ± 3 nm, der Durchmesser des Lasers beim Strahlaustritt ist 1 mm. Die maximale Leistung ist mit 100 mW, einem Rauschpegel < 0.2 % und einer Stabilität < 0.5 % über einen Zeitraum von 48 Stunden angegeben. [147]

Die Leistung des transmittierten Lichts wird mit dem digitalen Leistungsmesser **PM400** (*Power Meter*) der Thorlabs Inc. mit einer Datenrate von 100 Hz aufgezeichnet. Das Spektrum der messbaren Laserleistung reicht dabei – in Abhängigkeit des verwendeten Sensors – von 100 pW bis 200 W. Im vorliegenden Fall wird der Silicium Photodetektor **S150C** der Thorlabs Inc. eingesetzt. Dieser kann Wellenlängen im Bereich von 350 nm bis 1100 nm in einem Leistungsbereich von 100 pW bis 5 mW mit einer Linearität von ± 0.5 % und einer Auflösung von 10 pW erfassen. Der Detektor besitzt eine aktive Fläche von 3.6 mm x 3.6 mm. [148, 149]

Eine direkte Integration des Lasers und des Photodetektors innerhalb der Druckanlage ist aufgrund der Abmessungen der Komponenten und der damit verbundenen Bewegungseinschränkung des Drucksystems nicht möglich. Deshalb wird der Laser zu Beginn außerhalb der Druckanlage in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt, im Inneren der Druckanlage ausgekoppelt und auf den Aerosolstrahl fokussiert. Das transmittierte Licht wird erneut eingekoppelt und anschließend außerhalb der Druckanlage durch den Photodetektor erfasst.

Die Ein- und Auskopplung am Aerosolstrahl kann dabei, wie Bild 86 zeigt, in verschiedenen Varianten in das Drucksystem integriert werden. Eine Montage der Laser-Transmissions-Einheit unterhalb der Düse (a) ermöglicht die Analyse des Aerosolstrahls nach dem Austritt aus der Düse. Messeinheit und Aerosolstrahl verfahren dabei simultan, wodurch ein kontinuierliches Monitoring über den gesamten Druckprozess möglich ist. Diese Integrationsvariante kann allerdings je nach Drucksystem Restriktionen in der Bahnplanung nach sich ziehen.

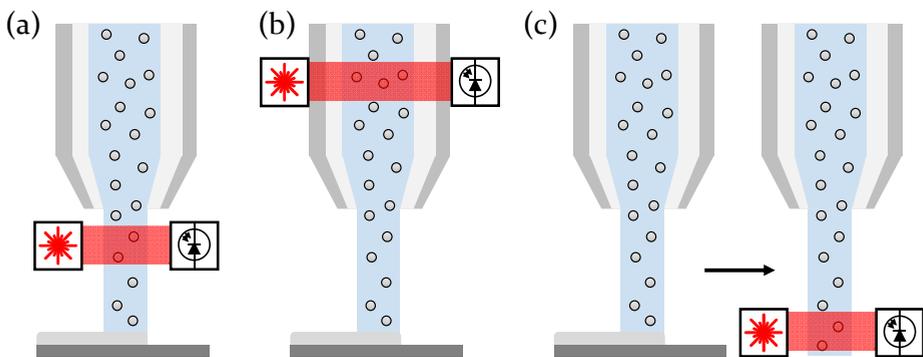


Bild 86: Integrationsvarianten des Laser-Transmissions-Messsystems: (a) Montage unterhalb der Düse, (b) Montage oberhalb der Düse, (c) Montage stationär in der Druckanlage

Eine Montage oberhalb der Düse (b) ermöglicht ebenfalls ein kontinuierliches Monitoring, zusätzlich kann die Bahnplanung des Drucksystems unabhängig vom Messsystem erfolgen. Aussagen über den Aerosolstrahl nach dem Austritt aus der Düse können allerdings nicht getroffen werden. Des Weiteren kann diese Integrationsvariante nur für Druckanlagen eingesetzt werden, bei denen die Erzeugung und Fokussierung des Aerosols getrennt erfolgen. Dies trifft im Fall des verwendeten Drucksystems nicht zu.

Mit einer stationären Integration der Laser-Transmissions-Einheit an einer fest definierten Position in der Druckanlage (c) ist zwar ein kontinuierliches Monitoring des Aerosolstrahls nicht möglich, da für die Analyse das Anfahren der Messstation obligatorisch ist. Die Messung kann jedoch in einem Zeithorizont kleiner zehn Sekunden durchgeführt und mit variabler Frequenz als Baustein in den Druckprozess integriert werden. Diese Integrationsvariante schränkt nicht die Bahnplanung ein, kann unabhängig von der Ausführung des Drucksystems eingesetzt werden und ermöglicht die Analyse des Aerosolstrahls nach dem Austritt aus der Düse.

Bild 87 zeigt das Laser-Transmissions-Messsystem in Form einer stationären Umsetzung. Der verwendete Laser wird dabei auf die maximale Leistung von 100 mW eingestellt und mittels absorbierenden Neutraldichtefiltern auf eine Leistung von 250 μ W bis 300 μ W am Faserausgang abgeschwächt. Dadurch kann sowohl die höchste Laserstabilität, die sich nahe der Nennleistung des Lasers einstellt, gewährleistet werden und gleichzeitig können auch die Anforderungen der Laserklasse II für einen sicheren Betrieb erfüllt werden.

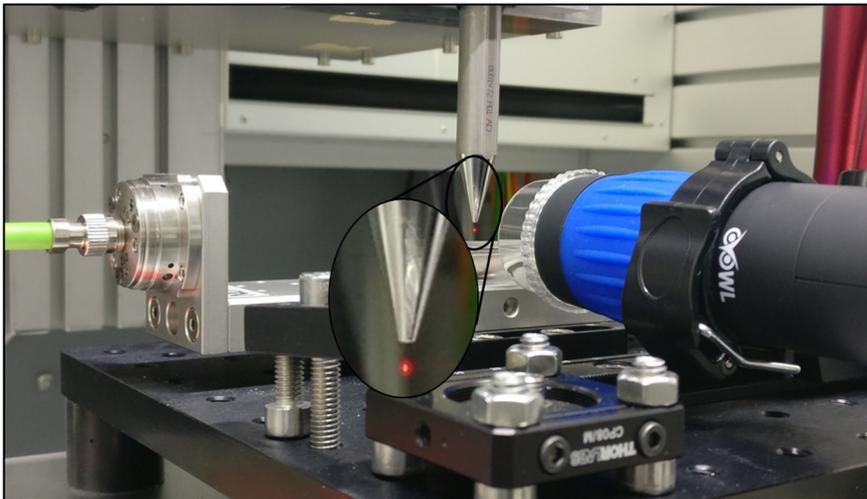


Bild 87: Versuchsaufbau des Laser-Transmissions-Messsystems mit einer Vergrößerung des Wechselwirkungsbereichs von Laser- und Aerosolstrahl zur besseren Visualisierung

6.2 Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien

In diesem Abschnitt werden zunächst in Kapitel 6.2.1 Messstrategien zur Echtzeitanalyse von aerosolbasierten Drucktechnologien mittels Laser-Transmissions-Messsystem identifiziert. Anschließend wird in Kapitel 6.2.2 das Vorgehen der in situ Messung zur Detektion von Prozessschwankungen und Prozesseinbrüchen vorgestellt sowie die Berechnung entsprechender Kenngrößen beschrieben. Zuletzt wird in Kapitel 6.2.3 der Zusammenhang zwischen Transmission und Massenstrom sowie zwischen Transmission und Prozessparametern erörtert.

6.2.1 Identifikation von Messstrategien

Die Datengrundlage für die vorgestellte Methode zur Charakterisierung des Aerosolstrahls bildet die gemessene, transmittierte Leistung P_T . Diese entspricht der in Kapitel 6.1.2 hergeleiteten, transmittierten Intensität I_T bezogen auf die vom Detektor erfasste Laserquerschnittsfläche A_L .

Die im Folgenden betrachtete Transmission bzw. Transmissionsänderung kann analog zur Intensität aus der Relation zwischen transmittierter Leistung P_T und eingestrahelter Leistung P_0 berechnet werden. Die Bezugsgröße der eingestrahelten Leistung P_0 beschreibt dabei die durchschnittliche, transmittierte Laserleistung, die sich einstellt, wenn der Laserstrahl nicht den Aerosolstrahl durchquert. Die Transmissionsänderung ΔT wird dabei definiert als:

$$\Delta T = 1 - T = \frac{I_0 - I_T}{I_0} = \frac{P_0 - P_T}{P_0} \quad (6.13)$$

Für die weitere Beschreibung wird die Nomenklatur des Laser- bzw. Aerosol-Transmissionssignals verwendet, wenn keine bzw. eine Interaktion zwischen Laser- und Aerosolstrahl vorliegt.

In Bild 88 ist ein Beispiel für ein Laser-Transmissionssignal (a) und ein Aerosol-Transmissionssignal (b) über einen Zeitraum von 600 s dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beide Signale schwanken und für das Aerosol-Transmissionssignal sowohl das mittlere Niveau sinkt als auch die Streuung gegenüber dem Laser-Transmissionssignal zunimmt.

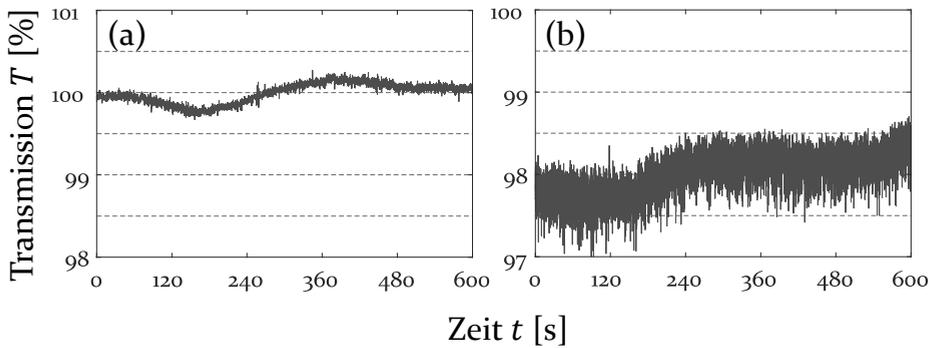


Bild 88: Beispiel einer Transmissionsmessung des Lasers (a) ohne und (b) mit Interaktion mit dem Aerosolstrahl

Damit bestätigt sich bereits, dass eine Detektion von Massenströmen anhand der transmittierten Laserleistung möglich ist. Allerdings können Änderungen im Transmissionssignal sowohl durch Variationen im Aerosolmassenstrom als auch durch zeitliche Schwankungen des Lasers hervorgerufen werden. Zur Eliminierung der Laserinstabilität als unbekannte Störgröße wird deshalb das Aerosol-Transmissionssignal stets in Relation zur tatsächlich eingestrahlten Laserleistung gestellt. Je kürzer der zeitliche Abstand zwischen der Erfassung der Laserleistung mit und ohne Aerosolinteraktion, desto geringer wirken sich Laserschwankungen auf das Transmissionssignal aus. In der Praxis kann die zeitnahe Erfassung der Laserleistung mit und ohne Aerosolinteraktion mit einem Shutter erfolgen, bei dem der Aerosolstrahl binnen Millisekunden unterbrochen werden kann.

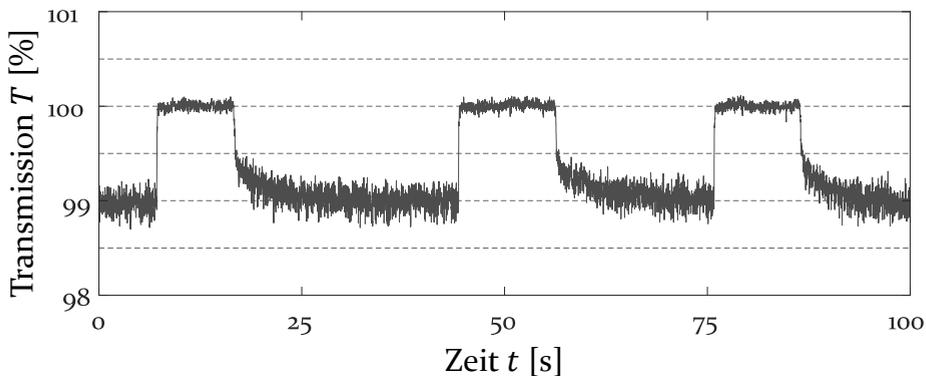


Bild 89: Beispiel einer Transmissionsmessung unter Verwendung eines Shutters zur sequenziellen Unterbrechung des Aerosolstrahls

In Bild 89 ist ein Beispiel für eine Transmissionsmessung bei mehrmaligem Einsatz eines Shutters zur sequenziellen Unterbrechung des Aerosolstrahls gezeigt. Die Länge des Shutter-Signals wurde zur besseren Visualisierung auf eine Dauer von zehn Sekunden festgelegt und kann für eine quantitative Charakterisierung des Aerosolstrahls reduziert werden.

6.2.2 Detektion von Prozessschwankungen und Prozesseinbrüchen

Für die Echtzeitanalyse aerosolbasierter Drucktechnologien sind, wie in Kapitel 6.1.1 aufgezeigt, zwei zentrale Kriterien entscheidend. Einerseits müssen Prozessschwankungen quantifiziert und andererseits Prozesseinbrüche detektiert werden. Erst eine zuverlässige Erfassung dieser Prozesszustände ermöglicht eine sinnvolle Ableitung von geeigneten Handlungsschritten. Fluktuationen und Drift im Massenstrom können so über eine entsprechende Regelung der Prozessparameter kompensiert werden. Prozesseinbrüche terminieren zwangsläufig den Druckprozess – eine frühzeitige Detektion gewährleistet allerdings die Funktionalität des Endproduktes.

Für die Evaluierung des Druckprozesses ist die Differenzierung und Berechnung des Laser- und Aerosol-Transmissionssignals erforderlich. Dies bedeutet, dass als Datengrundlage ein transmittiertes Laserleistungssignal mit und ohne Aerosolinteraktion benötigt wird. Die nachfolgenden Analysen basieren deshalb stets auf Shutter-Sequenzen.

Differenzierung zwischen Laser- und Aerosol-Transmissionssignal

In einem ersten Schritt ist sowohl für die Quantifizierung der Prozessschwankungen als auch für die Detektion von Prozesseinbrüchen eine zuverlässige Differenzierung zwischen Laser- und Aerosol-Transmissionssignal unerlässlich.

In Bild 90 (a) ist ein Beispiel für eine Leistungsmessung P mit einer einzelnen Shutter-Sequenz für einen eingestellten Massenstrom von $\dot{m} = 10.2 \text{ mg/min}$ dargestellt. Wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, ist der Unterschied zwischen Laser- und Aerosol-Transmissionssignal signifikant – das Niveau nimmt beim Durchqueren des Laserstrahls durch den Aerosolstrahl ab und die Streuung steigt. Zur besseren Veranschaulichung der hochfrequenten Streuung des Messsignals P ist der Signalverlauf zusätzlich nach Verwendung eines Tiefpassfilters P_{LP} eingezeichnet.

Die Betrachtung der Shutter-Sequenz im Signalverlauf verdeutlicht an dieser Stelle eindrucksvoll den hohen Informationsgrad, den die vorliegende Charakterisierungsmethode aufweist. Die linke Flanke, die den Einschaltvorgang des Shutters und damit die Unterbrechung des Aerosolstrahls darstellt, zeigt einen deutlich steileren Verlauf in der Leistung als die rechte Flanke, die den Druckprozess erneut startet. Dies ist im Wirkprinzip des verwendeten pneumatischen Shutters begründet. Während der Aerosolstrahl beim Anlegen des durch den Shutter induzierten Vakuums sofort unterbrochen wird, muss sich der Gasdruck vor erneutem Drucken nach der Shutter-Terminierung stabilisieren. Die Analyse des Shutter-Signals kann für eine Optimierung der Shutter-Einstellungen verwendet werden, die allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt wird.

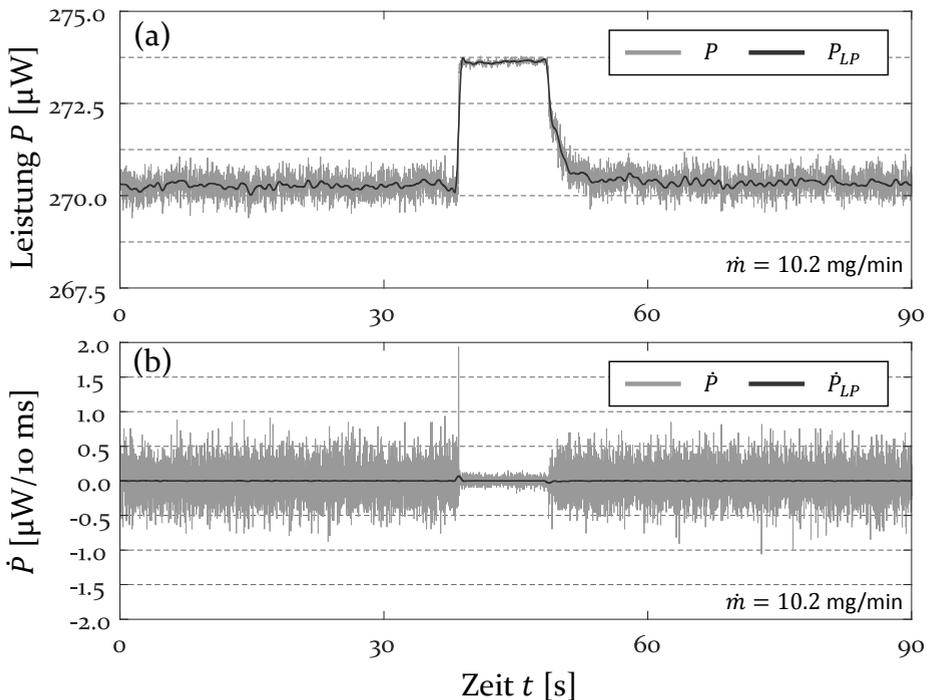


Bild 90: Beispiel für eine (a) Leistungsmessung P mit Shutter-Sequenz (b) sowie das dazugehörige differenzierte Signal \dot{P}

Bild 90 (b) zeigt das differenzierte Signal \dot{P} , das aus den Differenzen des Messsignals ΔP pro Zeitintervall $\Delta t = 10 \text{ ms}$ bestimmt wird. In der Leistungsänderung ist gleichermaßen die signifikant höhere Streuung des Aerosol-Transmissionssignals gegenüber dem Laser-Transmissionssignal zu erkennen, während die absoluten Niveaus eliminiert sind. Das differenzierte Signal eignet sich besonders für eine allgemeingültige Detektion der

Shutter-Phasen. Hierbei ergeben sich zwei Optionen: Entweder anhand des Peaks zu Beginn des Shutter-Signals, der dem Niveauanstieg der Leistung aufgrund der ausbleibenden Extinktion entspricht, oder anhand der deutlich reduzierten Streuung innerhalb der Shutter-Phase, die dem Rauschpegel des optischen Aufbaus entspricht. Für die weitere Analyse wird als Kriterium die Streuung des differenzierten Signals verwendet, das aufgrund des definierten Rauschpegels des Lasers konstant und unabhängig vom Aerosolstrahl ist.

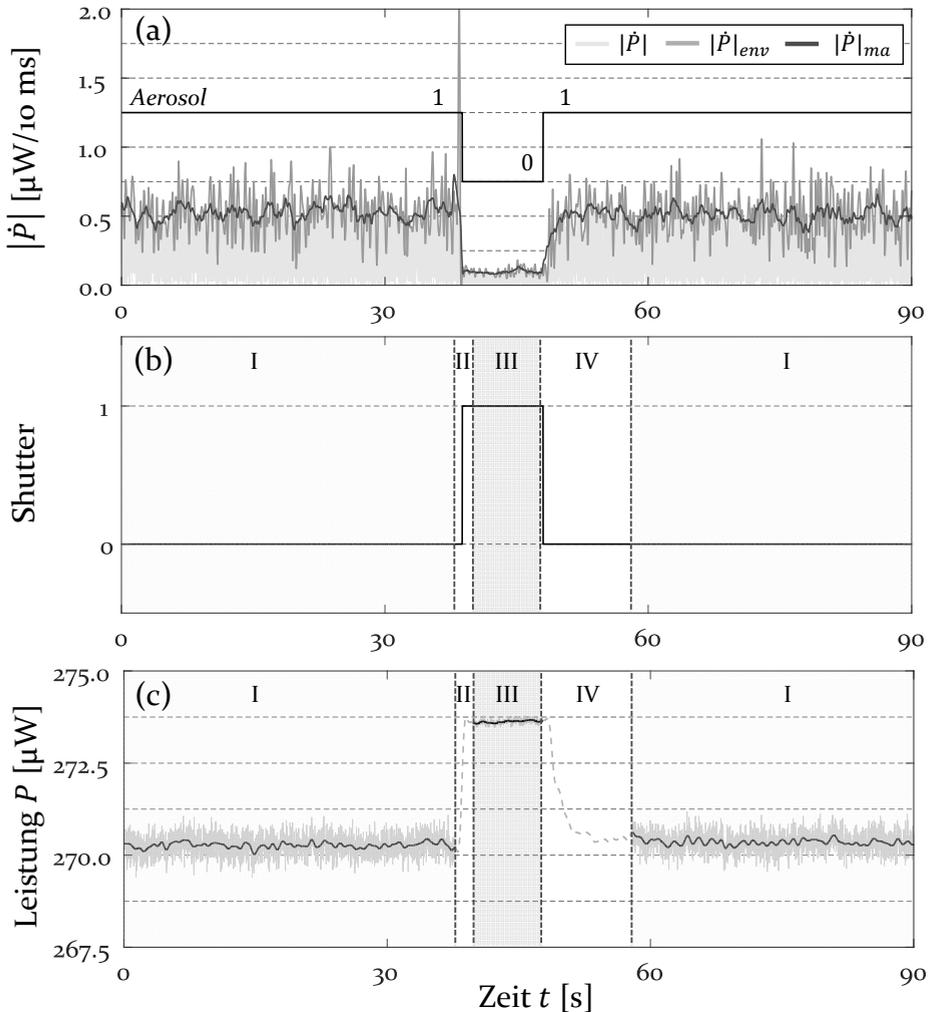


Bild 91: Beispiel für die Analyse einer Shutter-Sequenz: (a) Signalaufbereitung der differenzierten Leistung $|\dot{P}|$, (b) binäre Differenzierung und Phasen I-IV des Shutter-Prozesses sowie (c) deren Anwendung auf das gemessene Leistungssignal P

In Bild 91 sind die Berechnungsschritte der Signalaufbereitung über die binäre Differenzierung zwischen Laser- und Aerosol-Transmissionsphasen bis hin zu deren Anwendung auf das ursprüngliche Leistungssignal aus Bild 90 dargestellt. Zur Glättung des differenzierten Signals \dot{P} durchläuft dieses zu Beginn die drei in Bild 91 (a) gezeigten Iterationen: Die Betragsbildung $|\dot{P}|$, die Ermittlung des einhüllenden Signals $|\dot{P}|_{env}$ (*envelope*) bezogen auf die Signalmaxima und die Berechnung des gleitenden Durchschnitts $|\dot{P}|_{ma}$ (*moving average*). Mit dem bekannten Rauschpegel des verwendeten Lasers als Schwellenwert kann das binäre Shutter-Signal aus Bild 91 (b) bestimmt und auf den gemessenen Leistungsverlauf P angewendet werden (siehe Bild 91 (c)).

Der Shutter nimmt dabei die beiden binären Zustände Null und Eins für den Druckprozess beziehungsweise die Unterbrechung des Aerosolstrahls ein. Eine Einteilung des Shutter-Prozesses in zwei Phasen ist an dieser Stelle jedoch ungeeignet, da sich der Ein- und Ausschaltprozess des Shutters auch auf das Aerosol-Transmissionssignal auswirkt. Deshalb werden für die Einordnung des Leistungssignals vier Phasen gewählt. **Phase I** entspricht der reinen Aerosol-Transmissionsleistung. In **Phase II** leitet das Shutter-Signal eine schnelle Reduktion des Aerosolmassenstroms ein. Dieser Prozess erstreckt sich über einen Zeithorizont von etwa einer Sekunde. In **Phase III** liegt die unbeeinflusste Laser-Transmissionsleistung ohne Interaktion mit dem Aerosolstrahl vor. In diesem Zeitraum ist der Druckprozess vollständig unterbrochen. In **Phase IV** wird der Druckprozess wieder gestartet. Der Massenstrom pendelt sich allerdings erst nach zwei bis fünf Sekunden ein, bis schließlich in Phase I die Aerosol-Transmissionsleistung erneut erreicht wird.

Die Phasen II und IV markieren die jeweiligen Übergangsbereiche. Für die weiterführende Analyse bilden die isolierten Laser- und Aerosol-Transmissionssignale aus Phase I und Phase III die Datengrundlage.

Quantifizierung von Prozessschwankungen

Prozessschwankungen bezeichnen im betrachteten Kontext Fluktuationen und Drift im Aerosolmassenstrom. Zur Prüfung inwieweit sich die erfassten Laser- und Aerosoltransmissionssignale als Datengrundlage zur Prozessüberwachung eignen, sind in Bild 92 zwei exemplarische Leistungsmessungen mit unterschiedlichen Massenströmen dargestellt. Mit Werten von $\dot{m} = 4.9 \text{ mg/min}$ und $\dot{m} = 12.2 \text{ mg/min}$ ist bewusst ein großer Bereich gewählt, um die Effekte zu verdeutlichen.

Bild 92 (a) und (c) zeigen, dass die absoluten Werte der Signale auf einem unterschiedlichen Niveau liegen und spiegeln damit die zeitliche Drift in der Intensität des eingestrahlichten Laserlichtes wider. Es ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Massenstroms zu einer stärkeren Extinktion der eingestrahlichten Leistung führt. Zusätzlich steigt die Streuung im Aerosol-Transmissionssignal mit zunehmender Aerosolmenge an.

Die entsprechenden differenzierten Messsignale \dot{P} in Bild 92 (b) und (d) verdeutlichen die zuvor beschriebene Methode zur Differenzierung zwischen Aerosol- und Laser-Transmissionssignal. Der sprunghafte Anstieg zu Beginn der Shutter-Phase fällt hierbei analog zum Massenstrom unterschiedlich hoch aus, während die Streuung innerhalb der Shutter-Phase dieselben Werte annimmt und unabhängig vom Massenstrom ist.

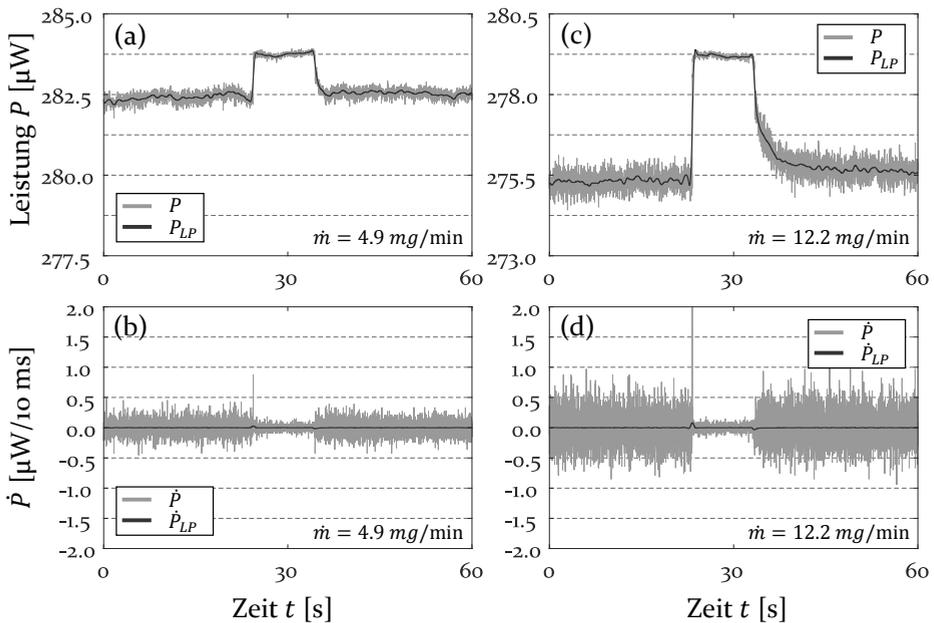


Bild 92: Beispiele für den Intensitätsverlauf und die Leistungsmessung P in Transmission mit einer Shutter-Sequenz für einen Aerosolstrahl mit Massenstrom $\dot{m} = 4.9 \text{ mg/min}$ (a) und $\dot{m} = 12.2 \text{ mg/min}$ (c) sowie die differenzierten Signale (b) und (d)

Für die Quantifizierung der Massenströme und somit der Prozessschwankungen wird der auf die Laser-Transmissionsleistung normierte Anstieg der transmittierten Leistung verwendet. Die Transmissionsänderung ΔT , die in (6.13) beschrieben ist, wird auf die Mittelwerte der Laser- und Aerosol-Transmissionsleistung über einen Zeitraum von jeweils 1.5 s bezogen. Die Transmissionsänderung für einen Massenstrom von $\dot{m} = 4.9 \text{ mg/min}$ beträgt dabei $\Delta T = 0.46 \%$ und $\Delta T = 1.38 \%$ für einen Massenstrom

von $\dot{m} = 12.2 \text{ mg/min}$. Das Verhältnis der ermittelten Transmissionsänderungen stimmt damit mit dem Verhältnis der beiden Massenströme relativ gut überein.

Die vorgestellte Methode legt den Grundstein für die Analyse von Prozessschwankungen für aerosolbasierte Drucksysteme. Die Transmissionsänderung ΔT eignet sich dabei sehr gut für die relative Bestimmung des Massenstroms \dot{m} und damit verbunden auch für die Bewertung der Prozessstabilität. Inwiefern die identifizierte Kenngröße auch für die absolute Bestimmung des Massenstroms eingesetzt werden kann, wird umfassend in Kapitel 6.2.3 erörtert.

Detektion von Prozesseinbrüchen

Prozessschwankungen, d.h. Variationen des Massenstroms, ergeben sich durch einen kontinuierlichen Anstieg bzw. eine Reduktion des Aerosolvolumenstroms. Diese können mit der zuvor beschriebenen Methode erfasst werden. Darüber hinaus können im Druckprozess allerdings auch Prozesseinbrüche eintreten. Diese senken nicht das allgemeine Niveau des Massenstroms, sondern setzen iterativ ein – der Aerosolstrahl pulsiert. Ein entsprechendes Szenario ist in Bild 93 dargestellt. Im zeitlichen Verlauf von (a) – (c) nehmen die Oszillationen im Aerosol-Transmissionssignal zu und erreichen für (c) nahezu das Niveau des Laser-Transmissionssignals.

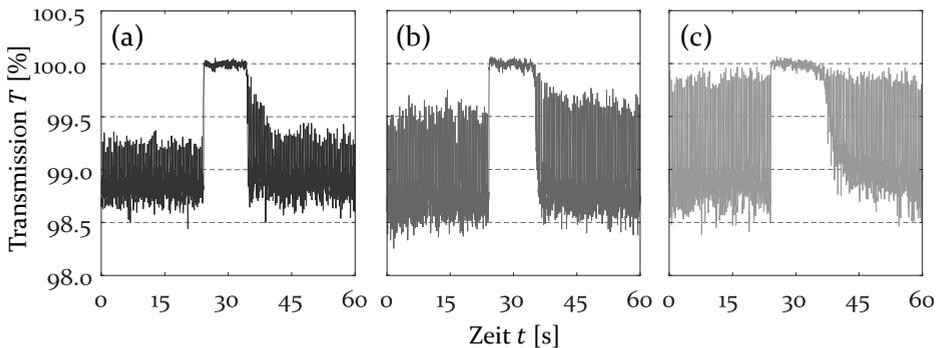


Bild 93: Beispiel einer Transmissionsmessung mit Shutter-Sequenz für einen Prozesseinbruch im Aerosolstrahl in zeitlicher Entwicklung im Verlauf von (a) – (c)

Dieses Phänomen tritt ein, wenn sich Fluktuationen im austretenden Volumenstrom einstellen. Aufgrund der zum Einsatz kommenden Massendurchflussregler der Volumenströme sind die Prozesseinbrüche in der Regel Verunreinigungen oder Leckagen im Drucksystem geschuldet. In den

meisten beobachteten Fällen findet eine Bildung von Tröpfchen an der Druckdüse statt, die sich auf Grund von Verwirbelungen ablagern. [9, 33, 55, 67]

Prozesseinbrüche sind im Druckbild nicht sofort erkennbar. Eine frühzeitige Detektion anhand der Streuung des Aerosol-Transmissionssignals stellt somit einen weiteren Schritt zur Verbesserung der Prozessstabilität bzw. Sicherstellung der Druckqualität dar. Die vorliegende Datengrundlage ist allerdings noch nicht ausreichend für eine zuverlässige Implementierung der Detektionsmethode, da Prozesseinbrüche nur sporadisch eintreten. Weiterführende Untersuchungen sind hierfür erforderlich.

6.2.3 Korrelation der Transmission mit dem Massenstrom und Prozessparametern

Die zuvor diskutierte Korrelation der Transmissionsänderung ΔT mit dem Massenstrom \dot{m} gewährleistet die Prozessüberwachung in einem fest gewählten Arbeitspunkt mit definierten Prozessparametern. Mit diesem Vorgehen und in Kombination mit entsprechenden Regelkreisen kann die Prozessstabilität erhöht werden.

In einem weiterführenden Schritt wird evaluiert, inwieweit die Bestimmung des absoluten Massenstroms möglich ist. Dazu werden die Volumenströme Atomizer, VI-Exhaust, VI-Sheath und Sheath variiert, der resultierende Massenstrom ermittelt und der Einfluss auf die Transmissionsänderung analysiert.

Korrelation mit dem Massenstrom

In Bild 94 ist der gemessene Massenstrom, der sich im untersuchten Parameterraum einstellt und mittels Hochpräzisionswaage ermittelt wird, gegenüber der Transmissionsänderung ΔT aufgetragen. Der Massenstrom mit Werten von 2.9 mg/min bis 13.1 mg/min führt zu Transmissionsänderungen von 0.03 % bis 1.28 %. Die generelle Tendenz bestätigt dabei den in Gleichung (6.12) gegebenen proportionalen Zusammenhang zwischen Transmissionsänderung und Massenstrom. Allerdings kann der Massenstrom nur indirekt anhand der Volumenströme variiert werden, die sich de facto auch auf weitere Charakteristika des Aerosolstrahls auswirken und somit zu einer Abweichung von der linearen Proportionalität führen. Dies beeinflusst sowohl die Streuung als auch den Kurvenverlauf aus Bild 94.

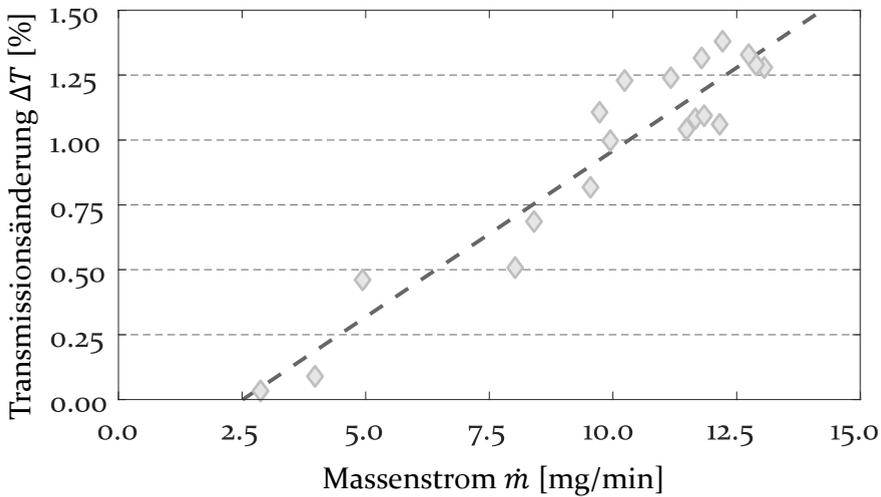


Bild 94: Transmissionsänderung ΔT in Abhängigkeit vom Massenstrom \dot{m} für unterschiedliche Volumenströme von Atomizer, VI-Exhaust und VI-Sheath

Korrelation mit Prozessparametern

Die ermittelte Transmissionsänderung ΔT ist somit isoliert betrachtet nicht hinreichend für die Bestimmung des Massenstroms \dot{m} . Um den Einfluss der Volumenströme auf die Eigenschaften des Aerosolstrahls bei gleichzeitig konstantem Massenstrom zu analysieren, kann der Sheath-Flow variiert werden. Dabei bleiben die Parameter des Aerosol-Flow, d.h. Atomizer, VI-Exhaust und VI-Sheath unverändert.

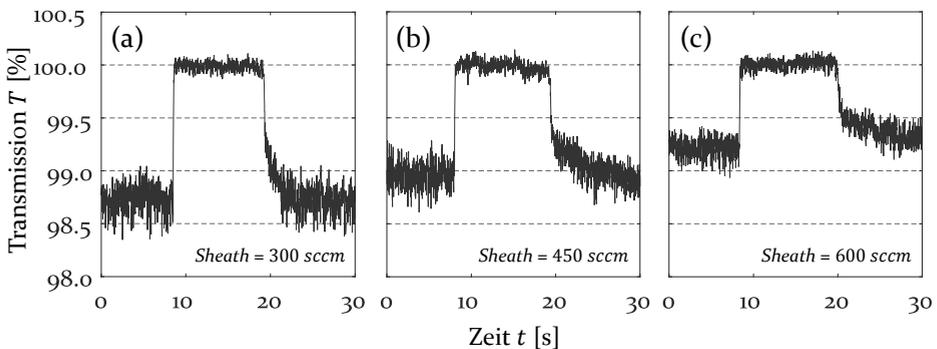


Bild 95: Transmissionssignal T mit Shutter-Sequenz für einen konstanten Massenstrom und variierenden Sheath-Flow (a) 300 sccm, (b) 450 sccm, (c) 600 sccm

Bild 95 zeigt das Transmissionssignal für einen konstanten Massenstrom und einen Anstieg des Sheath-Flow von 300 sccm (a) über 450 sccm (b) auf 600 sccm (c). Es ist ersichtlich, dass die Transmission mit zunehmendem Volumenstrom sinkt. Ein Anstieg im Sheath-Flow bewirkt eine Erhöhung der Partikelgeschwindigkeit und damit die Reduzierung des Aerosolstrahldurchmessers wie auch der relativen Schnittfläche von Laser- und Aerosolstrahl. [33, 14, 55, 56] Diese Effekte führen – trotz konstantem Massenstrom – zu der in Bild 95 aufgeführten Transmissionsänderung. Die Betrachtung der Transmissionsänderung ΔT muss deshalb stets unter Einbeziehung aller Volumenströme erfolgen.

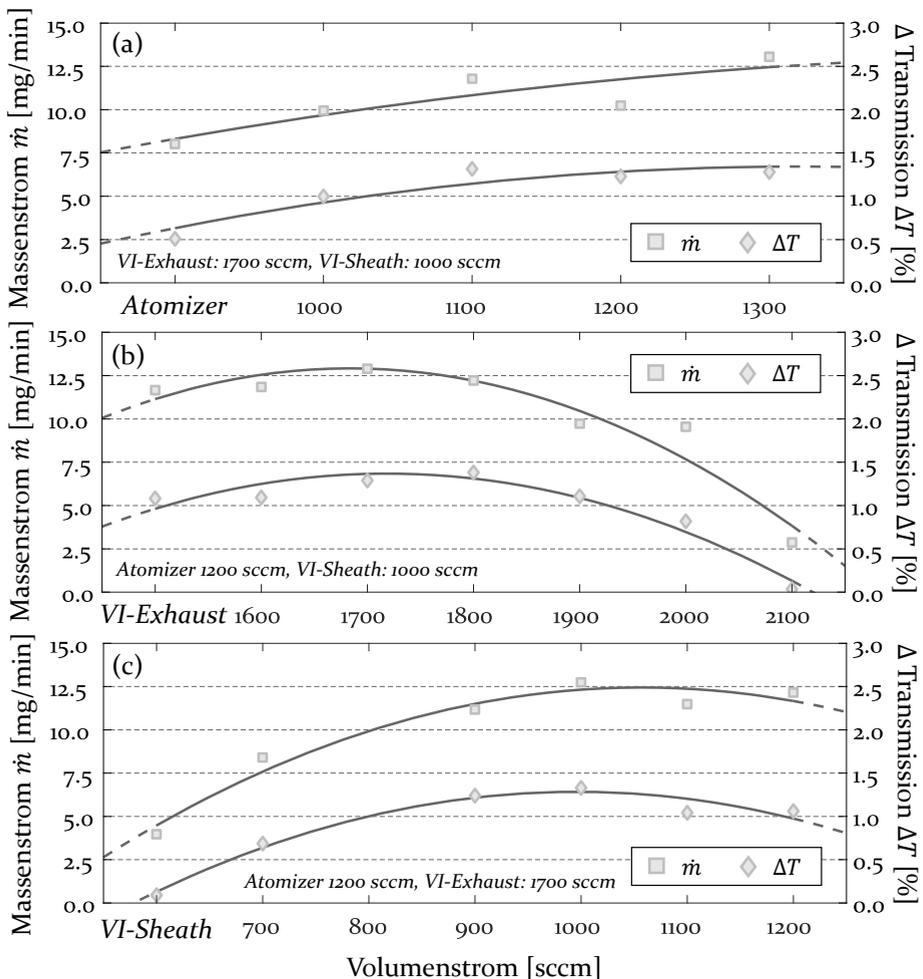


Bild 96: Korrelation des Massenstroms \dot{m} und der Transmissionsänderung ΔT mit den Volumenströmen Atomizer (a), VI-Exhaust (b) und VI-Sheath (c)

In Bild 96 ist die Versuchsreihe aus Bild 94 in Abhängigkeit der Volumenströme Atomizer, Exhaust und Virtual Impactor bei konstantem Sheath-Flow dargestellt. Die Parametervariation erfolgt in zufälliger Reihenfolge und für jeden Parameter isoliert betrachtet. Die Referenzwerte für die Volumenströme Atomizer, VI-Exhaust und VI-Sheath sind 1200 sccm, 1700 sccm und 1000 sccm. Neben dem Massenstrom \dot{m} ist zudem die Transmissionsänderung ΔT gegen die Volumenströme aufgetragen. Es ergibt sich eine für aerosolbasierte Drucktechnologien typische Abhängigkeit des Massenstroms von den Prozessparametern. [8, 150] Für alle drei Volumenströme können die Kurvenverläufe mit Polynomen zweiten Grades beschrieben werden. Dies gilt sowohl für den Massenstrom als auch die Transmissionsänderung, deren Kurvenverläufe proportional zueinander verlaufen. Dabei spiegeln sich selbst Abweichungen im Kurvenverlauf des Massenstroms, die unter anderem einer Massendrift geschuldet sind, gleichermaßen im Transmissionssignal wider.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass die Bestimmung des Massenstroms mit Hilfe des Transmissionssignals möglich ist. Allerdings müssen für eine absolute Quantifizierung des Massenstroms zusätzlich die Volumenströme berücksichtigt werden.

Charakterisierung des Aerosolstrahls

Für die Bestimmung des Laser-Transmissionssignals als Referenzwert wurde in den bisherigen Analysen eine Shutter-Sequenz eingesetzt. Diese zeichnet sich durch den universellen Einsatz für alle Integrationsvarianten der Laser-Transmissions-Einheit in das Drucksystem aus. Im vorliegenden Fall der stationären Integration kann die Referenz zum Laser zudem anhand einer relativen Bewegung zwischen Aerosol- und Laserstrahl erzielt werden. Mit dieser Methode können detailliertere Aussagen über die Form und den Durchmesser des Aerosolstrahls sowie die Partikelgeschwindigkeit getroffen werden.

In Bild 97 (a) sind die gemessenen und das gemittelte Transmissionssignal und in (b) die geometrische Anordnung der beiden sich senkrecht kreuzenden Strahlen dargestellt. Die Fußbreite des Transmissionssignals d_S ergibt sich für die eingestellte konstante Verfahrensgeschwindigkeit von $v = 10 \text{ mm/min}$ und einer gemessenen Zeitspanne von $t = 5.3 \text{ s}$ zu $883 \mu\text{m}$. Über den Zusammenhang $d_S = d_L + d_A$ und den eingestellten Laserstrahldurchmesser, der im Schnittpunkt auf $d_L = 610 \mu\text{m}$ fokussiert

wird, berechnet sich für die hier gewählten Versuchsbedingungen ein Aerosolstrahldurchmesser von $d_A = 273 \mu\text{m}$.

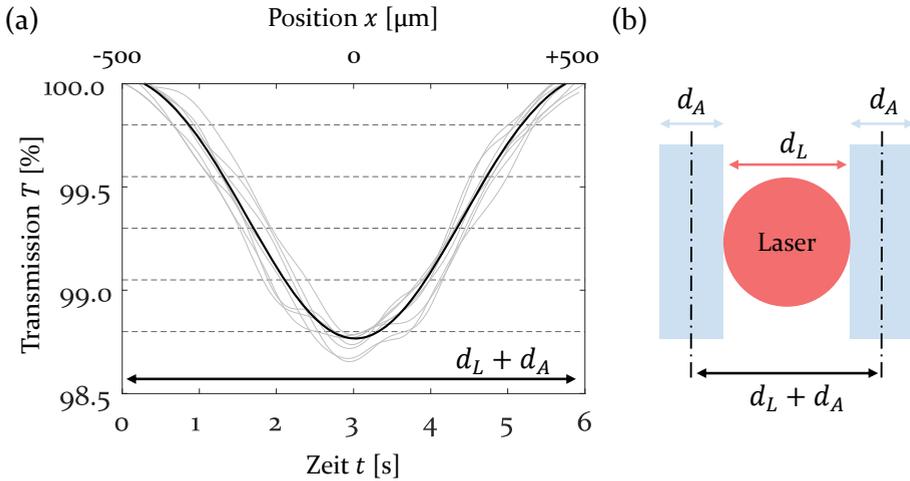


Bild 97: Gemessene Transmissionssignale und gemittelter Kurvenverlauf für den Strahldurchtritt von Aerosolstrahl zu Laserstrahl (a) sowie die geometrische Anordnung von Laser- und Aerosolstrahl mit den Strahldurchmessern d_L und d_A (b)

Hieraus kann zudem über die Beziehung $Q_A = \dot{V}_A = A_A \cdot v_A$ die Geschwindigkeit des Aerosolvolumenstroms berechnet werden. Mit einem Aerosol-Flow von 500 sccm , der dem Aerosolvolumenstrom Q_A entspricht, ergibt sich daraus eine Geschwindigkeit von $v_A = 142 \text{ m/s}$, die sich mit den Ergebnissen aus der Literatur deckt. [3, 55] Auf Basis von Formel (6.12) lässt sich mit der Beziehung für den Volumenstrom die Geschwindigkeit v_A durch den Aerosolvolumenstrom Q_A und die Aerosolquerschnittsfläche A_A über die Beziehung $A_A = \pi/4 \cdot d_A^2$ durch den Aerosolstrahldurchmesser d_A ersetzen. Der Massenstrom \dot{m} ergibt sich zu:

$$\dot{m} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{m_p}{C_E} \cdot \frac{Q_A \cdot \Delta T}{\varepsilon \cdot d_A} \quad (6.14)$$

Damit ist eine Berechnung des Massenstroms \dot{m} aus der Transmissionsänderung ΔT , dem Aerosolvolumenstrom Q_A , dem Aerosolstrahldurchmesser d_A und dem Anteil der relativen Schnittfläche ε von Laser- und Aerosolstrahl möglich.

6.3 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Abschnitt wurde die Funktionsweise und der Aufbau des neu entwickelten Laser-Transmissions-Messsystems zur Analyse von aerosolbasierten Drucktechnologien beschrieben. Das Messprinzip beruht dabei auf der Transmissions- bzw. Extinktionsmessung an einem Partikelkollektiv. Die Laserquelle wurde außerhalb der Druckanlage positioniert und die Messeinheit als stationäre Variante integriert.

Für die Bestimmung der Transmission wurde das Laser-Transmissions-signal als Referenz zum Aerosol-Transmissionssignal verwendet, das sowohl durch eine Shutter-Sequenz als auch durch eine relative Bewegung von Aerosol- zu Laserstrahl ermittelt werden kann. Die sich daraus berechnende Transmissionsänderung ermöglicht eine umfangreiche Charakterisierung des Aerosolstrahls. Für einen definierten, nicht variierenden Messaufbau und konstante Prozessparameter kann der direkt proportionale Zusammenhang zwischen Massenstrom und Transmissionsänderung zur Überwachung der Prozessstabilität verwendet werden. Des Weiteren lassen sich Prozesseinbrüche über die Zunahme der Streuung des Aerosol-Transmissionssignals detektieren. Die Korrelation der Transmissionsänderung mit den Volumenströmen zeigt darüber hinaus, dass eine absolute Berechnung des Massenstroms möglich ist.

Die vorliegende Untersuchung legt den Grundstein für eine neue Betrachtung und Regelung aerosolbasierter Drucktechnologien. Mit Hilfe der Prozessüberwachung und entsprechender Regelkreise kann zukünftig ein stabiler Druckprozess mit konstanter Druckqualität gewährleistet werden. Zudem lassen sich der Parameterraum und die sich daraus ergebenden Massenströme deutlich effizienter analysieren. Der Aerosolmassenstrom kann dabei als direkt bestimmbare und variable Kenngröße für den Druckprozess eingesetzt werden.

Für weiterführende Analysen ist die Charakterisierung des Aerosolstrahls durch die relative Bewegung von Laser- und Aerosolstrahl von hoher Bedeutung. Durch ein Abtasten des Aerosolstrahls mit dem Laser in unterschiedlicher Distanz zum Düsenaustritt können so Aussagen über die Geometrie des Aerosolstrahls und die Partikelgeschwindigkeit abgeleitet werden.

Eine Validierung der verschiedenen Integrationsvarianten aus Kapitel 6.1.3 sowie weitere Modifikationen des Aufbaus sind zudem von hohem Interesse. Denkbar ist unter anderem die Verwendung eines Strahlteilers um kontinuierlich das Transmissionssignal zu bestimmen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das übergeordnete Forschungsziel der vorliegenden Dissertationsschrift liegt in einer umfangreichen Untersuchung des Funktionalisierungsprozesses von aerosolbasierten Drucktechnologien und kann in zwei zentrale Themenkomplexe untergliedert werden. Der erste Forschungsschwerpunkt behandelt die Evaluierung der Druckqualität applizierter Strukturen auf technischen Oberflächen. Hierfür wurde eine Methodik erarbeitet, die die aktuellen Verfahren erweitert und dadurch nicht nur Wechselwirkungen zwischen Qualitätsparametern berücksichtigt, sondern vor allem auch die Substratqualität als Einflussfaktor in die Analysen mit aufnimmt. Im zweiten Forschungsschwerpunkt wurde ein Laser-Transmissions-Messsystem für eine Echtzeit-Charakterisierung des Aerosolstrahls entwickelt. Dies ermöglicht für aerosolbasierte Drucktechnologien eine in situ Prozessüberwachung des Massenstroms.

Das verwendete Aerosol-Jet-Drucksystem ist den funktionalen Drucktechnologien zuzuordnen und wurde für die Applikation von Leiterbahnen eingesetzt. Mit der Zielstellung zur partiellen Substitution des Kabelbaums in der Luftfahrt soll dabei die Signal- und Leistungsvernetzung im Bereich der Flugzeugkabine durch eine Funktionalisierung der Verkleidungselemente realisiert werden. Hierzu wurde untersucht, inwieweit der Druck von Leiterbahnen auf Sandwichbauteilen in Leichtbauweise möglich ist.

Der Herstellungsprozess von funktionalisierten Verkleidungselementen kann grundsätzlich in zwei Varianten erfolgen. Zum einen durch einen zweidimensionalen Druckprozess auf Prepreg-Halbzeugen mit einem nachgelagerten Pressprozess, zum anderen durch eine Funktionalisierung bereits gefertigter, gekrümmter Sandwichbauteile mit einer 3D-fähigen Drucktechnologie. Dabei zeichnet sich letztere Prozessreihenfolge durch eine höhere Druckqualität aus. Zudem erfordert die Integration elektronischer Komponenten und die Anbindung an das Bordnetz zwangsläufig eine direkte Applikation leitfähiger Strukturen auf den gepressten Sandwichbauteilen. Mit der verwendeten Silbernanopartikelntinte wird eine Leitfähigkeit erreicht, die einem Viertel der von Reinsilber entspricht. Die grundlegenden Untersuchungen der vorliegenden Arbeit sind vielversprechend und deuten auf eine zukünftige Umsetzung hin. Die sich daraus ergebenden Vorteile sind zahlreich und reichen von einer Erhöhung des Automatisierungsgrades, über Einsparungen in Gewicht und Betriebskosten bis hin zur Funktionserweiterung durch unter anderem Antennen, Sensoren und Heizstrukturen.

Die Analyse der gedruckten Strukturen erfolgt mit einem Laserscannmikroskop. Mit einer Schwellenwertanalyse werden dabei Mikroskopbilder auf Basis der Laserintensität in Segmente mit Leiterbahn, Overspray und Substrat aufgeteilt. Die entstehende binäre Maske wird anschließend auf das Höhenprofil angewendet. Dieser automatisierte Prozess liefert eine umfangreiche Datenbasis, die für den verwendeten volatilen Druckprozess erforderlich ist und mit der eine fundierte Auswertung erst ermöglicht wird. Zudem ist dadurch eine simultane Analyse des Leiterbahnquerschnitts, der Leiterbahnkontur, des Oversprays und des spezifischen Widerstands unter Berücksichtigung wechselseitiger Beziehungen realisierbar.

Als Substratmaterialien werden die dem Anwendungsfall entnommenen Faserverbundwerkstoffe in Sandwichbauweise eingesetzt. Diese weisen im Vergleich zu konventionellen Substraten eine vergleichsweise geringe Oberflächengüte auf. Eine detaillierte Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften in Form der Oberflächenwechselwirkung und der Oberflächentopographie ist daher essenziell. Für eine gute Benetzung ist entscheidend, dass der absolute Wert der Oberflächenspannung der Tinte kleiner oder gleich der Oberflächenenergie der Substrate ist und die relativen Verhältnisse der dispersen und polaren Anteile übereinstimmen. Die Oberflächenspannung der Silbernanopartikeltinte ist vom Hersteller angegeben, die Bestimmung der freien Oberflächenenergie erfolgt mit der etablierten OWRK-Methode. Der Fokus liegt allerdings auf der Topographie der technischen Oberflächen, deren Quantifizierung auf Basis der spektralen Leistungsdichte durchgeführt wird, die die Rauigkeitskomponenten nach der Wellenzahl aufschlüsselt. Mit diesem Vorgehen ist eine umfassende Beschreibung der Topographie, die Erfassung von lateralen Strukturen sowie der Nachweis und die Identifizierung von Transportprozessen auf der Substratoberfläche möglich.

Die Druckqualität wurde anhand einer simultanen Analyse des Leiterbahnquerschnitts, der Leiterbahnkontur, des Oversprays und des spezifischen Widerstands evaluiert und für die Einflussgrößen Schichtanzahl, Druckgeschwindigkeit, Düsenabstand und Substratrauigkeit untersucht. Eine ansteigende Schichtanzahl führt ebenso wie eine Reduzierung der Druckgeschwindigkeit zu einer Vergrößerung der Querschnittsfläche, -höhe und -breite sowie zu einem Rückgang im Overspray und einer Verbesserung der Leiterbahnkontur. Eine Erhöhung des Druckabstands wirkt sich nicht auf die absolute Querschnittsfläche aus, führt allerdings zu einer Verbreiterung der Leiterbahn. Line Edge Roughness und Overspray steigen signifikant mit dem Abstand der Druckdüse zum Substrat an. Eine

Erhöhung der Substratrauigkeit führt zu keiner Änderung in der Leiterbahnbreite – spiegelt sich allerdings in einem Rückgang der gemessenen Leiterbahnhöhe und Querschnittsfläche wider, da die Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterbahn optisch nicht erfasst werden kann. Der spezifische Widerstand nimmt generell mit zunehmender Querschnittsfläche ab und erreicht asymptotisch einen Grenzwert. Ein Anstieg der Substratrauigkeit äußert sich in einem höheren spezifischen Widerstand. Es wurde gezeigt, dass die effektiv leitfähige Querschnittsfläche zwischen der realen und der gemessenen Querschnittsfläche liegt. Mit Hilfe der spektralen Leistungsdichte wird zudem der Glättungseffekt der Silbernanopartikelntinte quantifiziert. Als dominanter Transportprozess wird sowohl anhand der Leiterbahnoberfläche als auch der Leiterbahnkontur viskoses Fließen nachgewiesen.

Die geringe Prozessstabilität aerosolbasierter Drucktechnologien ist eine zentrale Herausforderung mit der die Forschung anwendungsübergreifend konfrontiert ist und erfordert ein kontinuierliches Monitoring-System zur Analyse des Aerosolstrahls. Lösungsansätze zur Bestimmung des Massenstroms auf Basis des Abscheidevolumens oder der applizierten Leiterbahngeometrie liegen bereits vor, stellen allerdings nur indirekte Vorgehensweisen dar. Direkte Analysen sind durch optische Verfahren realisierbar. Diese basieren auf der Auswertung der Partikelstreuung und ermöglichen die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und Partikelgeschwindigkeit, sind allerdings nur für Partikelgrößen $> 5 \mu\text{m}$ anwendbar und damit für aerosolbasierte Drucktechnologien mit Partikelgrößen von $1 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$ nicht geeignet.

Das entwickelte Laser-Transmissions-Messsystem zur Charakterisierung des Aerosolstrahls liefert eine neue Methode zur in situ Prozessüberwachung aerosolbasierter Drucktechnologien. Das Messprinzip beruht auf der Transmissions- bzw. Extinktionsmessung an einem Partikelkollektiv. Es wurde gezeigt, dass die Änderung im Transmissionssignal bei einer Interaktion von Laser- und Aerosolstrahl mit dem resultierenden Massenstrom korreliert. Die Gegenüberstellung der Transmissionssignale mit und ohne Aerosol-Interaktion kann dabei durch eine Shutter-Phase oder eine relative Bewegung von Aerosol- und Laserstrahl realisiert werden. Für einen definierten Messaufbau mit konstanten Prozessparametern wird ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Massenstrom und Transmissionsänderung festgestellt. Das Verfahren eignet sich somit nicht nur für die Prozessüberwachung, sondern auch für die Regelung des Massenstroms.

Aus den dargestellten Forschungsergebnissen ergeben sich sowohl aus anwendungsorientierter als auch aus technologischer Sicht zahlreiche Anknüpfungspunkte, um den wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Fortschritt weiterzuentwickeln. Diese umfassen im Bereich der Luftfahrt eine umfangreiche Funktionserweiterung von Verkleidungselementen in Richtung intelligenter Komponenten, die Umsetzung neuer Anwendungsmöglichkeiten wie unter anderem gedruckte Heizsysteme und die Systemintegration an das Bordnetz.

Des Weiteren sollte die Erweiterung der im Rahmen dieser Arbeit konzipierten Methodik zur Charakterisierung von gedruckten Leiterbahnen unter Berücksichtigung der Substrateigenschaften im Fokus weitführender Forschungsprojekte stehen. Schwerpunkte hierbei sollten die Miteinbeziehung weiterer Leiterbahnkenngrößen wie die Haftfestigkeit, die Stromtragfähigkeit sowie die Auswirkungen von Umwelteinflüssen sein. Zudem ist eine umfassende Analyse von Transportprozessen für unterschiedliche Kombinationen von Tinten mit variierenden Oberflächenspannungen und Substraten mit variierenden Oberflächenenergien ein wichtiger Schritt um zukünftig die Leiterbahngeometrie nicht nur zu simulieren, sondern gezielt und mit hoher Genauigkeit zu beeinflussen.

Das entwickelte Laser-Transmissions-Messsystem zur Charakterisierung des Aerosolstrahls besitzt ein enormes Potential für technologische Weiterentwicklungen. Dieses umfasst eine detaillierte Strahlcharakterisierung, die Integration eines Laser-Transmissions-Messsystems in unterschiedlichen Modifikationen sowie die Implementierung von Regelkreisen zur Optimierung der Prozessstabilität.

8 Summary and Outlook

The primary objective of the presented thesis is an extensive investigation of aerosol-based printing technologies and can be divided into two main topics. Within the first research topic, the printing quality of applied structures on technical surfaces is evaluated. For this purpose, a methodology for analyzing the printing quality was developed which not only considers interdependencies between quality parameters but also includes the substrate quality as an influencing factor. The focus of the second research topic is on the development of a laser transmission measuring system for characterizing the aerosol beam in real-time. This novel approach enables an in situ process monitoring of the mass flow for aerosol-based printing technologies.

The utilized aerosol-jet printing system can be assigned to the functional printing technologies and was used for the application of electroconductive paths. With the aim of partially substituting the cable harness in aerospace applications the presented concept examines if cabin interior components can be functionalized by directly printing conductive tracks on lightweight sandwich structures.

Two alternative manufacturing sequences were identified. The printing process can either take place before or after the pressing process of the sandwich components. This means that either prepreg materials are functionalized in a planar 2D printing process or curved sandwich components are functionalized in a 3D printing process. The chosen production sequence is the second one as it shows superior printing quality. In addition, the integration of electronic components as well as the connection to the existing on-board electrical system require the application of conductive ink on the final cabin interior components. A conductivity of a fourth of bulk silver was achieved with the selected silver nanoparticle ink. The fundamental research of the presented study shows promising results and indicates a future implementation in aerospace applications. The derived advantages from the functionalization of cabin interior components are manifold and range from an increased degree of automation and a reduction in weight and operating costs to an enhanced scope of applications by integrating antennas, sensors, and heating structures.

The analysis of the printed structures is based on images of a confocal laser scanning microscope. These images are separated into segments with substrate material, conductive paths, and overspray by a threshold analysis of

their laser intensity. The resulting binary mask is then applied onto the height profiles. This automated process provides a comprehensive data base which is needed for the volatile printing process and which is laying the foundation for a statistically profound evaluation. This method allows simultaneous analysis of the conductive track, the line contour, the overspray and the specific resistance including mutual interactions.

Based on the application fibre reinforced composites in a lightweight sandwich construction were used as substrate materials. These composites have a relatively poor surface quality as compared to conventional substrates. Therefore, a detailed analysis of the surface characteristics with respect to chemical surface interaction and surface topography is essential. For a good wetting behavior it is crucial that the absolute value of the surface tension of the silver ink is less or equal to the free surface energy of the substrate and that the ratios of dispersive and polar components are comparable. The surface tension of the silver nanoparticle ink is given by the manufacturer; the free surface energy of the substrate is determined by the well-established OWRK method. The focus, however, is on the evaluation of the topography of technical surfaces which are quantified by power spectral density analysis providing wave number dependent roughness components. With this approach a comprehensive description of the surface topography including lateral structures is possible. Furthermore, transport processes of functional ink on the surface of the substrate can be identified.

The printing quality was evaluated by a simultaneous analysis of the conductive track, the line contour, the overspray, and the specific resistance and was investigated for a variation in the number of layers, printing velocity, nozzle distance, and substrate surface roughness. An increasing number of layers and a reduction in printing velocity result in a larger cross-sectional area, height, and width of the conductive tracks as well as in a reduction in overspray and an improved line contour. A larger distance between nozzle and substrate has no impact on the absolute cross-sectional area but leads to a widening of the track and a significant increase in line edge roughness and overspray. An increase in surface roughness has no impact on the width of the conductive tracks but results in a reduction of the measured height and cross-sectional area. This is due to the operating principle of the optical analysis which cannot capture the interface between substrate and conductive track. The specific resistance decreases with an increasing cross-sectional area and asymptotically reaches a limiting value. An increase in substrate surface roughness results in a higher specific resistance. The presented study demonstrates that the effective conductive cross-sectional area is in between the real and measured cross-

sectional area. By using the power spectral density analysis, smoothening effects of the silver nanoparticle ink can be quantified. Based on the surface analysis of the conductive tracks as well as on the analysis of the line contour viscous flow is identified as dominating transport process.

Regardless of the application, the lack of process stability is one of the key challenges for aerosol-based printing technologies and requires a monitoring system for continuously characterizing the aerosol beam. Methods for determining the aerosol mass flow based on the deposited volume or based on the geometry of the conductive tracks were already developed but only represent indirect methods for quantification. A direct approach can be achieved by using optical methods. These are based on particle scattering and allow the determination of the particle size distribution and the velocities of the particles. However, they are only applicable for particle sizes larger than five microns and thus not suitable for aerosol-based printing technologies with particle sizes in the range of one to ten microns.

The developed laser transmission measuring system for the characterization of the aerosol beam provides a new method for an in situ process monitoring of aerosol-based printing technologies. The principle is based on measuring the transmission respectively the extinction of a particle collective. It was proven, that the change in transmission occurring with an interaction between laser and aerosol beam correlates with the aerosol mass flow. The transmission signals with and without aerosol interaction can be obtained by either a shutter process or a relative movement between aerosol and laser beam. For a defined set-up with constant process parameters, a direct correlation between aerosol mass flow and changes in transmission can be determined. Therefore, the presented approach is not only suitable for process monitoring but also for adjusting the aerosol mass flow.

Based on the findings achieved within this study new applications and research topics arise which further increase the economic and scientific impact of aerosol-based printing technologies. These include in the field of aviation a substantial extension of functionalities of cabin interior components towards smart products, the implementation of new applications like printed heating structures as well as the integration of printed electronics to the cable harness.

Furthermore, the focus of subsequent research projects should be on the extension of the methodology developed within this thesis analyzing the printing quality including substrate properties. Additional parameters should be covered as well, in particular the adhesive strength of the printed tracks, the current carrying capacity and the environmental impact on

printed electronics. A comprehensive analysis of transport processes for different combinations of inks and substrates with varying surface tension and surface free energy is also an important step not only towards the simulation of the resulting geometry of the printed track but also for accurately designing the desired geometry.

The developed laser transmission measuring system for characterizing the aerosol beam has an enormous potential for further technological evolutions. This includes a detailed characterization of the aerosol beam geometry, the integration of the laser transmission measuring system in different types of modifications as well as the implementation of a closed loop control system for improving the printing process stability.

9 Literaturverzeichnis

- [1] HON, K.K.B., L. LI und I.M. HUTCHINGS. Direct writing technology—Advances and developments [online]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, 57(2), S. 601-620. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2008.09.006
- [2] 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. Verfügbar unter: doi:10.1109/ICEPT.2009.5270702
- [3] HOEY, J.M., A. LUTFURAKHMANOV, D.L. SCHULZ und I.S. AKHATOV. A Review on Aerosol-Based Direct-Write and Its Applications for Microelectronics [online]. *Journal of Nanotechnology*, 2012, S. 1-22. ISSN 1687-9503. Verfügbar unter: doi:10.1155/2012/324380
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 8580:2003-09 - Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/9500683
- [5] GEBHARDT, A. *Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2016. ISBN 978-3-446-44401-0
- [6] REITELSHÖFER, S., M. GÖTTLER, P. SCHMIDT, P. TREFFER, M. LANDGRAF und J. FRANKE. *Aerosol-Jet-Printing silicone layers and electrodes for stacked dielectric elastomer actuators in one processing device*. In: *Proceedings of the SPIE*, 2016. Verfügbar unter: doi:10.1117/12.2219226
- [7] FRANKE, J. *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgossene Schaltungsträger*. München: Hanser, 2013. ISBN 978-3-446-43441-7
- [8] SUKESHINI, A.M., T. JENKINS, P. GARDNER, R.M. MILLER und T.L. REITZ. *Investigation of Aerosol Jet Deposition Parameters for Printing SOFC Layers*. In: *ASME 2010 8th International Fuel Cell*

- Science, Engineering and Technology Conference: Volume 1:* ASMEDC, 14. Juni 2010 - 16. Juni 2010, S. 325-332. ISBN 978-0-7918-4404-5. Verfügbar unter: doi:10.1115/FuelCell2010-33262
- [9] WILKINSON, N.J., M.A.A. SMITH, R.W. KAY und R.A. HARRIS. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing [online]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2019, 5, S. 1-21. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00170-019-03438-2
- [10] MARPLE, V.A. und C.M. CHIEN. Virtual impactors: a theoretical study [online]. *Environ. Sci. Technol.*, 1980, 14(8), S. 976-985. Verfügbar unter: doi:10.1021/es60168a019
- [11] VOGELER, F., W. VERHEECKE, A. VOET und H. VALKENAERS. An Initial Study of Aerosol Jet® Printed Interconnections on Extrusion-Based 3D-Printed Substrates [online]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 59(11), S. 689-696. Verfügbar unter: doi:10.5545/sv-jme.2013.999
- [12] SALARY, R. *Computational Fluid Dynamics Modeling and in situ Physicsbased Monitoring of Aerosol Jet Printing toward Functional Assurance of Additively-Manufactured, Flexible and Hybrid Electronics*. Dissertation. Binghamton University, 2018
- [13] GOTH, C., S. PUTZO und J. FRANKE. *Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications*. In: *2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC): IEEE*, 31. Mai 2011 - 3. Juni 2011, S. 1211-1216. ISBN 978-1-61284-497-8. Verfügbar unter: doi:10.1109/ECTC.2011.5898664
- [14] BINDER, S., M. GLATTHAAR und E. RÄDLEIN. Analytical Investigation of Aerosol Jet Printing [online]. *Aerosol Science and Technology*, 2014, 48(9), S. 924-929. ISSN 0278-6826. Verfügbar unter: doi:10.1080/02786826.2014.940439
- [15] SECOR, E.B. Guided ink and process design for aerosol jet printing based on annular drying effects [online]. *Flexible and Printed Electronics*, 2018, 3(3). Verfügbar unter: doi:10.1088/2058-8585/aadffd
- [16] SALARY, R., J.P. LOMBARDI, M. SAMIE TOOTOONI, R. DONOVAN, P.K. RAO, P. BORGESSEN und M.D. POLIKS. Computational Fluid Dynamics Modeling and Online Monitoring of Aerosol Jet Printing Process [online]. *Journal of Manufacturing*

- Science and Engineering*, 2017, **139**(2). ISSN 1087-1357.
Verfügbar unter: doi:10.1115/1.4034591
- [17] HEDGES, M. und A.B. MARIN. *3D Aerosol Jet® Printing - Adding Electronics Functionality to RP/RM*. In: *DDMC 2012, Direct Digital Manufacturing Conference*, 14. März 2012 - 15. März 2012
- [18] MAIWALD, M., C. WERNER, V. ZOELLMER und M. BUSSE. *INKtelligent printed strain gauges* [online]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, **162**(2), S. 198-201. ISSN 09244247.
Verfügbar unter: doi:10.1016/j.sna.2010.02.019
- [19] CHO, J.H., J. LEE, Y. XIA, B. KIM, Y. HE, M.J. RENN, T.P. LODGE und C.D. FRISBIE. *Printable ion-gel gate dielectrics for low-voltage polymer thin-film transistors on plastic* [online]. *Nature materials*, 2008, **7**(11), S. 900-906. ISSN 1476-1122.
Verfügbar unter: doi:10.1038/nmat2291
- [20] GRUNWALD, I., E. GROTH, I. WIRTH, J. SCHUMACHER, M. MAIWALD, V. ZOELLMER und M. BUSSE. *Surface biofunctionalization and production of miniaturized sensor structures using aerosol printing technologies* [online]. *Biofabrication*, 2010, **2**(1).
Verfügbar unter: doi:10.1088/1758-5082/2/1/014106
- [21] MARQUEZ, G.J., M.J. RENN und W.D. MILLER. *Aerosol-Based Direct-Write of Biological Materials for Biomedical Applications*. In: *MRS Proceedings*, 17. März 2011. Verfügbar unter: doi:10.1557/PROC-698-Q5.2.1
- [22] HA, M., J.-W.T. SEO, P.L. PRABHUMIRASHI, W. ZHANG, M.L. GEIER, M.J. RENN, C.H. KIM, M.C. HERSAM und C.D. FRISBIE. *Aerosol jet printed, low voltage, electrolyte gated carbon nanotube ring oscillators with sub-5 µs stage delays* [online]. *Nano letters*, 2013, **13**(3), S. 954-960.
Verfügbar unter: doi:10.1021/nl3038773
- [23] TAIT, J.G., E. WITKOWSKA, M. HIRADE, T.-H. KE, P.E. MALINOWSKI, S. STEUDEL, C. ADACHI und P. HEREMANS. *Uniform Aerosol Jet printed polymer lines with 30 µm width for 140 ppi resolution RGB organic light emitting diodes* [online]. *Organic Electronics*, 2015, **22**, S. 40-43. ISSN 15661199. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.orgel.2015.03.034
- [24] RENN, M.J., M. SCHRANDT, J. RENN und J.Q. FENG. *Localized Laser Sintering of Metal Nanoparticle Inks Printed with Aerosol*

- Jet® Technology for Flexible Electronics [online]. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 2017, **14**(4), S. 132-139. ISSN 1551-4897. Verfügbar unter: doi:10.4071/imaps.521797
- [25] AKHATOV, I.S., J.M. HOEY, O.F. SWENSON und D.L. SCHULZ. Aerosol flow through a long micro-capillary: collimated aerosol beam [online]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2008, **5**(2), S. 215-224. ISSN 1613-4982. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10404-007-0239-3
- [26] SCHULZ, D.L., J.M. HOEY, D. THOMPSON, O.F. SWENSON, S. HAN, J. LOVAASEN, X. DAI, C. BRAUN, K. KELLER und I.S. AKHATOV. *Collimated Aerosol Beam Deposition: Sub-5µm Resolution of Printed Actives and Passives*. In: *IEEE Transactions on Advanced Packaging*: IEEE, 2010, **33**(2), S. 421-427. Verfügbar unter: doi:10.1109/TADVP.2009.2038615
- [27] CAI, F., Y.-H. CHANG, K. WANG, C. ZHANG, B. WANG und J. PAPAPOLYMEROU. *Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies*. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 64(10): IEEE, 5. September 2016, S. 3208-3216. Verfügbar unter: doi:10.1109/TMTT.2016.2601907
- [28] HÖRBER, J., C. GOTH und J. FRANKE. *Aerosol-Jet Printing for Functionalization of Prototyping Materials for Electronic Applications*. In: *45th International Symposium on Microelectronics 2012: IMAPS - International Microelectronics and Packaging Society*, 9. September 2012 - 13. September 2012, S. 741-748. Verfügbar unter: doi:10.4071/isom-2012-WA65
- [29] HÖRBER, J., C. GOTH, J. FRANKE und M. HEDGES. *Electrical functionalization of thermoplastic materials by Aerosol Jet Printing*. In: *2011 IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference*: IEEE, 7. Dezember 2011 - 9. Dezember 2011, S. 813-818. ISBN 978-1-4577-1982-0. Verfügbar unter: doi:10.1109/EPTC.2011.6184525
- [30] REICHENBERGER, M., W. JILLEK, J. HÖRBER und J. FRANKE. *Functionalization of Thermoplastics using Inkjet- and Aerosoljet-Printing Technologies*. In: *10. International Congress MID*. Fürth, Deutschland, 2012
- [31] 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.
Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-030-03451-1_35
- [32] MAHAJAN, A. *New Approaches for Printed Electronics Manufacturing.* Dissertation. University of Minnesota, 2015
- [33] MAHAJAN, A., C.D. FRISBIE und L.F. FRANCIS. Optimization of aerosol jet printing for high-resolution, high-aspect ratio silver lines [online]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(11), S. 4856-4864. ISSN 1944-8244.
Verfügbar unter: doi:10.1021/am400606y
- [34] ECKSTEIN, R., G. HERNANDEZ-SOSA, U. LEMMER und N. MECHAU. Aerosol jet printed top grids for organic optoelectronic devices [online]. *Organic Electronics*, 2014, 15(9), S. 2135-2140. ISSN 15661199. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.orgel.2014.05.031
- [35] DEINER, L.J. und T.L. REITZ. Inkjet and Aerosol Jet Printing of Electrochemical Devices for Energy Conversion and Storage [online]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(7). ISSN 14381656. Verfügbar unter: doi:10.1002/adem.201600878
- [36] HÖRBER, J., K. SCHÜTZ, P. AMEND, M. SCHMIDT und J. FRANKE. *Selektives Laser- und Lichtsintern von Aerosol-Jet gedruckten Nano-Silbertinten für thermoplastische Schaltungsträger.* In: M. SCHMIDT, S. ROTH und P. AMEND, Hg. *Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik.* Bamberg: Meisenbach, 5. März 2013 - 6. März 2013, S. 235-252. ISBN 9783875253436
- [37] SCHÜTZ, K., J. HÖRBER und J. FRANKE. *Selective light sintering of Aerosol-Jet printed silver nanoparticle inks on polymer substrates.* In: *The 29th International Conference of the Polymer Processing Society*, 15. Juli 2013 - 19. Juli 2013, S. 732-735. ISBN 978-0-7354-1227-9. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.4873881
- [38] N, N. Paru Co. Ltd. *PG-007(EG, MOP) (Datenblatt).* 2016
- [39] BUFFAT, P. und J.-P. BOREL. Size effect on the melting temperature of gold particles [online]. *Physical Review A*, 1976, 13(6), S. 2287-2298. ISSN 0556-2791.
Verfügbar unter: doi:10.1103/PhysRevA.13.2287

- [40] 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). ISSN 0883-7694.
Verfügbar unter: doi:10.1088/0957-4484/19/17/175201
- [41] WERNER, C. *Untersuchungen zur Sinterung Aerosol Jet und Ink Jet gedruckter Ag- und CuNiMn-Mikrostrukturen*. Dissertation. Universität Bremen, 2014
- [42] DEARDEN, A.L., P.J. SMITH, D.-Y. SHIN, N. REIS, B. DERBY und P. O'BRIEN. A Low Curing Temperature Silver Ink for Use in Ink-Jet Printing and Subsequent Production of Conductive Tracks [online]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2005, **26**(4), S. 315-318. ISSN 1022-1336.
Verfügbar unter: doi:10.1002/marc.200400445
- [43] VERHEECKE, W., M. VAN DYCK, F. VOGELER, A. VOET und H. VALKENAERS. *Optimizing Aerosol Jet Printing of Silver Interconnects on Polyimide Film for Embedded Electronics Applications*. In: *8th International DAAAM Baltic Conference*. Tallinn, Estonia, 19. April 2012 - 21. April 2012, S. 373-379. ISBN 9789949232659
- [44] AGRAWAL, D.K. *Microwave sintering, brazing and melting of metallic materials*. In: THE MINERALS, METALS & MATERIALS SOCIETY, Hg. *Sohn International Symposium - Advanced Processing of Metals and Materials*. Vol. 4, 27. August 2006 - 31. August 2006. ISBN 978-0-87339-637-0
- [45] PERELAER, J., M. KLOKKENBURG, C.E. HENDRIKS und U.S. SCHUBERT. Microwave flash sintering of inkjet-printed silver tracks on polymer substrates [online]. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 2009, **21**(47), S. 4830-4834.
Verfügbar unter: doi:10.1002/adma.200901081
- [46] KO, S.H., H. PAN, C.P. GRIGOROPOULOS, C.K. LUSCOMBE, J.M.J. FRÉCHET und D. POULIKAKOS. All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles [online]. *Nanotechnology*, 2007, **18**(34). ISSN 0883-7694.
Verfügbar unter: doi:10.1088/0957-4484/18/34/345202
- [47] WEST, J., M. CARTER, S. SMITH und J. SEARS. *Photonic Sintering of Silver Nanoparticles: Comparison of Experiment and*

- Theory*. In: V. SHATOKHA, Hg. *Sintering - Methods and Products*: Intech Open, 2012. ISBN 978-953-51-0371-4.
Verfügbar unter: doi:10.5772/33519
- [48] 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
- [49] SMITH, M., Y.S. CHOI, C. BOUGHEY und S. KAR-NARAYAN. Controlling and assessing the quality of aerosol jet printed features for large area and flexible electronics [online]. *Flexible and Printed Electronics*, 2017, **2**(1).
Verfügbar unter: doi:10.1088/2058-8585/aa5af9
- [50] BINDER, S. *Aerosol jet printing. Contactless Deposition Technique for Solar Cell Metallization*. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2017. Werkstofftechnik aktuell. Band 15. ISBN 978-3-86360-153-9
- [51] TROPEA, C., A. YARIN und J.F. FOSS. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-662-49162-1
- [52] DOGGART, J., Y. WU und S. ZHU. Inkjet printing narrow electrodes with <math><50\ \mu\text{m}</math> line width and channel length for organic thin-film transistors [online]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(16), S. 163503. ISSN 1542-1406.
Verfügbar unter: doi:10.1063/1.3115830
- [53] FENG, J.Q. A Computational Analysis of Gas Jet Flow Effects on Liquid Aspiration in the Collision Nebulizer [online]. *Preprints*, 2018. Verfügbar unter: doi:10.20944/preprints201802.0128.v4
- [54] MARPLE, V.A. und K. WILLEKE. Impactor design [online]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1976, **10**(10), S. 891-896. ISSN 00046981.
Verfügbar unter: doi:10.1016/0004-6981(76)90144-X
- [55] CHEN, G., Y. GU, H. TSANG, D.R. HINES und S. DAS. The Effect of Droplet Sizes on Overspray in Aerosol-Jet Printing [online]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, **20**(8). ISSN 14381656.
Verfügbar unter: doi:10.1002/adem.201701084

- [56] SECOR, E.B. Principles of aerosol jet printing [online]. *Flexible and Printed Electronics*, 2018, 3(3).
Verfügbar unter: doi:10.1088/2058-8585/aace28
- [57] STOKES, G.G. On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums [online]. *Cambridge University Press*, 1901, S. 1-10. Verfügbar unter: doi:10.1017/CBO9780511702266.002
- [58] SAFFMAN, P.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow [online]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 22(2), S. 385-400. ISSN 0022-1120. Verfügbar unter: doi:10.1017/S0022112065000824
- [59] SAFFMAN, P.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow - Corrigendum [online]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1968, 31(3), S. 624. ISSN 0022-1120.
Verfügbar unter: doi:10.1017/S0022112068999990
- [60] MAHMUD, Z., J.M. HOEY, A. LUTFURAKHMANOV, J. DAUGS, O.F. SWENSON, D.L. SCHULZ und I.S. AKHATOV. *Experimental Characterization of Aerosol Flow Through a Micro-Capillary*. In: *ASME 2010 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels: Parts A and B*: ASMEDC, 1. August 2010 - 5. August 2010, S. 949-958. ISBN 978-0-7918-5450-1. Verfügbar unter: doi:10.1115/FEDSM-ICNMM2010-30794
- [61] LUKACS, P., A. PIETRIKOVA und T. ROVENSKY. Viscosity Measurement of Silver Based Nano-inks [online]. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2018, 62(4), S. 181-186. ISSN 2064-5260.
Verfügbar unter: doi:10.3311/PPEe.13312
- [62] ECKSTEIN, R. *Aerosol Jet Printed Electronic Devices and Systems*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): KIT, Karlsruhe, 2016
- [63] KIM, D., S. JEONG, B.K. PARK und J. MOON. Direct writing of silver conductive patterns: Improvement of film morphology and conductance by controlling solvent compositions [online]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(26). ISSN 1542-1406.
Verfügbar unter: doi:10.1063/1.2424671
- [64] WANG, K., Y.-H. CHANG, C. ZHANG und B. WANG. *Evaluation of quality of printed strain sensors for composite structural health monitoring applications*. In: V. BAILEY, Hg. *Proc. SAMPE Fall Technical 2013 Conference*, 2013, S. 21-24

- [65] ZHANG, H., S.K. MOON, T.H. NGO, J. TOU und A.B.M.Y. MOHAMED. *A hybrid machine learning approach for the quality optimization of a 3D printed sensor*. In: *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*: IEEE, 12. Dezember 2018 - 14. Dezember 2018, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-7528-1. Verfügbar unter: doi:10.1109/ICIRT.2018.8641641
- [66] OTSU, N. *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*: IEEE, 1979, 9(1), S. 62-66. Verfügbar unter: doi:10.1109/TSMC.1979.4310076
- [67] SALARY, R., J.P. LOMBARDI, P.K. RAO und M.D. POLIKS. *Online Monitoring of Functional Electrical Properties in Aerosol Jet Printing Additive Manufacturing Process Using Shape-From-Shading Image Analysis [online]*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, **139**(10). ISSN 1087-1357. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.4036660
- [68] GU, Y., D. GUTIERREZ, S. DAS und D.R. HINES. *Inkwells for on-demand deposition rate measurement in aerosol-jet based 3D printing [online]*. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, **27**(9). ISSN 1758-5090. Verfügbar unter: doi:10.1088/1361-6439/aa817f
- [69] N, N. Oseir Ltd. *HiWatch CS II - Fast and accurate cold particle data to maximize your results (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: https://oseir.com/wp-content/uploads/2019/05/HW_CS2_120519.pdf
- [70] N, N. LaVision Inc. *ParticleMaster System - Particle characterization by high-magnification shadow imaging (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.lavision.de/de/download.php?id=3173>
- [71] PISCHINGER, S. und U. SEIFFERT, Hg. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 8. aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016. ISBN 978-3-658-09527-7
- [72] MOURITZ, A.P. *Introduction to Aerospace Materials*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-1-85573-946-8

- [73] GERBER, N.C. *Noppenwaben als neue Kernwerkstoffe für Leichtbauanwendungen*. Dissertation. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2016
- [74] RUPANI, S., S. JANI und G. ACHARYA. Design, Modelling and Manufacturing aspects of Honeycomb Sandwich Structures: A Review [online]. *International Journal of Scientific Development and Research - IJSDR*, 2017, 2(4), S. 526-532. Verfügbar unter: doi:10.1712/ijedr.17013
- [75] N, N. Optomec Inc. *Aerosol Jet® - Marathon II Wide Feature Print Modul (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_marathon2_datasheet.pdf
- [76] SEIFERT, T., E. SOWADE, F. ROSCHER, M. WIEMER, T. GESSNER und R.R. BAUMANN. Additive Manufacturing Technologies Compared: Morphology of Deposits of Silver Ink Using Inkjet and Aerosol Jet Printing [online]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(2), S. 769-779. ISSN 0888-5885. Verfügbar unter: doi:10.1021/ie503636c
- [77] N, N. Neotech AMT GmbH. *15XSA/LBS 45XE (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: http://www.neotech-amt.com/wp-content/uploads/2014/03/DS_LBS_45XE.pdf
- [78] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN ISO 2409:2013-06, Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung (ISO 2409:2013); Deutsche Fassung EN ISO 2409:2013*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/1925137
- [79] SCHIRMER, J., J. ROUDENKO, M. REICHENBERGER, S. NEERMANN und J. FRANKE. *Adhesion Measurements for Printed Electronics: A Novel Approach to Cross Cut Testing*. In: *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*: IEEE, 16. Mai 2018 - 20. Mai 2018, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-5731-7. Verfügbar unter: doi:10.1109/ISSE.2018.8443665
- [80] WERDUNG, D. Airbus and Altran win Crystal Cabin Award with printed electrics technology [online], 11. April 2018 [Zugriff am: 20. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/04/airbus-and-altran-win-crystal-cabin-award-with-printed-electrics.html>

- [81] HAHN, D. Printed Electrics - Bedruckte Folien statt Kabelbäume [online], September 2019 [Zugriff am: 20. November 2019]. Verfügbar unter: <https://future.hamburg/project/printed-electrics/>
- [82] N, N. European Union Aviation Safety Agency (EASA). *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25)*. 2019 [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-25%20Amendment%2023.pdf>
- [83] N, N. Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment DO-160*. 2007
- [84] KWOK, D.L. und A.W. NEUMANN. *Contact angle measurements and criteria for surface energetic interpretation*. In: K.L. MITTAL, Hg. *Contact angle, wettability and adhesion. Volume 3*. Utrecht: VSP, 2003, S. 117-159. ISBN 90-6764-391-2
- [85] YUAN, Y. und T.R. LEE. *Contact Angle and Wetting Properties*. In: G. BRACCO und B. HOLST, Hg. *Surface Science Techniques*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, S. 3-34. ISBN 978-3-642-34242-4. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-642-34243-1_1
- [86] YOUNG, T. An essay on the cohesion of fluids [online]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95, S. 65-87. Verfügbar unter: doi:10.1098/rstl.1805.0005
- [87] LAUTH, G.J. und J. KOWALCZYK. *Einführung in die Physik und Chemie der Grenzflächen und Kolloide*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-47017-6
- [88] ZAPKA, W. *Handbook of industrial inkjet printing. A full system approach : Volume 1 & 2*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018. ISBN 978-3-527-33832-0
- [89] ZISMAN, W.A. *Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution*. In: F.M. FOWKES, Hg. *Contact Angle, Wettability, and Adhesion*. Washington, D.C., USA: American Chemical Society, 1964, S. 1-51. ISBN 0-8412-0044-0. Verfügbar unter: doi:10.1021/ba-1964-0043.ch001

- [90] LAKE, M. *Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung*. 2., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2016. Hanser-eLibrary. ISBN 978-3-446-44675-5
- [91] IZDEBSKA, J. und S. THOMAS. *Printing on polymers. Fundamentals and applications*. Waltham, USA: William Andrew Publishing, Elsevier, 2016. Plastics Design Library (PDL) Handbook Series. ISBN 978-0-323-37468-2
- [92] OWENS, D.K. und R.C. WENDT. Estimation of the surface free energy of polymers [online]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1969, **13**(8), S. 1741-1747. ISSN 00218995. Verfügbar unter: doi:10.1002/app.1969.070130815
- [93] RABEL, W. *Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren*. *Farbe und Lack*, 1971, **77**(10), S. 997-1005
- [94] KAELBLE, D.H. Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids [online]. *The Journal of Adhesion*, 1970, **2**(2), S. 66-81. ISSN 0021-8464. Verfügbar unter: doi:10.1080/0021846708544582
- [95] HEJDA, F., P. SOLAR und J. KOUSAL. *Surface Free Energy Determination by Contact Angle Measurements - A Comparison of Various Approaches*. In: J. SAFRÁNKOVÁ und J. PAVLŮ, Hg. *WDS 2010 - Proceedings of the 19th Annual Conference of Doctoral Students III*. Prague, Czech Republic: Matfyzpress, 1. Juli 2010 - 4. Juli 2010, S. 25-30. ISBN 978-80-7378-141-5
- [96] PERSSON, B.N.J., O. ALBOHR, U. TARTAGLINO, A.I. VOLOKITIN und E. TOSATTI. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion [online]. *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal*, 2005, **17**(1), S. 1-62. ISSN 0953-8984. Verfügbar unter: doi:10.1088/0953-8984/17/1/R01
- [97] FLEMMING, M. *Methoden der Simulation und Charakterisierung von nanostrukturierten ultrahydrophoben Oberflächen für optische Anwendungen*. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2007

- [98] CORIAND, L. *Roughness, wetting, and optical properties of functional surfaces*. Dissertation. Universität Jena: Fraunhofer-Verl., 2013. ISBN 978-3-8396-0649-0
- [99] MARMUR, A. Equilibrium contact angles: theory and measurement [online]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, **116**(1-2), S. 55-61. ISSN 09277757. Verfügbar unter: doi:10.1016/0927-7757(96)03585-6
- [100] WENZEL, R.N. RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER [online]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, **28**(8), S. 988-994. ISSN 0019-7866. Verfügbar unter: doi:10.1021/ie50320a024
- [101] CASSIE, A.B.D. und S. BAXTER. Wettability of porous surfaces [online]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, **40**, S. 546. ISSN 0014-7672. Verfügbar unter: doi:10.1039/TF9444000546
- [102] THOMAS, T.R. *Rough surfaces*. 2nd Revised edition. London: Imperial College Press, 1999. ISBN 1-86094-100-1
- [103] KIßLING, S. *Chemische und elektrochemische Methoden zur Oberflächenbearbeitung von galvanogeformten Nickel-Mikrostrukturen*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): KIT Scientific Publishing, 2010. Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie. 6. ISBN 978-3-86644-548-2
- [104] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 4760:1982-06, Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/1110827
- [105] KÜNNE, B., G. KÖHLER und H. RÖGNITZ. *Köhler/Rögnitz Maschinenteile 1. Mit Tabellen und Diagrammen sowie zahlreichen Beispielrechnungen*. 10., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007. ISBN 978-3-8351-0093-0
- [106] KURZ, U. und H. WITTEL. *Konstruktives Zeichnen Maschinenbau*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-658-17256-5
- [107] LABISCH, S. und G. WÄHLISCH. *Technisches Zeichnen*. 5., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-658-18312-7

- [108] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN ISO 3274:1998-04, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996); Deutsche Fassung EN ISO 3274:1997*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
Verfügbar unter: doi:10.31030/7433972
- [109] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN ISO 4287:2010-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/1699310
- [110] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN ISO 25178-1:2016-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 25178-1:2016*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
Verfügbar unter: doi:10.31030/2324720
- [111] VOLK, R. *Rauheitsmessung. Theorie und Praxis*. 3., überarbeitete Auflage 2018. Berlin: Beuth Verlag, 2018. Beuth Praxis.
ISBN 978-3-410-27549-7
- [112] PANDA, S., A. PANZADE, M. SARANGI und S.K. ROY CHOWDHURY. Spectral Approach on Multiscale Roughness Characterization of Nominally Rough Surfaces [online]. *Journal of Tribology*, 2017, **139**(3). ISSN 0742-4787.
Verfügbar unter: doi:10.1115/1.4034215
- [113] Semiconductor Equipment and Materials International: 2008, *SEMI MF1811-97 - Guide for Estimating the Power Spectral Density Function and Related Finish Parameters from Surface Profile Data*
- [114] MACK, C.A. Generating random rough edges, surfaces, and volumes [online]. *Applied optics*, 2013, **52**(7), S. 1472-1480.
ISSN 1559-128X. Verfügbar unter: doi:10.1364/AO.52.001472
- [115] SHIN, C. *Variation-Aware Advanced CMOS Devices and SRAM*. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2016. Springer Series in Advanced Microelectronics 56. ISBN 978-94-017-7595-3
- [116] MACK, C.A. Reducing roughness in extreme ultraviolet lithography [online]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and*

- MOEMS, 2018, 17(04), S. 1-8. ISSN 1932-5150.
Verfügbar unter: doi:10.1117/1.JMM.17.4.041006
- [117] PELLICCIONE, M. und T.-M. LU. *Evolution of Thin Film Morphology. Modeling and Simulations*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. Springer series in materials science. 108. ISBN 978-0-387-75108-5
- [118] JACOBS, T.D.B., T. JUNGE und L. PASTEWKA. Quantitative characterization of surface topography using spectral analysis [online]. *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal*, 2017, 5(1). ISSN 0953-8984.
Verfügbar unter: doi:10.1088/2051-672X/aa51f8
- [119] MACK, C.A. More systematic errors in the measurement of power spectral density [online]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(3). ISSN 1932-5150.
Verfügbar unter: doi:10.1117/1.JMM.14.3.033502
- [120] WHITEHOUSE, D.J. *Surfaces and their measurement*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 9780080518237
- [121] BORLINGHAUS, R.T. *Konfokale Mikroskopie in Weiß. Optische Schnitte in allen Farben*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-49358-8
- [122] N, N. Keyence Deutschland GmbH. *3D Laser Scanning Microscope - User's Manual*. 2013
- [123] N, N. Keyence Deutschland GmbH. *COLOR 3D Laser Confocal Microscope - The easiest way to perform ultra-precision advanced analysis*. 2007
- [124] DUPARRÉ, A., J. FERRE-BORRULL, S. GLIECH, G. NOTNI, J. STEINERT und J.M. BENNETT. Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components [online]. *Applied optics*, 2002, 41(1), S. 154-171. ISSN 1559-128X.
Verfügbar unter: doi:10.1364/AO.41.000154
- [125] SENTHILKUMAR, M., N.K. SAHOO, S. THAKUR und R.B. TOKAS. Characterization of microroughness parameters in gadolinium oxide thin films: A study based on extended power spectral density analyses [online]. *Applied Surface Science*, 2005, 252(5), S. 1608-1619. ISSN 01694332.
Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apsusc.2005.02.122

- [126] MILITKÝ, J. und V. BAJZÍK. Surface Roughness and Fractal Dimension [online]. *Journal of the Textile Institute*, 2001, **92**(3), S. 91-113. ISSN 0040-5000.
Verfügbar unter: doi:10.1080/00405000108659617
- [127] EFIMOV, A.A., P.V. ARSENOV, I.A. VOLKOV, M.N. URAZOV und V.V. IVANOV. Study of aerosol jet printing with dry nanoparticles synthesized by spark discharge [online]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **917**. ISSN 1742-6588.
Verfügbar unter: doi:10.1088/1742-6596/917/9/092020
- [128] VAUTH, S. *Glättungsmechanismen beim Ionenbeschuss rauher amorpher Oberflächen*. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, 2007
- [129] RÖDER, J. *Analyse der Glättung rauher Oberflächen durch Dünnschichtdeposition*. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, 2009
- [130] GEORGE, S.A., P.P. NAULLEAU, E.M. GULLIKSON, I. MOCHI, F. SALMASSI, K.A. GOLDBERG und E.H. ANDERSON. *Repliated mask surface roughness effects on EUV lithographic patterning and line edge roughness*. In: B.M. LA FONTAINE und P.P. NAULLEAU, Hg. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography II*, 25. März 2011. Verfügbar unter: doi:10.1117/12.881524
- [131] HERRING, C. Effect of Change of Scale on Sintering Phenomena [online]. *Journal of Applied Physics*, 1950, **21**(4), S. 301-303. ISSN 0148-6608. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.1699658
- [132] MULLINS, W.W. Flattening of a Nearly Plane Solid Surface due to Capillarity [online]. *Journal of Applied Physics*, 1959, **30**(1), S. 77-83. ISSN 0148-6608. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.1734979
- [133] ORCHARD, S.E. On surface levelling in viscous liquids and gels [online]. *Applied Scientific Research*, 1963, **11**(4-6), S. 451-464. ISSN 0003-6994. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03184629
- [134] WEICHERT, N. und M. WÜLKER. *Messtechnik und Messdatenerfassung*. München: Oldenbourg, 2010. Oldenbourg-Lehrbücher für Ingenieure. ISBN 3-486-25102-3
- [135] N, N. Keithley - A Tektronix Company. *Low Level Measurements Handbook - 7th Edition* [Zugriff am: 25. November 2019].

Verfügbar unter: https://download.tek.com/document/LowLevelHandbook_7Ed.pdf

- [136] N, N. Pedranti Elio. *Digital Nano-Ohmmeter Mod. 20024 (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: https://www.ew.tf.fau.de/files/2018/02/20024man_DE.pdf
- [137] CHUNG, T.S. *Thermotropic Liquid Crystal Polymers. Thin-Film Polymerization, Characterization, Blends and Applications*. Lancaster, Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Company, Inc., 2001. ISBN 1-56676-943-4
- [138] DHILLON, P.K., P.S. BROWN, C.D. BAIN, J.P.S. BADYAL und S. SARKAR. Topographical length scales of hierarchical superhydrophobic surfaces [online]. *Applied Surface Science*, 2014, **317**, S. 1068-1074. ISSN 01694332. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apsusc.2014.08.106
- [139] MACK, C.A. Reaction-diffusion power spectral density [online]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, **11**(4). ISSN 1932-5150. Verfügbar unter: doi:10.1117/1.JMM.11.4.043007
- [140] MIE, G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen [online]. *Annalen der Physik*, 1908, **330**(3), S. 377-445. ISSN 00033804. Verfügbar unter: doi:10.1002/andp.19083300302
- [141] BOHREN, C.F. und D.R. HUFFMAN. *Absorption and scattering of light by small particles*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1998. ISBN 978-0-471-29340-8
- [142] HOFMANN, M.K. *Opto-fluidische Mikrosysteme zur Partikelanalyse*. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2013
- [143] SHAOLIANG WANG. *Partikelgrößenbestimmung mittels eines Laser-Optischen Partikelzählers mit zwei Empfangswinkelbereichen*. Dissertation. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2009
- [144] LAMBERT, J.H. *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. Augustae Vindelicorum [Augsburg]: sumptibus viduae Eberhardi Klett, 1760. Verfügbar unter: doi:10.3931/e-rara-9488

- [145] BEER. Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten [online]. *Annalen der Physik*, 1852, **162**(5), S. 78-88. ISSN 00033804. Verfügbar unter: doi:10.1002/andp.18521620505
- [146] FENG, J.Q. Mist flow visualization for round jets in Aerosol Jet[®] printing [online]. *Aerosol Science and Technology*, 2019, **53**(1), S. 45-52. ISSN 0278-6826. Verfügbar unter: doi:10.1080/02786826.2018.1532566
- [147] N, N. TOPTICA Photonics AG. *iBeam smart (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: https://www.top-tica.com/fileadmin/Editors_English/11_brochures_datasheets/01_brochures/toptica_BR_iBeam_smart_family.pdf
- [148] N, N. Thorlabs Inc. *PM400 (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.thorlabs.com/drawings/f9fa8ae426f68836-5479E5E0-E116-5DEB-608442DCB8FF120C/PM400-Manual.pdf>
- [149] N, N. Thorlabs Inc. *S150C (Datenblatt)* [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.thorlabs.com/drawings/f9fa8ae426f68836-5479E5E0-E116-5DEB-608442DCB8FF120C/S150C-SpecSheet.pdf>
- [150] REITBERGER, T., G.A. HOFFMANN, T. WOLFER, L. OVERMEYER und J. FRANKE. *Printing polymer optical waveguides on conditioned transparent flexible foils by using the aerosol jet technology*. In: E.J.W. LIST-KRATOCHVIL, Hg. *PROCEEDINGS VOLUME 9945. Printed Memory and Circuits II*: SPIE, 28. August 2016 - 1. September 2016, 99450G. Verfügbar unter: doi:10.1117/12.2236220

9.1 Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] GRÄF, D., S. NEERMANN, L. STUBER, M. SCHEETZ und J. FRANKE. *Pushing the Boundaries of 3D-MID: Pulse-Width Modulated Light Technology for Enhancing Surface Properties and Enabling Printed Electronics on FFF-Printed Structures*. In: *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*: IEEE, 25. September 2018 - 26. September 2018, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-4933-6. Verfügbar unter: doi:10.1109/ICMID.2018.8526995
- [P2] REITELSHÖFER, S., M. LANDGRAF, D. GRÄF, L. BUGERT und J. FRANKE. *A new production process for soft actuators and sensors based on dielectric elastomers intended for safe human robot interaction*. In: *2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*: IEEE, 11. Dezember 2015 - 13. Dezember 2015, S. 51-56. ISBN 978-1-4673-7242-8. Verfügbar unter: doi:10.1109/SII.2015.7404953
- [P3] GRÄF, D., J. FRANKE, N. ISCHDONAT, M. HEDGES und J. HÖRBER. *Data and power distribution via printed electronics in aerospace applications*. In: *2017 21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition*: IEEE, 10. September 2017 - 13. September 2017, S. 1-6. ISBN 978-0-9568086-4-6. Verfügbar unter: doi:10.23919/EMPC.2017.8346860
- [P4] ISCHDONAT, N., D. GRÄF, W. GLEINE, C. DREYER, M. BAUER und J. FRANKE. *Cabin Interior Components as Substrate Material for Printed Electrical Circuits*. In: O. ESTROFF und F. THIELECKE, Hg. *International Workshop on Aircraft System Technologies AST2017*. Aachen: Shaker Verlag, 2017, S. 307-316. ISBN 978-3-8440-5086-8
- [P5] ISCHDONAT, N., C. DREYER, D. GRÄF, J. FRANKE, J. HÖRBER und M. HEDGES. *Influences of Manufacturing Sequences for the Application of Printed Electronics on Aircraft Interior Components*. In: *2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID)*: IEEE, 25. September 2018 - 26. September 2018, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-4933-6. Verfügbar unter: doi:10.1109/ICMID.2018.8526932
- [P6] DE102016221268.0. *Kabinenstrukturbauteil, Verfahren zum Herstellen eines Kabinenstrukturbauteils, Kabinenanordnung und*

Verkehrsmittel. Erfinder: N. ISCHDONAT, D. GRÄF, M. HEDGES, P. ROLLFINK, T. REITBERGER UND F. REIMER.

Anmeldung: 28. Oktober 2016

- [P7] DE102017004106.7. *Verbundwerkstoff in Sandwichstruktur mit auf mindestens einer Deckschicht angeordneten gedruckten Strukturen und/oder Schaltungen mit Anschlussmittel und Herstellungsverfahren hierzu*. Erfinder: D. GRÄF, M. HEDGES, J. HÖRBER UND M. ANKENBRAND. Anmeldung: 30. April 2017
- [P8] GRÄF, D., M. FRIEDLEIN, N. ISCHDONAT, C. GÄNßMANTEL und J. FRANKE. *Integration of Additive Manufactured Mechanical and Mechatronic Components in Aircraft Interior Systems*. In: *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET): IEEE*, 4. Februar 2020 - 9. Februar 2020. Verfügbar unter: doi:10.1109/ASET48392.2020.9118390
- [P9] LOMAKIN, K., T. PAVLENKO, M. ANKENBRAND, M. SIPPEL, J. RINGEL, M. SCHEETZ, T. KLEMM, D. GRÄF, K. HELMREICH, J. FRANKE und G. GOLD. Evaluation and Characterization of 3-D Printed Pyramid Horn Antennas Utilizing Different Deposition Techniques for Conductive Material [online]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, **8**(11), S. 1998-2006.
Verfügbar unter: doi:10.1109/tcpmt.2018.2871931
- [P10] FRIEDLEIN, M., D. GRÄF, F. RAISER, A. JAUMANN und J. FRANKE. *Occurrence and Influence of Fretting Corrosion on Receptacle Contact Resistance*. In: *2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts: IEEE*, 14. Oktober 2018 - 18. Oktober 2018, S. 295-301. ISBN 978-1-5386-6315-8.
Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2018.8611669

9.2 Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] STUBER, L. *Konzeptionierung mechatronischer Baugruppen für die Herstellung mittels additiver Fertigungstechnologien im Bereich der Automobilbranche*. Projektarbeit. Nürnberg, 2017
- [S2] GÄNßMANTEL, C. *Additive Fertigung von Steckverbindungen für die Automobilindustrie mittels digitaler Drucktechnologien*. Projektarbeit. Nürnberg, 2017
- [S3] STUBER, L. *Entwicklung und Validierung von Oberflächenbehandlungs- und Sinterstrategien für die additive Fertigung von Steckverbindungen in der Automobilindustrie*. Masterarbeit. Nürnberg, 2018
- [S4] GÄNßMANTEL, C. *Integration und Validierung additiv gefertigter mechatronischer Komponenten in Verbundwerkstoffe der Automobil- und Luftfahrtindustrie*. Masterarbeit. Nürnberg, 2018
- [S5] TSCHORN, K. *Entwicklung und Validierung von Prüfstrategien für additiv gefertigte mechatronische Komponenten in der Automobil- und Luftfahrtindustrie*. Projektarbeit. Nürnberg, 2018

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):

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
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
Projektierung 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 Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
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 Bruchverhal-
tens 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
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
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 Biegeumforme 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-Laserstrahlbear-
beitung 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 Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten 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 Simula-
tionsverfahrens 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 Bearbei-
tungsabläufe 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 durchflußbestimmen-
der 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 Steuerungssoftware 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 mit
kooperierenden 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
Spulenwickeln
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 mechani-
scher 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
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokallage 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 wissenschaftlicher 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
Lebensdauerprognose 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
hartstoffbeschichteter 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 Planungswerkzeug 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
Wissenschaftliche 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 Prozeßebe in Produktionssysteme
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 Integra-
tion 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 Montage-
systemen 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 Elektronikpro-
duktion
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 Anschlußkontak-
ten 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 Ein-
satz 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 Negendanck
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 - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, 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 produktbezoge-
ner 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 Magnesiumlegie-
rungen 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 Produkt-
strukturen 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 Diodenlaserstrah-
lung 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-Ent-
wicklung 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 Kleinst-
teile 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 trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchen-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten 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 - Prozessana-
lyse 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 Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung 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 Prechtl
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 bleifreie 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 Mikrojustiertechnik 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 Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer 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 Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit 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 prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen 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 wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
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 Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen 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 Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen 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 Rührreibschweißen 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 Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen 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 Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahliefschweißen
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
Laserdurchstrahlenschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen 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 Laserdurchstrahl-
schweißen 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 Innhochdruck-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 Laserstrahlsintern 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 Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozess-
simulation 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 Stahlblechwerk-
stoffen - 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
Brücksichtigung 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 Entwick-
lung 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 Laserstrahllöten
und -reparatlöten 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 Develop-
ment
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 Elektrofahr-
zeugen
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 Karosseriebau-
teile 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 Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage 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 Laserstrahliefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
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 aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
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 Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten 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 Presshärtprozess 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 beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung 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 Bornschlegl
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 Unternehmenscontrol-
lings 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 Hildering
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
Großorientaugliche 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 Werkerinformations-
systeme 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 unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten 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) / Experi-
mentelle 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 Magnesium-
legierung 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 Blechmassivumformpro-
zessen 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 art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
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 Zöller
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 Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge 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 Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche 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
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
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 Kon-
text 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 laserdirekt-
strukturierter 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 Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer 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 Herstel-
lung 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 schräg-
verzahnten Zahnradern
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 Heißcrimpprozesses
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 Aluminiumblech-
bauteile 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 Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen 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 Bau-
elemente
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 Geometriemodelle
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 Formspulenwicklungen für automobiler 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-Sup-
ported 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 Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
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 Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-
basierten kryogenen Minimalmengen-
schmierung
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 Werk-
zeugbau 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 Temperatur-
verhaltens 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 aerosol-
basierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Abstract

The primary objective of the presented thesis is an extensive investigation of aerosol-based printing technologies and can be divided into two main topics. Within the first research topic, the printing quality of applied structures on technical surfaces is evaluated. For this purpose, a methodology for analyzing the printing quality was developed which not only considers interdependencies between quality parameters but also includes the substrate quality as an influencing factor. The focus of the second research topic is on the development of a laser transmission measuring system for characterizing the aerosol beam in real-time. This novel approach enables an in situ process monitoring of the mass flow for aerosol-based printing technologies.

The utilized aerosol-jet printing system can be assigned to the functional printing technologies and was used for the application of electroconductive paths. With the aim of partially substituting the cable harness in aerospace applications the presented concept examines if cabin interior components can be functionalized by directly printing conductive tracks on lightweight sandwich structures.

Das übergeordnete Forschungsziel der vorliegenden Dissertationsschrift liegt in einer umfangreichen Untersuchung des Funktionalisierungsprozesses von aerosolbasierten Drucktechnologien und kann in zwei zentrale Themenkomplexe untergliedert werden. Der erste Forschungsschwerpunkt behandelt die Evaluierung der Druckqualität applizierter Strukturen auf technischen Oberflächen. Hierfür wurde eine Methodik erarbeitet, die die aktuellen Verfahren erweitert und dadurch nicht nur Wechselwirkungen zwischen Qualitätsparametern berücksichtigt, sondern vor allem auch die Substratqualität als Einflussfaktor in die Analysen mit aufnimmt. Im zweiten Forschungsschwerpunkt wurde ein Laser-Transmissions-Messsystem für eine Echtzeit-Charakterisierung des Aerosolstrahls entwickelt. Dies ermöglicht für aerosolbasierte Drucktechnologien eine in situ Prozessüberwachung des Massenstroms. Das verwendete Aerosol-Jet-Drucksystem ist den funktionalen Drucktechnologien zuzuordnen und wurde für die Applikation von Leiterbahnen eingesetzt. Mit der Zielstellung zur partiellen Substitution des Kabelbaums in der Luftfahrt soll dabei die Signal- und Leistungsvernetzung im Bereich der Flugzeugkabine durch eine Funktionalisierung der Verkleidungselemente realisiert werden. Hierzu wurde untersucht, inwieweit der Druck von Leiterbahnen auf Sandwichbauteilen in Leichtbauweise möglich ist.

