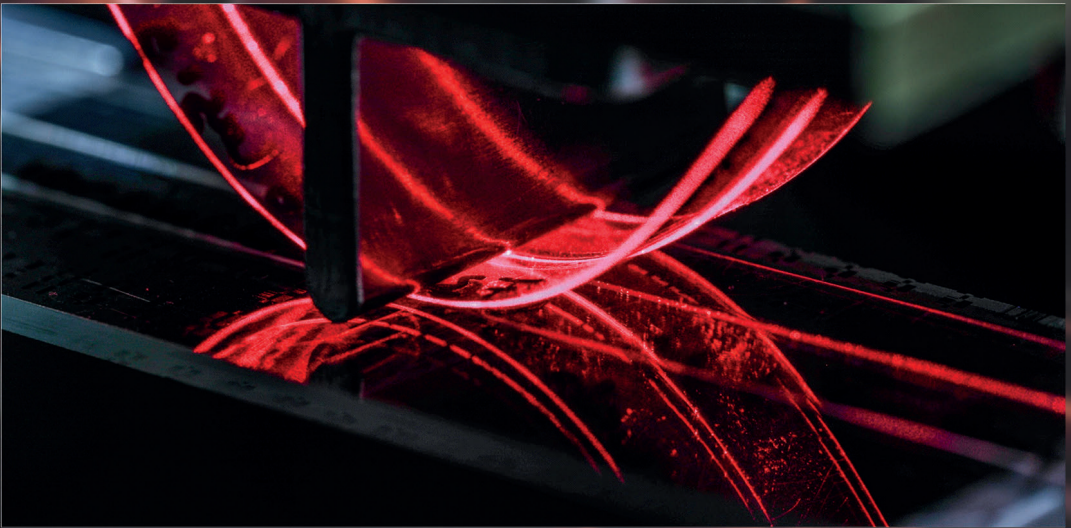




FAU Studien aus dem Maschinenbau 361

Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren

Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter
im Aerosol-Jet-Verfahren

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 361

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. 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

Reitberger, Thomas. 2021. *Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 361. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-401-1.

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: 978-3-96147-400-4 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-401-1 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-401-1

**Additive Fertigung
polymerer optischer Wellenleiter
im Aerosol-Jet-Verfahren**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Thomas Reitberger, M.Sc.

aus Rotthalmünster

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

Tag der mündlichen
Prüfung: 19.10.2020

Vorsitzender des
Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. A. P. Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult.
K.-J. Wolter, Technische Universität Dresden

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 (FAU).

Mein spezieller Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Franke für die Unterstützung meiner Forschungsarbeit, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die wissenschaftliche Freiheit, welche die erfolgreiche Arbeit im Umfeld des Lehrstuhls ermöglichte. Ich danke darüber hinaus Herrn Professor Dr.-Ing. Dietmar Drummer, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Für die Übernahme des Korreferates und die exzellente Zusammenarbeit gilt mein herzlicher Dank Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. Klaus-Jürgen Wolter, Seniorprofessor des Instituts für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik der Technischen Universität Dresden. Auch möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn apl. Professor Dr. Norbert Lindlein vom Institut für Optik der FAU für die tolle Zusammenarbeit und die Bereitschaft bedanken, als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums zur Verfügung zu stehen.

Diese Dissertation beruht auf den Ergebnissen der DFG-Forschergruppe OPTAVER, im speziellen des Teilprojekts 2. Es war stets ein besonderes Privileg mit solch außergewöhnlichen Wissenschaftlern zusammenarbeiten zu dürfen. Im Einzelnen möchte ich hier meine Kollegen Gerd-Albert Hoffmann, Lukas Lorenz, Jochen Zeitler und Carsten Backhaus herausheben.

Mein Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl. Besonders möchte ich mich dabei bei meinen Freunden Denis Kozic, Gerald Gion, Horst Schuster und Martina Beimler bedanken. Fachlich möchte ich mich noch bei meinem Mentor Johannes Hörber bedanken, welcher sich all meiner Problemstellungen annahm, auch wenn er selbst eigentlich nicht die Zeit dazu hatte. Für deren kreative Impulse möchte ich Michael Schneider, Julian Praß und Thomas Braun danken.

Ich danke meiner Mutter Gertrud, meiner Frau Eugenie und all meinen Freunden und Verwandten, welche mich schon sehr lange auf meinem Lebensweg begleiten und mich immer wieder aufs Neue unterstützt haben.

Vilshofen, den 04.06.2020

Thomas Reitberger, M.Sc.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Bildverzeichnis.....	xiii
Tabellenverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
2 Polymere optische Wellenleiter (POW) als Schlüsseltechnologie für die moderne Signal- und Datenübertragung.....	7
2.1 Grundlagen der optischen Datenübertragung.....	8
2.1.1 Die Lichtführung in einer optischen Faser und die damit verbundenen Begriffe numerische Apertur und Mode.....	10
2.1.2 Das Brechungsindexprofil und die Einteilung in Multi- mode/Singlemode-Fasern zur Differenzierung der Art des Lichtwellenleiters	12
2.1.3 Die Minderung der übertragbaren Lichtleistung und damit verbundene Effekte.....	15
2.2 Aufbau und Funktionsweise eines optischen Datenübertra- gungssystems.....	21
2.3 Der Lichtwellenleiter: Begriffsdefinition, Abgrenzung und Einordnung	23
2.4 Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter	26
2.5 Ableitung des Handlungsbedarfs und der daraus resultierenden Zielsetzung.....	33
3 Der OPTAVER-Prozess zur Herstellung flexibler Datenübertragungsnetzwerke.....	35
3.1 Das Flexodruck-Verfahren zur Herstellung konditionierter Foliensubstrate und die daraus resultierende Manipulation der Oberflächenphysik.....	36
3.2 Das Aerosol-Jet-Drucksystem zur Herstellung des Wellenleiters.....	41
3.2.1 CAD-CAM-Kette und Maschinensteuerung des Aerosol-Jet-Druckers.....	41
3.2.2 Der Aerosol-Jet-Druckprozess	44

3.2.3	Materialauswahl auf Basis der verwendeten Herstellungsverfahren im OPTAVER-Prozess	55
3.3	5-M-Analyse zur Ableitung der relevanten Einflussgrößen auf die Qualität der gedruckten POW	59
4	Analytische Betrachtung der Versuchsergebnisse und Qualifizierung des Herstellungsverfahrens	63
4.1	Bestimmung des Materialdurchflusses.....	63
4.2	Ursachen und Lösungen für Bulging.....	75
4.3	Mehrlagiger Wellenleiterdruck und materialabhängige Risiken für das Substrat	77
4.4	Qualifizierung einer geeigneten Druckstrategie.....	79
4.5	Geometrische Charakterisierung der gedruckten Strukturen.....	81
4.6	Zusammenfassung möglicher Fehlerbilder und deren Bekämpfung.....	83
4.7	Lebensdauercharakterisierung anhand klimatischer Dauerlaufuntersuchungen	85
4.8	Mechanische Charakterisierung der gedruckten Strukturen.....	87
4.9	Funktional optische Charakterisierung der gedruckten Strukturen	90
5	Beiträge zur Modellierung des Gesamtprozesses für eine Prädiktion der geometrischen und optischen Güte	99
5.1	Berechnungsmodell Kreissegment	100
5.2	Simulative Abbildung des AJ-Prozesses durch Betrachtung der Durchflussverhältnisse im Inneren der Druckdüse.	105
5.2.1	Strömungsmechanische Grundlagen.....	106
5.2.2	Schließungsproblematik der Turbulenz- modellierung.....	107
5.2.3	Modellierung des wandnahen Bereichs.....	109
5.2.4	CAD-Modellierung der Düseneinheit	112
5.2.5	Simulationsdurchführung	114
5.2.6	Auswertung der Simulationsergebnisse	116
6	Zusammenfassung	121
6.1	Aktuelle Anwendungen	122

6.2	Zukünftige Arbeiten und Anwendungen	123
7	Summary	125
7.1	Current applications.....	126
7.2	Further work and future applications	127
	Literaturverzeichnis.....	129

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
4K	4096 x 2048 Bildpunkte
AB	Abgasdurchfluss
AJ	Aerosol-Jet
AM	Additive Manufacturing
AMT	Advanced Manufacturing Technologies
AS	Aerosol-Durchfluss
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CCD	Charge-Coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computerized Numerical Control
DARPA	Defense Advanced Research Program Agency
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DUT	Device Under Test
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMW	Elektromagnetische Welle
EN	Europäische Norm
FAPS	Fertigungsautomatisierung und Produktions- systematik
FAU	Friedrich-Alexander-Universität
FL	Feuchte Luft
FSK	Faktorstufenkombination
FTTB	Fiber-to-the-Building
FTTD	Fiber-to-the-Desk
FTTH	Fiber-to-the-Home
GF	Gesamtdurchfluss
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HT	Hochtemperatur
IEEE	Institution of Electrical and Electronics Engi- neers

IR	Infrarot
ITA	Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
J+S	Jänecke + Schneemann
KFZ	Kraftfahrzeug
LAN	Local Area Network
LD	Laser Diode
LED	Light-Emitting Diode
LWL	Lichtwellenleiter
MID	Molded (Mechatronic) Interconnected (Integrated) Devices
MOST	Media Oriented Systems Transport
NA	Numerische Apertur
NC	Numeric Control
NMP	N-Methyl-2-Pyrrolidon
OLED	Organic Light Emitting Diode
OPTAVER	Optische Aufbau- und Verbindungstechnik für baugruppenintegrierte Bussysteme
Opto-MID	Optomechatronic Integrated Devices
OPV	Organic Photovoltaic
PC	Polycarbonat
PEDOT:PSS	Poly-3,4-ethylenedioxythiophen: Polystyrol-sulfonat
PI	Polyimid
PIN	Positive Intrinsic Negative
PLWL	Planarer Lichtwellenleiter
PMMA	Polymethylmethacrylat
POF	Polymer Optical Fiber
POW	Polymerer Optischer Wellenleiter
PV	Photovoltaic
PVC	Polyvinylchlorid
REM	Rasterelektronenmikroskop
RIE	Reactive Ion Etching
RG	Radio Guide
SST	Shear Stress Transport
TAT	Transatlantisches Telefonkabel
UG	Umhüllungsgasdurchfluss
UHD	Ultra-High Definition

US	United States
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolett
VI	Virtual-Impactor
VW	Volkswagen
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WPZ	Work Point Zero
Z	Temperaturzyklus
ZG	Zerstäubergasdurchfluss

Bildverzeichnis

Bild 1:	Gegenüberstellung der Anforderungen an die Signalübertragung und den vorhandenen Problemstellungen elektronischer Netzwerke für den industriellen Einsatz.	3
Bild 2:	Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strahlführungen des Lichts. [21].....	8
Bild 3:	Schematische Darstellung der Transmission und Totalreflexion. [4]	9
Bild 4:	Schematische Darstellung der Lichtführung in einer optischen Faser. [4]	11
Bild 5:	Schematische Darstellung unterschiedlicher Faserarten. Unterscheidung nach Indexprofil und Anzahl der geführten Moden mit charakteristischen Impulsverläufen. [4, 25]	13
Bild 6:	Überblick über mögliche Dämpfungsverluste in und an optischen Fasern. [4]	16
Bild 7:	Schematische Darstellung der Goos-Hänchen-Verschiebung.	17
Bild 8:	Übersicht über in der Faseroptik auftretende Dispersionsarten. [30].....	18
Bild 9:	Graphische Darstellung eines Augendiagramms zur Visualisierung der Übertragungsqualität. [33]	20
Bild 10:	Prinzipieller Aufbau eines optischen Übertragungssystems. [24]	21
Bild 11:	Rasterelektronenmikroskopische (REM-) Aufnahme eines additiv hergestellten POWs. [P1].....	25
Bild 12:	Schematische Darstellung diverser Prozessketten zur Herstellung planarer Wellenleiter und POW. [4, 42, 53, 54, 55]	32
Bild 13:	Schematische Darstellung des Flexodruck-Verfahrens zur Konditionierung der Foliensubstrate. [P4].....	36

Bild 14:	Vergleich gedruckter POW auf PMMA-Foliensubstrat; ohne Konditionierung (links); mit Konditionierung (rechts). [P5].....	37
Bild 15:	Schematische Darstellung der Kräfteverhältnisse eines flüssigen Polymers auf einer ebenen Substratoberfläche. [59]	39
Bild 16:	Überblick über die Remote Control Software für die Steuerung der AJ-Anlage.	43
Bild 17:	Excel Tool zur Druckkoordinatenberechnung. [S1]	44
Bild 18:	Schematische (oben) und reale (unten) Darstellung des Aerosol-Jet-Druckverfahrens mit pneumatischer Zerstäubung. [68, P4]	46
Bild 19:	Schematische Darstellung der Gasflüsse im Aerosol-Jet-Druck mit den jeweils verwendeten Abkürzungen.....	48
Bild 20:	Laser-scanning-mikroskopische Aufnahme eines M-förmigen Leiterbahnprofils (Tinte: PolyTec VP 4641-1; Substrat: Polycarbonat). [P7]	50
Bild 21:	Leitfaden zur Druckparameteridentifizierung neuer Tinten. [S2]	51
Bild 22:	Graphische Darstellung des allgemeinen Prozessfensters einer im AJ-Verfahren prozessierbaren Tinte. [S2]	52
Bild 23:	Zerstäubungsrate in Abhängigkeit vom Zerstäuberdurchfluss. [S2].....	53
Bild 24:	Schematische Darstellung der Zusammensetzung von im Aerosol-Jet-Verfahren verarbeitbarer Drucktinten. [18]	53
Bild 25:	REM-Aufnahme eines im OPTAVER-Prozess hergestellten POW. [P8].....	55
Bild 26:	Wechselwirkungsdiagramm für gedruckte polymere Wellenleiter.....	56
Bild 27:	Graphische Darstellung der dynamischen Viskosität bei steigenden Temperaturen für J+S 390119.	58

Bild 28:	5-M-Analyse der prozessrelevanten Einflussgrößen auf die Qualität gedruckter POW.	59
Bild 29:	Tropfenbildung an der Düsenspitze.	62
Bild 30:	Graphische Darstellung des gemessenen Materialdurchflusses bei konstanter Versuchsdurchführung an 35 aufeinanderfolgenden Arbeitstagen. [S12].....	64
Bild 31:	Fehlerbaumanalyse ausgehend von Unregelmäßigkeiten im Materialdurchfluss.....	65
Bild 32:	22-Versuchsplan für unterschiedliche Gasströme mit Zentralpunkt.	67
Bild 33:	Ergebnisse der Materialdurchflussmessungen bei variierenden Gaseinstellungen.	68
Bild 34:	Gasdrücke für Zerstäuber-, Ab- und Umhüllungsgas geordnet nach Faktorstufenkombinationen.....	69
Bild 35:	Korrelierte graphische Darstellung des Materialdurchflusses und der maschinenseitigen Gasdrücke.....	70
Bild 36:	Abhängigkeit des Materialdurchflusses von der Lacktemperatur im Inneren des Tintenbehälters.....	71
Bild 37:	Box-Plot-Darstellung des Ausmaßes der Materialdurchflussschwankungen bei steigender Tintentemperatur.	71
Bild 38:	Materialdurchflussmessungen für steigenden Zerstäubergasdurchfluss anhand von J+S 390119 (oben) und Loctite Ablelux OGR-150 THTG (unten). [P10].....	72
Bild 39:	Bulging bei der Herstellung polymerer Lichtwellenleiter in Abhängigkeit des Abstands der Konditionierungslinien.....	75
Bild 40:	Bulging aufgrund von Unstetigkeiten im Konditionierungslinienverlauf. [P9]	76
Bild 41:	Laser-scanning-mikroskopische Darstellung der Draufsicht auf einen achtschichtigen Wellenleiterkern mit Aushärteschritt nach jeder Lage.....	77

Bild 42:	Konfokalmikroskopisch erzeugtes Schliffbilder eines achtschichtigen Wellenleiterkerns mit Aushärteschritt nach jeder Lage.	78
Bild 43:	Falschfarbendarstellung des Querschnitts eines zweilagigen EpoCore Lichtwellenleiters im Schliff mit Rissbildung im Substrat. [S13]	79
Bild 44:	Kameraaufnahmen gedruckter POW in der Draufsicht unter Verwendung unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeiten und Lagenanzahl.	80
Bild 45:	Schrittweise mikroskopische Untersuchung eines Lichtwellenleiters.	82
Bild 46:	Fehlerbilder bei der Herstellung POW im OPATVER-Verfahren und mögliche Lösungsstrategien.	84
Bild 47:	Materialschrumpf bei DIN EN 61300-2-22: Temperaturwechsel, zwölf Zyklen im Temperaturbereich von – 40 °C bis 85 °C.	86
Bild 48:	Darstellung der beiden beobachtbaren Bruchcodes für POW beim Einsatz der Scherkraftmessung zur Charakterisierung der Haftfestigkeit.	89
Bild 49:	Graphische Darstellung der Transmission von J+S 390119 für Wellenlängen bis 2000 nm.	91
Bild 50:	Analyse der Intensitätsverteilung im Lichtwellenleiter. Dreidimensionale laser-scanning-mikroskopische Darstellung eines Teilstücks des vermessenen Lichtwellenleiters (oben); schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (Mitte); Intensitäts-verteilung an der Lichtwellenleiterauskoppelseite (unten).	92
Bild 51:	Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Dämpfungscharakterisierung der gedruckten Lichtwellenleiter. [P8]	93
Bild 52:	Graphische Darstellung der Dämpfungsveränderung durch die Umweltsimulation. [S14]	95

Bild 53:	Darstellung der resultierenden Augendiagramme und BER für die Wellenlängen 850 nm (oben) bzw. 1550 nm (unten), bei den Datenübertragungsraten 5 Gbit/s, 7,5 Gbit/s und 10 Gbit/s sowie verschiedenen Leistungspegeln.	97
Bild 54:	Darstellung des Prozessmodells zur Herstellung von POW als in sich geschlossener Regelkreis.	100
Bild 55:	Ableitung des mathematischen Modells von der realen Ausprägung der POW. Lichtmikroskopische Darstellung der Wellenleiterform (oben); geometrische Beschreibung eines Kreissegments (unten). [S12]	101
Bild 56:	Geometrische Grundlagen zur Berechnung der Lichtwellenleiterhöhe in Abhängigkeit des Kontaktwinkels Θ und des Abstands zwischen den Konditionierungslinien s.	102
Bild 57:	Graphische Darstellung der gemessenen Dichteveränderung von J+S bei steigender Temperatur.	104
Bild 58:	Graphische Darstellung des universellen Wandgesetzes. [96].....	110
Bild 59:	CAD-Modelle der AJ-Düseneinheit. Einzelteile in Explosionsdarstellung (oben); Schnitt durch den Gesamtaufbau (unten). [S15]	113
Bild 60:	Graphische Darstellung der durchgeführten Netzstudie zur Bestimmung der mittleren Düsendeschwindigkeit. [S15]	115
Bild 61:	Darstellung der Ergebnisse der Strömungssimulation in ANSYS CFX.	117
Bild 62:	Detailliertere Darstellung der Geschwindigkeitsverläufe beim Düsenaustritt.	117
Bild 63:	Darstellung der Qualität der Simulation durch die y^+ -Verteilung.	118
Bild 64:	Asymmetrischer optischer Biegekoppler. Schematische Darstellung der Lichtübertragung von einem gebogenen in einen geraden Wellenleiter (oben); Abbildung des realen Aufbaus (unten). [P12, P13].....	122

Bild 65:	Asymmetric-optical-bus-coupler. Schematic representation of light transmission from a bent to a straight waveguide (top); illustration of the real structure (bottom). [P12, P13].....	126
----------	--	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Dichte und den resultierenden Gewichtungsfaktor ausgewählter metallischer und nichtmetallischer Leiter. [11, 12].....	5
Tabelle 2:	Einfluss steigender numerischer Apertur auf die Fasereigenschaften. [4].....	12
Tabelle 3:	Berechnung der wellenlängenabhängigen numerischen Apertur, Strukturkonstante und Anzahl geführter Moden für die Materialkombination EpoCore und EpoClad.	15
Tabelle 4:	Nutzbare Frequenzbereiche von Lichtwellenleitern. [35].....	22
Tabelle 5:	Abgrenzung und Einordnung der Begriffe POW, POF und PLWL.	25
Tabelle 6:	Vergleich der aktuell im Einsatz befindlichen Verfahren zur Herstellung von polymeren Lichtwellenleitern.	31
Tabelle 7:	Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf Festkörpern. [59, 60].....	40
Tabelle 8:	Übersicht über die Rahmenbedingungen zur Auswahl der jeweiligen Zerstäubungsart. [64, 65].....	54
Tabelle 9:	Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Materialien sowie deren Einsatzart und zugehörige studentische Quellen.	57
Tabelle 10:	Übersicht über die ermittelten Kräfte und Wege der durchgeführten Scherkraftmessung.....	89
Tabelle 11:	Ermittelte Dämpfungen abhängig von deren Länge und Ausgangsleistung.	94

1 Einleitung

Die Vernetzung der weltweit im Einsatz befindlichen elektronischen Geräte ist einer der aktuellen Megatrends im industriellen und privaten Umfeld. Experten des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) prognostizieren ein Wachstum der im *Internet der Dinge* angeschlossenen Objekte auf über 75 Milliarden im Jahr 2025. Dies entspricht der fünffachen Menge der 2015 angeschlossenen Objekte über den kurzen Zeitraum von zehn Jahren. Neben der reinen Menge an Daten verlagert sich zudem deren Anwendungsgebiet von unkritischen hin zu lebenskritischen Daten, wie die Sensordaten autonom fahrender Fahrzeuge. Diese müssen schnell und zuverlässig über kurze Strecken im Fahrzeug übertragen werden. Prognosen der Firma Intel gehen bei autonomen Fahrzeugen von einem täglich aufkommenden Datenvolumen von bis zu vier Terabyte aus. [1, 2, 3]

Dabei steigen die zu übertragenden Datenmengen mit jedem weiteren in das Netzwerk integrierten Objekt. Sofern dies möglich ist, werden kabellose Verbindungen realisiert. Dies ist jedoch nicht in jeglicher Umgebung bzw. über zu große Distanzen hinweg verlustfrei und stabil umsetzbar. Der Hauptgrund hierfür ist die Störanfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen, wie etwa andere Wireless-Geräte, Mikrowellen oder benachbarte Drahtlosnetzwerke und die damit verbundene Reduzierung der Übertragungsgeschwindigkeit, Erhöhung der Latenz und im schlimmsten Fall der Verbindungsabbruch. Aktuell werden zur Datenübertragung in mechatronischen Systemen zumeist kabelgebundene metallische Leiter, größtenteils aus Kupfer, eingesetzt. Da diese allerdings längst an den Grenzen ihrer Übertragungskapazität angelangt sind, bedarf es alternativer Lösungskonzepte. In diesem Zusammenhang dienen Lichtwellenleiter (LWL) der Übertragung von Signalen durch Leitungen hochtransparenter Materialien, welche üblicherweise aus Glas oder Kunststoff bestehen. Glasfaserkabel werden dabei bereits seit den frühen 1980er Jahren für Langstrecken-Datenverbindungen (> 100 m) eingesetzt. Die berühmteste Glasfaserverbindung ist dabei das 1988 in Betrieb genommene transatlantische Telefonkabel (TAT-8), welches sich von Nordamerika nach Frankreich erstreckte und bis 2002 in Betrieb war. Kunststoff-Lichtwellenleiter (Polymer Optical Fiber, POF) wurden aufgrund unterlegener Eigenschaften lediglich für Beleuchtungen und kurze, langsame Datenverbindungen verwendet. Zudem waren in der Vergangenheit die für Kupferkabel typischen übertragbaren Datenraten von bis zu 10 Mbit/s vollkommen ausreichend. [4, 5]

Ab den 90er Jahren konnte durch Forschung und Entwicklung die Leistung (Standard-POF auf 100 m: 1000 Mbit/s; Bandbreite ca. 40 MHz) und Qualität kontinuierlich derart gesteigert werden, dass für POF durch Vorteile bei den Kosten und der Handhabung diverse neue Anwendungsgebiete gefunden werden konnten. Neben der Kommunikation werden diese auch in den Bereichen Medizin, optische Prüfung und Sensortechnik verwendet. [4, 5]

Das mit Abstand größte Wachstumspotential für POF bietet die Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung über kurze Strecken. Hier sind die polymeren optischen Fasern, gegenüber metallischen Leitern, durch ihr verringertes Gewicht, dem kleineren Querschnitt sowie der Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Strahlung überlegen. Gegenüber der Glasfasertechnologie bestehen Vorteile bezüglich der Flexibilität und den Kosten. Es gibt einen steigenden Bedarf höherer Bandbreiten in den Branchen Automotive, Unterhaltungselektronik und lokale Netzwerke (Local Area Network, LAN). Mit den hierbei benötigten Übertragungsraten von aktuell bis zu 400 Megabit pro Sekunde über bis zu 50 m erfüllen POF die Anforderungen der meisten Datenübertragungsanwendungen. In der Fahrzeugtechnik werden POF in mehreren Generationen des Infotainment-Bussystems (Media Oriented Systems Transport, MOST) als optisches Übertragungsmedium verwendet. Im Bereich automobiles Infotainment ist für Navigation und Audio ein hoher Datendurchsatz bei gleichzeitiger Störunempfindlichkeit erforderlich, weshalb auch hier POF zum Einsatz kommen. [4, 6]

Die Verbreitung von optischen Fasern (Glas oder Kunststoff) wird weiter zunehmen. Ein anderes Beispiel hierfür ist die Telekommunikationsindustrie. Hier kommen die eingesetzten optischen Übertragungskanäle immer näher an das Teilnehmerendgerät heran, welches gleichbedeutend mit einer Verkürzung der metallischen Übertragungsstrecke ist. Das Backbone-Netzwerk zwischen den Vermittlungsstellen besteht bereits komplett aus Glasfasern, je nach Verbindung treten jedoch Unterschiede auf. Beim klassischen Festnetz reicht die Glasfaser vom Backbone-Netzwerk bis zur Vermittlungsstelle, danach werden die Daten mit Kupferkabeln übertragen. In diesem Zuge setzt sich fiber-to-the-home (Glasfaser bis in die Wohnung, FTTH), bei dem über den gesamten Übertragungsweg vom Backbone-Netzwerk bis zum Teilnehmeranschluss in der Wohnung optische Fasern eingesetzt werden, immer weiter durch. Bei Häusern ist dies gleichbedeutend mit fiber-to-the-building (Glasfaser bis ins Gebäude, FTTB). Die Deutsche Telekom hat den FTTH-Ausbau im Landkreis Nordsachsen bereits begonnen. Das gab das Unternehmen am 28. März 2019 bekannt. In einigen Orten soll im zweiten Halbjahr 2019 die Datenrate von bis zu 1 Gigabit pro

Sekunde (Gbit/s) buchbar sein. Wird vom Teilnehmeranschluss zum Teilnehmerendgerät auch eine optische Faser verwendet, so liegt fiber-to-the-desk (Glasfaser bis zum Schreibtisch, FTTD) vor, die Datenübertragung erfolgt in diesem Fall ausschließlich auf optischem Weg über die gesamte Übertragungsstrecke. [7, 8]

Die stetig steigenden Anforderungen an die Daten- und Signalübertragung verlangen nach neuartigen Lösungskonzepten und zeigen gleichzeitig in vielen Bereichen, in denen noch vorwiegend elektronische Netzwerke zum Einsatz kommen, diverse Problemstellungen auf. Bild 1 vermittelt einen ersten Eindruck der bestehenden Situation und stellt Anforderungen und Probleme gegenüber. [9]



Bild 1: Gegenüberstellung der Anforderungen an die Signalübertragung und den vorhandenen Problemstellungen elektronischer Netzwerke für den industriellen Einsatz.

Mit der zunehmenden Anzahl an Sensoren, welche in diversen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, steigt gleichzeitig die Komplexität des jeweiligen Netzwerks rapide an. Ein sehr anschauliches Beispiel hierfür, welches in [10] für den Volkswagen (VW) Phaeton beschrieben ist, ist der Kabelbaum im Automobil. Dieser besitzt im vorliegenden Beispiel eine Länge von ca. 4 km und über 100 individuelle Steckverbindungen an den Kabelenden. Dessen Gewicht beträgt je nach Variante 30 kg bis 40 kg und resultiert somit in einem Treibstoffmehrverbrauch von etwa 0,2 Liter pro 100 km. Die Kosten für das verwendete Kupfer betragen dabei aktuell 300 € bis 400 €.

Der Kabelbaum wird im Zuge der wachsenden Autonomie des Fahrzeugs erweitert werden müssen, falls keine wesentlichen technologischen Substitutionsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden. Zudem steigt die Anzahl an verwendeten Bauteilen sowie der Aufwand für deren Isolation. Hier bedarf es Lösungen, welche eine Miniaturisierung bei gesteigerter Funktionsdichte erlauben.

Die Herstellung des Kabelbaums an sich ist jedoch weiterhin nur teilautomatisiert und wird in manchen Ländern in Handarbeit am Nagelbrett durchgeführt. Hauptproblem für eine automatisierte Lösung stellt die Handhabung biegeschlaffer Teile dar, welche aufgrund ihrer formelastischen Eigenschaften nicht definiert gegriffen und automatisiert abgelegt werden können. Zudem spielt in vielen Anwendungen auch der begrenzte Bauraum eine entscheidende Rolle. [10]

Direkt einhergehend mit dem Faktor Länge ist auch das Gewicht der Kabel. Tabelle 1 gibt einen kurzen Überblick über konventionell eingesetzte Werkstoffe sowie EpoCore als Beispiel für ein polymeres Material. Hieraus geht hervor, dass durch die Substitution, ohne Berücksichtigung sonstiger Rahmenbedingungen, von Kupfer durch Polymermaterial pro verbautem Kubikzentimeter 7,72 g an Gewicht eingespart werden können. Im Hinblick auf das oben angeführte Beispiel Kabelbaum im VW Phaeton würde eine Substitution des Kupfers durch EpoCore das Gewicht des gesamten Kabelbaums auf 4,1 kg bis 5,4 kg reduzieren und somit auch den Mehrverbrauch an Kraftstoff von etwa 0,2 l pro 100 km auf etwa 0,03 l pro 100 km senken. [9, 10, 11, 12, 13]

Beim Einsatz metallischer Werkstoffe ist zudem darauf zu achten, dass das Gesamtsystem auf deren elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bzw. Abhörsicherheit hin optimiert ausgelegt ist. Beide Problemstellungen können durch den Einsatz optischer Signale erfolgreich vermieden werden.

Tabelle 1: Übersicht über die Dichte und den resultierenden Gewichtungsfaktor ausgewählter metallischer und nichtmetallischer Leiter. [11, 12]

Werkstoff	EpoCore	Quarzglas	Aluminium	Kupfer
Dichte [g/cm ³]	1,20	2,20	2,70	8,92
Resultierender Gewichtungsfaktor [%]	100	183	225	743

Aus den vorhandenen Anforderungen ergibt sich der Bedarf an einer Funktionsintegration von Mechanik, Elektronik und Optik. Wenn diese Form der Zusammenführung von Funktionseigenschaften über die planare Anwendung auf einer Leiterplatte hinaus in den dreidimensionalen Raum erfolgen soll, wird von 3D-Mechatronic Integrated Devices (3D-MIDs) gesprochen. Im klassischen Sinne handelt es sich dabei um spritzgegossene Schaltungsträger, auf welchen die elektronischen Funktionsstrukturen durch einen nachgeschalteten Funktionalisierungsschritt mit der jeweiligen metallischen leitfähigen Struktur versehen werden. Die Integration mechanischer und elektronischer Funktionen in 3D-MIDs wurde in den letzten 25 Jahren von diversen Wissenschaftlern untersucht und es konnten vielversprechende Ergebnisse erzielt werden [14, 15, 16, 17]. Die Integration optischer Funktionen stand hierbei bislang nicht im Fokus der Wissenschaft. Eines der größten Hemmnisse war die fehlende Prozesstechnik, um auch optische Leiterbahnen auf dreidimensionalen Baukörpern reproduzierbar integrieren zu können. [18, 19]

Die Erforschung eines Verfahrens, mit dessen Hilfe die dreidimensionale Integration optischer Funktionen ermöglicht werden kann, stellt somit den Kern der Motivation für die vorliegende Arbeit dar. In diesem Zusammenhang wird der Begriff **3D-Opto-MID** (3D-Optomechatronic Integrated Devices) geprägt, welcher gezielt die Erweiterung um optische Funktionen bezeichnet.

Unter diesem Sammelbegriff werden sämtliche auf optischen Phänomenen basierende Systemerweiterungen erfasst. Hierzu zählen der Auftrag und die Integration von Lichtwellenleitern, optoelektronischen Bauteilen (Quellen und Detektoren), Verstärkern, Modulatoren, optischen Sensorelementen, (organischen) Leuchtdioden ((organic) light emitting diodes, (O)LED) hin zu energieerzeugenden Strukturelementen, wie (organischer) Photovoltaik ((organic) photovoltaic, (O)PV).

Um die vollständige optische Systemerweiterung dreidimensionaler Schaltungsträger zu realisieren, bedarf es mehrerer zu erreichender Meilensteine:

- 1) Auftrag und Integration von Lichtwellenleitern zur optischen Signal- und Datenübertragung sowie zum Aufbau von Netzwerkstrukturen
- 2) Entwicklung von Simulationsmodellen und Modellierungssoftware zur virtuellen Prädiktion der Systemanforderungen und -eigenschaften
- 3) Kontaktierung und Kopplung der Lichtwellenleiter zur sicheren und reproduzierbaren Ansteuerung, Versorgung, Aufteilung und Ausleitung der Lichtsignale.
- 4) Entwicklung einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik für optische Bauelemente auf 3D-Oberflächen
- 5) Integration in ein vorhandenes elektronisches Netzwerk (Quellen/Detektoren)
- 6) Aufbau von optischen Sensorelementen
- 7) Integration von generierenden und konsumierenden Elementen (OPV, OLED)
- 8) Konzeptionierung und Ausgestaltung autonomer 3D-Opto-MIDs

Für viele der angeführten Punkte gibt es bereits Lösungen oder zumindest Ansätze. Im aktuellen Forschungsumfeld existiert jedoch keine technologische Lösung zum dreidimensionalen Direktdruck polymerer Lichtwellenleiter auf unterschiedlichen Substratmaterialien, wodurch diesem Meilenstein enorme Bedeutung zukommt.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift wird aufgrund des vorhandenen Handlungsbedarfs die Herstellung von Lichtwellenleitern, welche auch auf dreidimensionalen Oberflächen aufgebracht, kontaktiert und gekoppelt werden können, beschrieben. Im Fokus steht hierbei die additive Fertigung (additive manufacturing, AM), im Speziellen das Aerosol-Jet-Verfahren zur Herstellung polymerer Lichtwellenleiter. Die Gründe für die Wahl des Verfahrens und den Einsatz von Polymeren werden in den nachfolgenden Kapiteln weiter ausgeführt.

2 Polymere optische Wellenleiter (POW) als Schlüsseltechnologie für die moderne Signal- und Datenübertragung

"[...] die Natur des Lichts wird wohl nie ein Sterblicher aussprechen; und sollte er es können, so würde er von niemanden, so wenig wie das Licht, verstanden werden."

J. W. v. Goethe: Brief an C. Fr. v. Reinhard, 7. Oktober 1810

In der Physik wird das Licht zumeist sowohl als Welle als auch als Teilchen beschrieben und jeder moderne Physiker würde dem einst von Goethe getätigten Ausspruch zumindest in weiten Teilen widersprechen. Der Welle-Teilchen-Dualismus ist heute das anerkannte Modell zur Beschreibung von Licht und dessen Verhalten. Dabei wird das Teilchen (Photon) durch seine Energie W und die Welle durch ihre Frequenz f oder ihre Wellenlänge im Vakuum λ_v charakterisiert. Für die Berechnung der Energie ist zudem das Plancksche Wirkungsquantum h ($= 6,626 \cdot 10^{-34}$ Joulesekunden [Js]) in (1) notwendig. Um die Frequenzberechnung gemäß (2) durchführen zu können, wird überdies die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_v benötigt.

$$W = h \cdot f \quad (1)$$

$$f = \frac{c_v}{\lambda_v} \quad (2)$$

Das Wellenmodell beschreibt eine Vielzahl von Erscheinungen, wie beispielsweise Interferenz und Beugung. Durch das Teilchenmodell lassen sich Phänomene, wie der lichtelektrische Effekt, beschreiben. Die Photonen besitzen anders als Elektronen keine Ruhemasse und sind auch nicht weiter teilbar. Der Teilchencharakter des Lichts dominiert bei steigender Frequenz und sinkender Wellenlänge. [4, 20]

Die geometrische Optik hingegen beschreibt die Ausbreitung von Licht in homogenen Materialien durch Lichtstrahlen. Zur Beschreibung der physikalischen Grundlagen der Lichtführung wird zumeist diese Form der Darstellung verwendet. Die Ausbreitung verläuft hierbei geradlinig, wobei verschiedene Strahlführungen unterschieden werden (siehe Bild 2). [21]

Um die für diese Arbeit relevanten Aspekte der Optik nicht unberücksichtigt zu lassen und die Grundlage für die in Kapitel 4.9 durchgeführte optische Charakterisierung der gedruckten Lichtwellenleiter zu schaffen, wird

im folgenden Abschnitt auf diese näher eingegangen. Die Ausführungen beziehen sich zwar in den meisten Fällen auf kreisförmige Leiterquerschnitte (Fasern), sind jedoch auch auf kreissegmentförmige Geometrien übertragbar. Im Anschluss werden die unterschiedlichen Wege der Lichtführung in Form eines Wellenleiters vorgestellt und der Begriff des polymeren optischen Wellenleiters (POW) definiert. Überdies beeinflusst das zugrundeliegende Herstellungsverfahren der Wellenleiter deren Eigenschaften. Durch die Betrachtung alternativer Herstellungsverfahren für polymere Lichtwellenleiter wird die Notwendigkeit des Einsatzes des Aerosol-Jet-Verfahrens herausgestellt, welches das Fundament der vorliegenden Arbeit bildet, weshalb dieser Aspekt detailliert betrachtet wird.

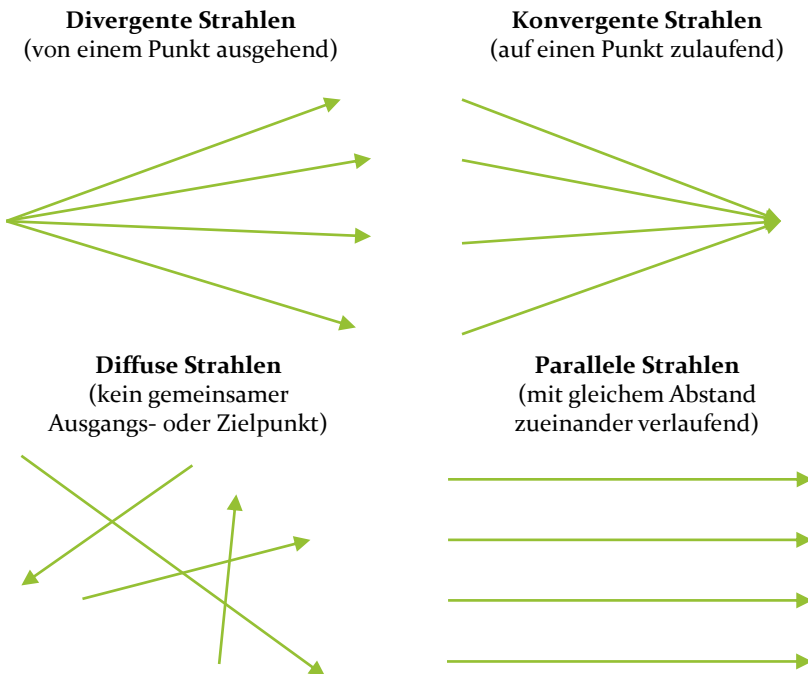


Bild 2: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strahlführungen des Lichts. [21]

2.1 Grundlagen der optischen Datenübertragung

Dieser Abschnitt erklärt grundlegend die Effekte, welche beim Übertritt des Lichts von einem Medium in ein anderes, bspw. von Luft in Polymer, ablaufen. Das wichtigste Prinzip der Lichtführung innerhalb eines gegebenen Mediums wird in Gestalt der Totalreflexion erläutert. Am Beispiel einer optischen Faser, welche aufgrund ähnlicher optischer Eigenschaften zur Beschreibung gedruckter Lichtwellenleiter herangezogen werden kann,

werden die Funktionsweise und die unterschiedlichen Ausprägungsformen selbiger beschrieben. Anhand der im Wellenleiter auftretenden Minderung der Übertragungsleistung kann nachfolgend die Charakterisierung der optischen Qualität der im Aerosol-Jet-Verfahren hergestellten POW abgeleitet werden.

Licht breitet sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von knapp $c_v = 3 \cdot 10^8$ m/s aus. Beim Eintritt in ein anderes Medium ändert sich die Lichtgeschwindigkeit. Der Quotient aus Vakuumlichtgeschwindigkeit c_v und Lichtgeschwindigkeit in einem Medium c_m wird nach (3) als dessen Brechungsindex oder auch Brechzahl n bezeichnet. [4, 22]

$$n = \frac{c_v}{c_m} \quad (3)$$

Einer der wesentlichen Effekte, die im Umgang mit Licht auftreten, ist die Brechung. Ein Lichtstrahl, der nicht genau senkrecht auf die Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Medien auftrifft, wird gebrochen. Bild 3 verdeutlicht die Zusammenhänge. [4]

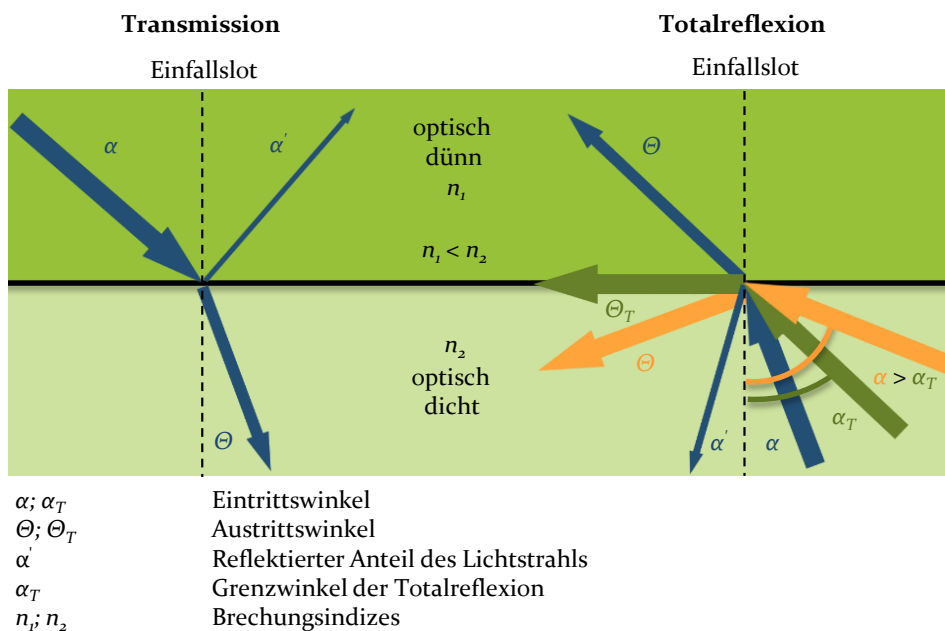


Bild 3: Schematische Darstellung der Transmission und Totalreflexion. [4]

In Bild 3 ist links der Übergang eines Lichtstrahls von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium unter dem Eintrittswinkel α und dem Austrittswinkel Θ dargestellt. In Bild 3 rechts ist der umgekehrte Fall,

also der Übergang vom optisch dichteren in das optisch dünnere Medium mit den Eintrittswinkeln α sowie α_T und den Austrittswinkeln Θ und Θ_T dargestellt. Dabei wird auch stets ein geringer Teil des auftreffenden Lichtstrahls reflektiert. Hierbei gilt das Reflexionsgesetz, welches besagt, dass der Einfallswinkel α gleich dem jeweiligen Ausfallswinkel α' ist, also gilt $\alpha = \alpha'$. Eintritts- und Austrittswinkel beziehen sich jeweils auf das Einfallslot zur Grenzfläche. Für den Zusammenhang zwischen den Brechungsindizes und den betreffenden Winkeln im Fall der Brechung gilt: Falls kein Übergang in ein anderes Medium, sondern reine Reflexion vorliegt, kommt nur das Reflexionsgesetz zur Anwendung. Für den Zusammenhang zwischen den Brechungsindizes und den betreffenden Winkeln gilt: [4, 23, 24]

$$\frac{\sin \Theta}{\sin \alpha} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Für den in Bild 3 rechts dargestellten, umgekehrten Fall, dem Übergang vom optisch dichteren in das optisch dünnere Medium, wird das Licht in einem größeren Winkel vom Einfallslot weg gebrochen. Der Grenzfall liegt vor, wenn der Winkel $\Theta = 90^\circ$ beträgt. Ab diesem kommt es zur Totalreflexion, sodass das einfallende Licht an der Grenzfläche vollständig reflektiert wird. Bei steigendem Eintrittswinkel α liegt ab Erreichen des Grenzwinkels α_T nur noch Totalreflexion vor. [4, 24]

$$\alpha_T = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (5)$$

2.1.1 Die Lichtführung in einer optischen Faser und die damit verbundenen Begriffe numerische Apertur und Mode

Für die Lichtwellenleitung in einer optischen Faser wird ein Wellenleiter mit einem Faserkern (Core) mit zugehörigem Brechungsindex n_K und einem Mantel (Cladding) mit dem Brechungsindex n_M benötigt. Um eine definierte Lichtführung im Kern zu ermöglichen, ist es zwingend notwendig, dass $n_K > n_M$ gilt. Lichtleitung ist grundsätzlich auch ohne Mantelschicht möglich, solange der Brechungsindex der Kernlage höher als der von Luft $n_o = 1$ ist. Jede Berührung des Kerns durch ein opakes Medium, z. B. einen menschlichen Finger, würde die Totalreflexion unterbrechen und somit die Signalübertragung massiv stören. [24]

Die Einkopplung und mögliche Strahlführung von Licht in einer optischen Faser ist in Bild 4 veranschaulicht. Soll Totalreflexion stattfinden, muss der

Lichtstrahl ausreichend flach auf die Grenzfläche zwischen Kern und Mantel treffen. Licht muss in diesem Fall innerhalb eines Akzeptanzkegels mit dem Akzeptanzwinkel Θ_{max} eingekoppelt werden. Bild 4 zeigt Beispiele für Lichtstrahlen, die genau unter dem Akzeptanzwinkel Θ_{max} (blaue Linie) und außerhalb des Akzeptanzkegels (schwarze Linie) in den Lichtwellenleiter eingekoppelt werden. Während innerhalb des Kegels und im Grenzfall lediglich Reflexion erfolgt, wird außerhalb des Kegels ein Teil des Lichts in den Mantel gebrochen. [4, 24]

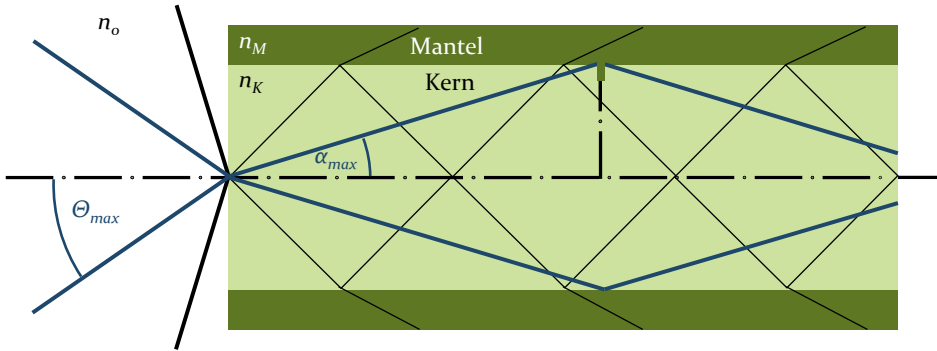


Bild 4: Schematische Darstellung der Lichtführung in einer optischen Faser. [4]

Das Produkt aus dem Brechungsindex des Mediums, in dem die Strahlen laufen und dem Sinus des maximalen Winkels des Strahlenbündels, wird auch als numerische Apertur NA bezeichnet und stellt die entscheidende Größe bei der Einkopplung von Licht in den Lichtwellenleiter dar. Sie ist ein Maß für den maximalen Winkel Θ_{max} , mit dem ein Strahl auf die Fasereintrittsfläche treffen darf, damit dieser nach seinem Eintritt in den Leiter diesen nicht wieder durch die Mantelfläche verlässt. Aus dem Brechungsgesetz folgt die Gleichung (6). [24]

$$NA = n_0 \sin \Theta_{max} = \sqrt{n_K^2 - n_M^2} \quad (6)$$

Die Auswirkungen einer steigenden numerischen Apertur sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Hierbei wirkt sich eine erhöhte NA nicht uneingeschränkt positiv auf die Fasereigenschaften aus.

Einen besonders kritischen Punkt stellt die sinkende Bandbreite dar, welche mit der zunehmenden Modendispersion zu erklären ist, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Die abnehmende Bandbreite ist ein weiterer Grund, weshalb das Kernmaterial nicht alleine, sondern in der Praxis zusammen mit einem angepassten Mantel verbaut wird. [4]

Tabelle 2: Einfluss steigender numerischer Apertur auf die Fasereigenschaften. [4]

Fasereigenschaft	Verhalten mit steigender NA
Biegeempfindlichkeit	Nimmt ab
Anzahl geführter Moden	Nimmt zu
Verluste an Steckern bei Winkelfehler	Nehmen ab
Verluste an Steckern bei Abstand	Nehmen zu
Verluste an Steckern bei seitlichem Versatz	Nehmen zu
Bandbreite	Nimmt ab

Abhängig vom Brechungsindexverlauf des Faserquerschnitts gibt es eine unterschiedlich große Anzahl an potentiellen Wegen (winkelabhängige Wellenvektoren), die ein Lichtstrahl im Lichtwellenleiter zurücklegen kann, ohne wiederum aus diesem auszukoppeln. Diese Wege werden in der Faseroptik als Moden bezeichnet und sind stets eindeutig durch deren Wellenlänge, Polarisation und Ausbreitungsweg definiert. Die Anzahl der Moden in einem optischen Wellenleiter wird durch die Strukturkonstante V festgelegt. Bestimmende Größen sind hierbei der Kernradius a , die Wellenlänge des eingekoppelten Lichts λ und die numerische Apertur NA . Nach (7) stehen diese im Zusammenhang: [4, 24]

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot NA \quad (7)$$

$V = 2,405$ stellt dabei einen definierten Grenzwert dar. Unterhalb dieses Werts kann sich nur eine Mode im Wellenleiter ausbreiten, oberhalb sind es mehrere. [4, 25]

2.1.2 Das Brechungsindexprofil und die Einteilung in Multimode/Singlemode-Fasern zur Differenzierung der Art des Lichtwellenleiters

Zur Lichtübertragung existieren verschiedene Arten optischer Wellenleiter. Obwohl eine Vielzahl konstruktiver Details die Eigenschaften von Lichtwellenleitern bestimmt, werden die existierenden Fasertypen nach ihrem Brechungsindexprofil unterschieden. Dies ist darauf zurückzuführen,

dass die optische Bandbreite und damit die Übertragungskapazität im Wesentlichen durch das Indexprofil bestimmt werden (siehe Bild 5).

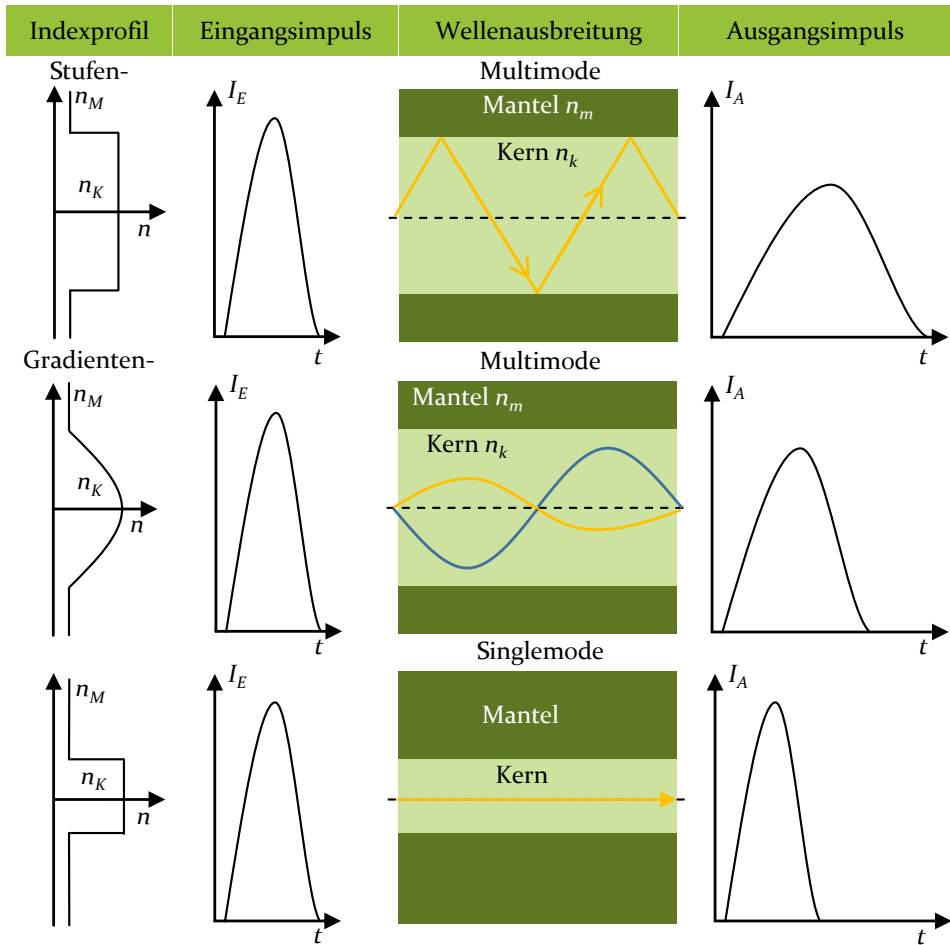


Bild 5: Schematische Darstellung unterschiedlicher Faserarten. Unterscheidung nach Indexprofil und Anzahl der geführten Moden mit charakteristischen Impulsverläufen. [4, 25]

Wie in Bild 5 dargestellt, wird einerseits abhängig vom Indexprofil zwischen Stufen- und Gradientenindexprofil-Faser und andererseits nach Anzahl übertragbarer Moden in Single- und Multimode-Fasern differenziert. Hierbei wird in Singlemode-Fasern nur die Grundmode geführt, während es in Multimode-Fasern möglich ist, mehrere tausend Moden zu führen. [4]

Beim Stufenindexprofil besitzt das Kernmaterial einen festen Brechungsindex n_k . Dadurch ergibt sich für die einzelnen eingekoppelten Lichtsignale

ein Laufzeitunterschied, welcher durch unterschiedliche Eintrittswinkel bedingt ist und zur Aufweitung der eingekoppelten Impulse führt. [25]

Im Gegensatz dazu bieten Gradientenindexprofile die Möglichkeit, unterschiedliche Laufzeiten zu minimieren. Dazu wird der Brechungsindex des Kernmaterials vom Maximalwert im Kernmittelpunkt hin zu den Randbereichen verringert. Die bogenförmig verlaufenden Lichtstrahlen legen zwar einen größeren Weg im Vergleich zu achsparallelen Strahlen zurück, weisen aber aufgrund des geringeren Brechungsindex abseits der Kernmitte eine größere Ausbreitungsgeschwindigkeit auf. Bei Gradientenindexfasern ist es möglich Laufzeitunterschiede weitgehend auszugleichen. Nachteilig bei Gradientenindexprofilen ist der aufwendigere Herstellungsprozess sowie die damit verbundenen Kosten. [25]

Für verschiedene Brechungsindexprofile kann die Anzahl N der Moden nach (8) näherungsweise für Fasern mit Stufenindexprofilen berechnet werden. [4, 26]

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (8)$$

Bei der Verwendung von Gradientenindexprofilen wird nach (9) die Anzahl der Moden halbiert. [4, 26]

$$N = \frac{V^2}{4} \quad (9)$$

Die Formeln (8) und (9) beziehen sich jeweils auf einen runden Faserquerschnitt. Für eine im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Materialkombination, bestehend aus EpoCore und EpoClad der Firma micro resist technology GmbH, kann somit die Modenzahl beispielhaft berechnet werden. Diese beschreibt die Anzahl der theoretisch maximal möglichen Wege der Lichtführung im Wellenleiter und ist mit spezifischen Vorteilen, wie der Robustheit oder der einfacheren Faserhandhabung gekoppelt. Hierbei ergeben sich aber auch Nachteile, auf welche im Folgenden noch näher eingegangen wird. Für die Materialkombination lässt sich wellenlängenabhängig, ausgehend vom Brechungsindex, deren numerische Apertur berechnen. Bei einem Kerndurchmesser von $50\text{ }\mu\text{m}$ kann die Strukturkonstante und über diese näherungsweise die Anzahl geführter Moden im Stufenindexprofil berechnet werden (siehe Tabelle 3). Bei der Berechnung selbst ist zu beachten, dass jeweils nur ganzzahlige Ergebnisse in Betracht gezogen werden können, weswegen stets abgerundet wird. [4, 26]

Tabelle 3: Berechnung der wellenlängenabhängigen numerischen Apertur, Strukturkonstante und Anzahl geführter Moden für die Materialkombination EpoCore und EpoClad.

Wellenlänge λ in nm	Numerische Apertur NA	Struktur- konstante V	Anzahl geführter Moden N
589	0,2073	55,27	1527
850	0,1993	36,84	678
1550	0,1949	19,75	195

2.1.3 Die Minderung der übertragbaren Lichtleistung und damit verbundene Effekte

Die Verlustleistung über den Faserverlauf hinweg wird durch die optische Dämpfung ausgedrückt. Diese beschreibt den Abfall der Intensität des Eingangssignals beim Durchgang des Lichts durch den Wellenleiter im Vergleich zum Ausgangssignal. Mathematisch wird die Dämpfung durch die empfangene Leistung P_L nach der zurückgelegten Länge L in km, der Ausgangsleistung P_0 und dem Dämpfungsbelag α' nach (10) beschrieben. [4]

$$P_L = P_0 \cdot e^{-\alpha' \cdot L} \quad (10)$$

Verbreitet ist zudem die logarithmische Darstellungsform zur Basis Zehn durch direkte Angabe des Dämpfungsbelags α in dB/km. [4]

$$\alpha = \frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_0}{P_L} = 4,343 \cdot \alpha' \quad (11)$$

Die Nomenklatur für Dämpfungsbelag und Dämpfungsmaß, welche durch Multiplikation des Dämpfungsbelags über die jeweilige Wegstrecke berechnet und in der Einheit dB angegeben wird, ist in der Literatur nicht einheitlich. So wird auch α als Formelzeichen für den Dämpfungsbelag und a als Dämpfungsmaß verwendet [4, 24, 27]. Ein Intensitätsverlust von 50 % pro Kilometer würde somit in einem Dämpfungsbelag von etwa 3 dB/km resultieren. Einen Überblick über mögliche Verluste liefert Bild 6. [4]

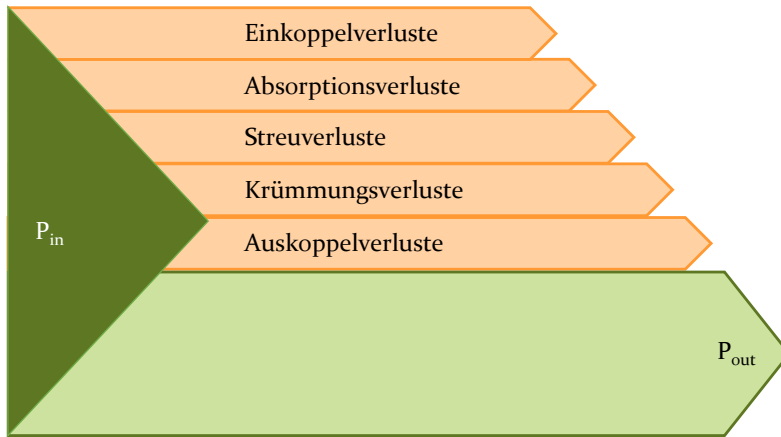


Bild 6: Überblick über mögliche Dämpfungsverluste in und an optischen Fasern. [4]

Die Leistungsverluste setzen sich aus geometrischen, materialbedingten und prozessbedingten Verlusten sowie Streuverlusten in der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel zusammen. Zusätzlich treten Koppelverluste an Verbindungsstellen beim Ein- und Auskoppeln des Lichts in und aus der Faser auf. Aufgrund von Verunreinigungen im LWL-Material kommt es zu Absorptionsverlusten, bei denen Strahlungsenergie in Wärme umgesetzt wird. Darüber hinaus beschränkt die Eigenabsorption des Leitermaterials im ultravioletten (UV-) und infraroten (IR-)Bereich den nutzbaren Wellenlängenbereich. Weitere Verluste treten durch Streueffekte bei Brechungsindex- oder Dichtefluktuationen auf. Krümmungsverluste werden in Makro- und Mikrokrümmungsverluste unterteilt. Wenn der zulässige minimale Krümmungsradius der Faser unterschritten wird und somit in der Krümmung eine Einschränkung der Totalreflexion auftritt, kommt es zu Makrokrümmungsverlusten. Mikrokrümmungen sind statistisch oder periodisch im Wellenleiterverlauf auftretende Fehlstellen, die zumeist auf die Welligkeit der verwendeten Oberflächen zurückzuführen sind. [4, 24, 28]

Darüber hinaus kommt es in multimodalen Wellenleitern zur modenabhängigen Dämpfung. Diese basiert auf den unterschiedlich langen Wegen, die achsparallele und mit bis zu Θ_{max} eintretende Strahlen bis zum Faseraustritt durch das dämpfende Material zurücklegen müssen. Da der Fasereintrittswinkel mit der numerischen Apertur korreliert, ist diese Erscheinung bei einer Verkleinerung oder Vergrößerung direkt proportional. Weitere Verluste treten in direktem Zusammenhang mit der Mantelschicht auf. Bei einer Totalreflexion des Lichtstrahls ragt das elektrische Feld der Welle in das Mantelmaterial hinein, dieser Effekt wird als Goos-Hänchen-Verschiebung bezeichnet und ist in Bild 7 schematisch dargestellt. [4, 29]

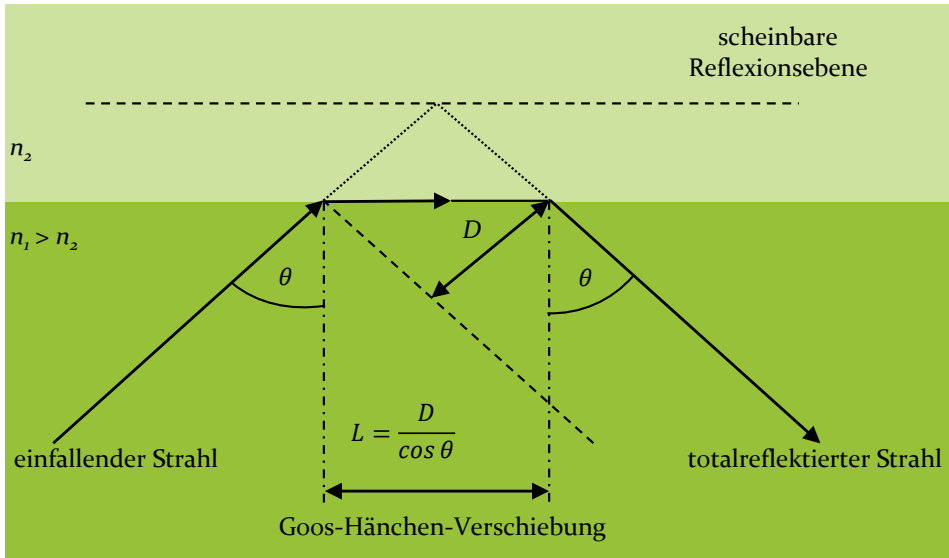


Bild 7: Schematische Darstellung der Goos-Hänchen-Verschiebung.

Obwohl sich diese Verschiebung der Reflexionsebene nur im höheren Nanometerbereich befindet, leistet sie einen nicht unerheblichen Beitrag zur Dämpfung, denn diese ist im Mantel um ein Vielfaches größer als im Leiterkern. Die Absorption des Mantelmaterials führt hierbei zur Erhöhung der Dämpfung und zeigt sich in erhöhtem Maße bei kleineren Durchmessern. Dort wird der Strahl, unter Voraussetzung einer konstanten numerischen Apertur, häufiger reflektiert. Dies führt zu erhöhten Intensitätsverlusten. [4, 26]

Weiterhin kommt es vorwiegend bei Polymerfasern zur Modenkopplung. Sie tritt dort auf, wo große Polymermoleküle keine ideal glatte Oberfläche bilden können, wie es zum Beispiel häufig in der Mantel-Kern-Ebene oder teilweise im Kern selbst vorkommt. Diese Streuzentren brechen und streuen das Licht, wodurch dieses in der Folge einen oder mehrere andere Wege bzw. Moden durch die Faser nutzt. Zudem wird die Bandbreite der Faser verringert. Hierbei wird das Licht partiell in Winkeln gebrochen, in denen eine Führung im Kern nicht länger möglich ist, weshalb auch die Modenkopplung, je nach Anzahl der Brechungen, mehr oder weniger stark zur Dämpfung beiträgt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass Strahlen oberhalb des Grenzwinkels nicht sofort vom Mantel absorbiert werden, sondern darin wiederum an Streuzentren mit günstigem Winkel zurück in den Kern reflektiert werden. [22]

Bei Biegung oder Krümmung des Lichtwellenleiters kommt es zur Modenkonversion. Innerhalb einer Krümmung ändern die Moden ihren bisherigen, unter einem definierten Winkel auftretenden Verlauf durch den Lichtwellenleiter. Der Weg einzelner Moden durch den Leiter wird somit manipuliert und es kann in der Folge zu einer oder mehreren bereits erwähnten Verlusterscheinungen kommen. [30]

Dispersion

Grund für die Laufzeitunterschiede unter den Moden, ist die Dispersion. Diese lässt sich primär in vom Ausbreitungsweg bzw. von der Wellenlänge abhängige Vorgänge und sekundär in verschiedene Arten aufgliedern. Eine kompakte Übersicht von in Faseroptiken auftretenden Dispersionsarten zeigt Bild 8. [30]

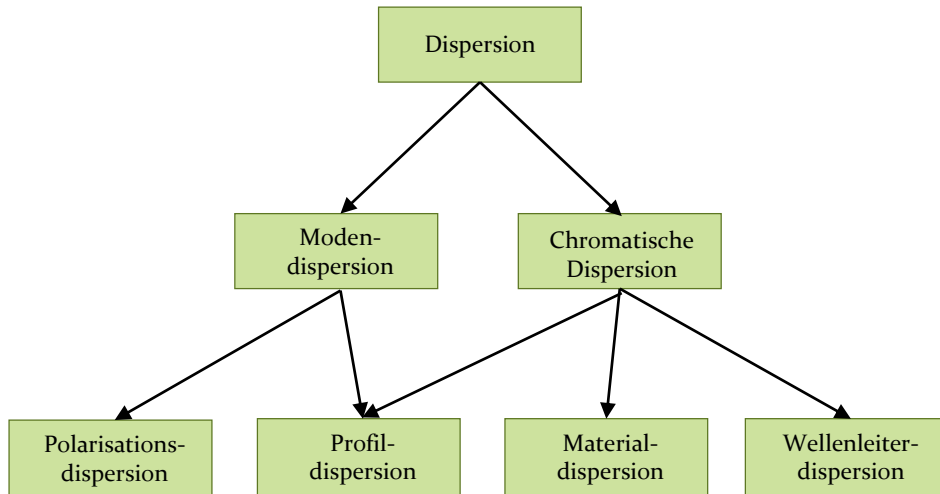


Bild 8: Übersicht über in der Faseroptik auftretende Dispersionsarten. [30]

Dispersion in optischen Fasern sorgt je nach Ausprägungsgrad in erster Linie für eine Verringerung der Bandbreite. Durch eine Verbreiterung fallen die Impulse weniger schnell ab. Dies führt wiederum dazu, dass der Zeitabstand, in dem die Intensität unter einen bestimmten Schwellenwert sinkt, geringer wird. Diese Verkürzung macht es für den Empfänger zunehmend schwieriger das Signal eindeutig zuzuordnen. Bei zu großer Dispersion können benachbarte Impulse nicht mehr getrennt, also fehlerfrei ausgelesen werden, weshalb die maximal übertragbare Datenmenge begrenzt wird. Unterschieden wird hierbei zwischen Modendispersion und chromatischer Dispersion, welche sich nochmals in Polarisations-, Profil-, Material- und Wellenleiterdispersion unterteilen lassen. Existieren mehrere

potentielle Strahlgänge in einer optischen Faser, so kommt es zur Modendispersion. Der in die Faser eingekoppelte kurze Lichtimpuls erscheint am Faserende deutlich länger. Bei Monomodefasern tritt diese Art der Dispersion nicht auf. [4]

Die chromatische Dispersion beeinflusst ebenfalls die Bandbreite eines Wellenleiters negativ, allerdings wird diese, anders als bei der Modendispersion, durch die Wellenlänge eines in die Faseroptik eingekoppelten Lichtimpulses verursacht. Dabei werden die unterschiedlichen Wellenlängen im Lichtwellenleiter differenziert geführt, weshalb es auch hier zu einer Impulsverbreiterung kommt. Materialdispersion tritt aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex vom verwendeten Fasermaterial in Kombination mit der spektralen Bandbreite der Strahlquelle auf. Da der Brechungsindex mit der Wellenlänge abnimmt, erfahren die einzelnen Farbanteile des Lichts unterschiedliche Phasenausbreitungsgeschwindigkeiten. Bei sehr kurzen Pulsen ist außerdem die spektrale Bandbreite aufgrund der Fourier-Beziehung größer, wodurch eine Verstärkung der chromatischen Dispersion bei kurzen Pulsen hervorgerufen wird. Durch die Materialdispersion entstehen somit Laufzeitdifferenzen innerhalb jeder Mode (Spektrum der Lichtquelle ist hierin enthalten). Dies äußert sich wiederum in einer Verbreiterung des Lichtimpulses. [4]

Bitfehlerrate

Die innerhalb des Kapitels 2.1.3 beschriebenen Einflüsse (Dispersion und Dämpfung) führen in der Praxis dazu, dass Signale mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gestört und am Wellenleiterausgang nicht mehr korrekt detektiert werden können. Die Wahrscheinlichkeit der gestörten Signalübertragung wird dabei durch die Bitfehlerrate (*BER*) [31]

$$BER = \frac{n_{err}}{N_0} \quad (12)$$

beschrieben, wodurch die Qualität der Signalübertragung messbar wird. Hierbei steht n_{err} für die Anzahl der fehlerhaft übertragenen Bits und N_0 für die gesamten übertragenen Bits. Durch die messtechnische Erfassung der *BER* kann eine Aussage über die Leistungsfähigkeit eines Übertragungsmediums, bspw. eines Lichtwellenleiters, getroffen werden. Generell kann die Messung durch einfaches Übertragen eines Datenpakets von einem Ende der Übertragungsstrecke zum anderen, bei gleichzeitiger Aufzeichnung der auftretenden Fehler, erfolgen. Da jedoch typische Werte für *BER* bei 10^{-4} bis 10^{-12} liegen, kann diese Messung im Extremfall Monate dauern. [31]

Eine zeitsparende Alternative bietet die Bestimmung des Q-Faktors [32]

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (13)$$

eines Augendiagramms, welche eine Approximation der BER darstellt und innerhalb einer Minute pro Kanal detektiert werden kann. Durch die Bewegung des Signalpegels zwischen -1 und 1 entsteht dabei die charakteristische Augenform. Die Mittelwerte μ_0 und μ_1 sowie die Standardabweichungen σ_0 und σ_1 werden benötigt, um die Verzerrung der Signalübertragung in einer statistischen Verteilung abbilden zu können. In einem nachfolgenden Schritt kann die BER mit Hilfe von Q berechnet werden. [32]

$$BER = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (14)$$

Die Qualität des Übertragungssystems kann somit visuell mit Hilfe des Augendiagramms beurteilt werden. Dieses wird an einem Oszilloskop, welches auf den Schritttakt der Digitaldaten getriggert ist, erzeugt. Durch Überlagerung der Messdaten entsteht ein augenförmiges Diagramm, wie es in Bild 9 dargestellt ist. Die Augenöffnung ist dabei ein Maß für die Robustheit des Signals. Mit zunehmender Größe sinken die Amplituden und Zeittaktschwankungen, die Signalzustände werden einfacher rekonstruierbar und es treten weniger Fehler auf. Generell gilt: solange das Auge nicht geschlossen ist, kann das Signal regeneriert werden. [33]

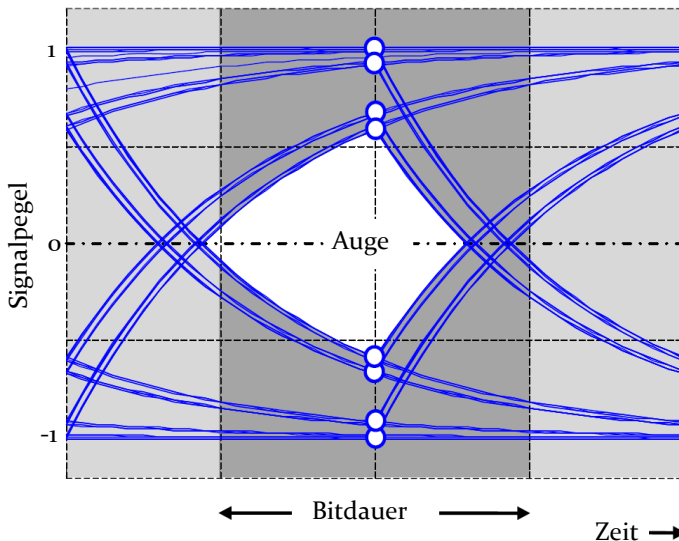


Bild 9: Graphische Darstellung eines Augendiagramms zur Visualisierung der Übertragungsqualität. [33]

In Bild 9 ist zudem der optimale Detektionszeitpunkt, welcher bei maximaler Augenöffnung liegt, durch blaue Kreise angegeben. An diesen kann eine klare Unterscheidung der Signale erfolgen.

2.2 Aufbau und Funktionsweise eines optischen Datenübertragungssystems

Da ein POW für sich keinerlei aktive Funktion besitzt und im Grunde genommen nur eine definierte Transportstrecke darstellt, muss die Peripherie zur Integration in ein funktionsfähiges Gesamtsystem ebenfalls berücksichtigt werden. Um optische Signal- und Datenübertragung zu realisieren, muss in den meisten Fällen eine Transformation eines elektrischen Signals in ein optisches und umgekehrt durchgeführt werden. Den prinzipiellen Aufbau eines derartigen Systems zeigt Bild 10. [24]

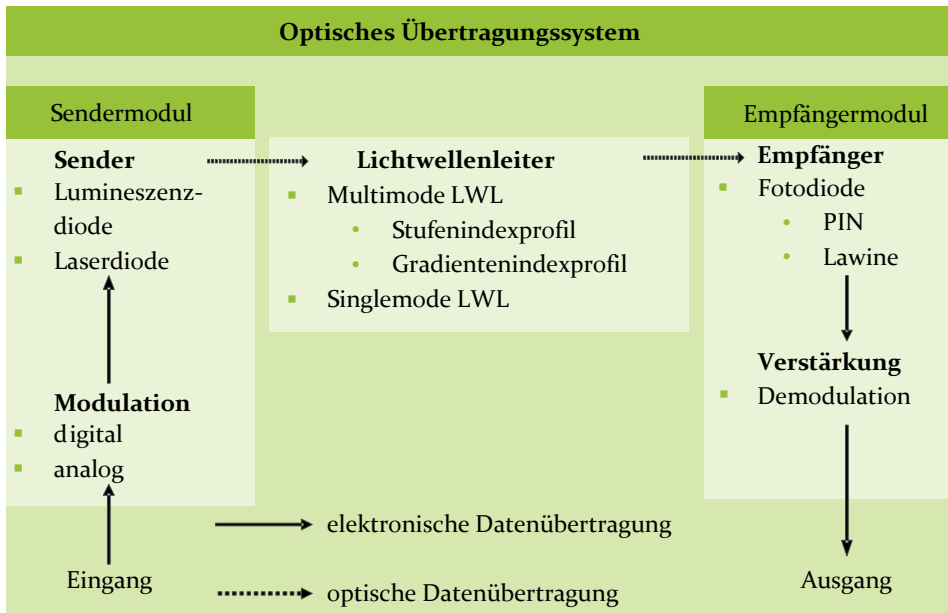


Bild 10: Prinzipieller Aufbau eines optischen Übertragungssystems. [24]

Im Sendermodul wird ein ankommendes elektrisches Signal analog oder digital moduliert. Hierbei werden optoelektronische Bauelemente auf Halbleiterbasis verwendet, da sie geringe Abmessungen sowie Modulierbarkeit bis in den Gigabitbereich vereinen. Als Lichtsender kommen hierbei sowohl LED, als auch Laser-Dioden (LD) zum Einsatz. Die Halbleiter-LED strahlen inkohärentes Licht mit hoher Leuchtdichte bzw. kleinem

Leuchtfleck ab. Dieses wird diffus über die Oberfläche des Halbleiters abgestrahlt und führt somit zu einer geringen Einkoppeleffizienz von ca. 1,5 %. Aufgrund der großen spektralen Bandbreite und der damit einhergehenden Materialdispersion ist die Höhe der Modulationsfrequenz beschränkt. Ein Vorteil dieser Dioden ist der sehr günstige Preis im Vergleich zu LD. Bei monomodalen LWL erreichen LED nur einen sehr geringen Einkoppelwirkungsgrad, weshalb hierbei bevorzugt LD verwendet werden. LD strahlen kohärentes, stark gebündeltes Licht mit geringer spektraler Bandbreite ab. Die Einkoppeleffizienz liegt bei ca. 50 %, wodurch höhere Leistungen eingespeist werden können. [34]

Das gesendete Signal wird anschließend in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt. Je nach Anwendungsfall kommen unterschiedliche Lichtwellenleitertypen zum Einsatz. Die mit einem Lichtwellenleiter überbrückte Wegstrecke ist dabei, wie im Vorfeld erwähnt, dämpfungs- und dispersionsbegrenzt. Für die Signalübertragung steht theoretisch der gesamte Wellenlängenbereich des Lichts zur Verfügung. In der Praxis beschränkt sich dieser Bereich jedoch auf drei Übertragungsfenster (auch erstes, zweites und drittes optisches Fenster genannt), innerhalb welcher besonders geringe Verluste auftreten (vgl. Tabelle 4). [35]

Tabelle 4: Nutzbare Frequenzbereiche von Lichtwellenleitern. [35]

Nutzbarkeit	Farbbereich	Wellenlänge	Frequenz
Für LWL theoretisch nutzbarer Bereich	Violett bis Infrarot	380 nm bis (780...1600) nm	789 THz bis (385...187) THz
Für LWL praktisch genutzte Bereiche	(1) Infrarot (2) Infrarot (3) Infrarot	$\approx$ (820...850) nm $\approx$ (1220...1330) nm $\approx$ (1520...1570) nm	(366...353) THz (246...226) THz (197...191) THz

Vom Empfängermodul wird das optische Signal wieder in ein elektrisches Signal gewandelt und dazu gegebenenfalls verstärkt und demoduliert. Empfangselemente optischer Übertragungssysteme sind üblicherweise Fotodioden. Diese besitzen eine geringe Reaktionszeit bis in den GHz-Bereich und erzeugen bei Lichteinfall einen messbaren Strom. [24, 34]

Die Gründe für den zunehmenden Einsatz optischer Übertragungssysteme anstelle von metallischen Leitern trotz des zumeist notwendigen und keineswegs verlustfreien Signalwandels, lässt sich am anschaulichsten anhand des direkten Vergleichs darstellen. Hierbei sind folgende Vor- und Nachteile optischer Systeme zu nennen. [34, 36]

Vorteile:

- Geringere Dämpfung (Glasfaser ca. 0,2 dB/km) als Kupferkabel (Radio Guide [RG] -11 Koaxialleitung 15 dB/km; abhängig von vielfältigen Einflussfaktoren wie etwa dem Durchmesser)
- Unempfindlichkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Störfeldern
- Keine Explosionsgefahr und keine Gefahr von Stromschlägen oder Kurzschlüssen
- Potenzialfreiheit führt zu Nutzbarkeit zwischen Systemen unterschiedlicher Potenziale (bis zu einigen 100 kV)
- Durch galvanische Trennung keine Erdungsprobleme
- Sehr hohe Bandbreiten/Übertragungsleistung, sowohl Datenrate (bis zu mehreren Tbit/s) als auch Entfernung (bis 100 km ohne Zwischenverstärker) betreffend
- Kleine Abmessungen, geringes Gewicht

Nachteile:

- Keine Übertragung großer Energiemengen möglich; zur Versorgung von Zwischenverstärkern (Repeatern) eigene Stromversorgung oder Kupferkabel nötig
- Für Arbeiten an aktiven Lichtleitern sind Schutzbrillen erforderlich; direkter Blickkontakt in gespeisten LWL kann bei großen Leistungen zu permanenten Retinaschäden führen
- Temperaturempfindlichkeit, insbesondere bei polymeren optischen Fasern; extreme Temperaturen ändern hierbei den Brechungsindex und stören die Signalübertragung
- Verbindungstechnik von LWL mit Sende-/Empfangeinheit oder zwischen mehreren LWL verhältnismäßig aufwendig und teuer

2.3 **Der Lichtwellenleiter: Begriffsdefinition, Abgrenzung und Einordnung**

Gemäß DIN (Deutsches Institut für Normung) 58140-1:2012 (Faseroptik – Begriffe, Formelzeichen) sind Lichtwellenleiter fadenförmige optische Elemente aus transparentem Werkstoff (z. B. Glas, Kunststoff oder Flüssigkeit) mit einem, über den Querschnitt so verteilten Brechungsindex, dass sie entweder durch Totalreflexion (z. B. Stufenindexfaser) oder durch kontinuierliche Umlenkung (z. B. Gradientenindexfaser) die Strahlung von Lichtquellen führen. Eine generelle Differenzierung erfolgt durch die Wahl des Werkstoffs in Glas (Quarz) und Polymer [37]. Dabei werden abhängig

von der benötigten Datenrate und dem Einsatzgebiet verschiedene Fasertypen eingesetzt. [4, 34]

Um die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten polymeren Lichtwellenleiter eindeutig zu klassifizieren, wird an dieser Stelle der Begriff polymerer optischer Wellenleiter (Polymer Optical Waveguide; POW) definiert. In einigen wenigen Forschungsarbeiten wurde der Begriff bereits verwendet (siehe [38, 39, 40]), jedoch erfolgte keinerlei Abgrenzung zu POF oder planaren Lichtwellenleitern (PLWL) auch Streifenwellenleiter genannt, weshalb all diese Bezeichnungen auch synonym verwendet werden.

Polymere optische Wellenleiter sind additiv auf das jeweilige zu funktionalisierende Bauteil aufgebrachte lichtleitende Strukturen. Durch den additiven Auftrag befindet sich das Kern- und Mantelmaterial beim Kontakt mit dem Substrat zumeist in der flüssigen Phase, woraufhin dieses in einem Nachbehandlungsschritt (Temperatur, UV-Beleuchtung, Binder) in den festen Aggregatzustand überführt wird. Durch die Wechselwirkung der Oberflächenenergie des Festkörpers (Substrats) und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit (Kern, Mantel) bildet sich die für den POW typische kreissegmentförmige Querschnittsfläche mit definiertem Kontaktwinkel aus. Um den Kontaktwinkel zu erhöhen, können verschiedene Formen der Konditionierung und Oberflächenvorbehandlung verwendet werden. Die Wellenleiter unterliegen bezüglich deren Indexprofil und Modenführung keinerlei Einschränkungen.

In Tabelle 5 finden sich die maßgeblichen Eigenschaften zur besseren Einordnung und Abgrenzung der Begriffe POW, POF und PLWL. Im Vergleich zur POF unterscheiden sich POW hauptsächlich durch deren direkte Substratbindung. In Anwendungen bei denen aktuell POF durch eine Fixierung, bspw. durch Kabelbinder, am Bauteil angebracht werden und kein Luftspalt durch den Einsatz des Kabels überwunden werden muss kann eine Substitution durch POW erfolgen. Durch ein direktes additives Funktionalisieren der Oberfläche kann somit ein Handhabungs- und Montageprozess eingespart werden.

PLWL werden zumeist lithographisch aus einer flüssigen Phase heraus per Laser- oder UV-Belichtung oder chemisch per Ätzverfahren hergestellt (Überblick siehe Kapitel 2.4). Verfahrensbedingt entstehen hierbei in den meisten Fällen rechteckige Querschnitte. PLWL befinden sich zudem meist eingebettet im Bauteilinneren. Ein typisches Beispiel hierfür sind elektrooptische Leiterplatten mit innenliegenden Lichtwellenleitern [19]. Weiterhin unterscheiden sich POW von PLWL in deren Gestaltungsfreiheit.

Durch das gewählte Druckverfahren ist eine Applikation auf dreidimensionalen Oberflächen möglich, womit eine Vielzahl potentieller Anwendungsgebiete erschlossen werden.

Tabelle 5: Abgrenzung und Einordnung der Begriffe POW, POF und PLWL.

Eigenschaft	POW	POF	PLWL
Geometrie	Kreissegment	Kreis	Rechteckig
Einbau	Auf Substratoberfläche	Kabel ungebunden	In Substrat eingebettet; „vergraben“
Herstellungsverfahren	Additive Drucktechnologie	Faserziehverfahren	Lithographie/ Ätzverfahren
Layout	2D/3D	3D	2D

Zur Illustration des allgemein definierten Begriffs POW zeigt Bild 11 beispielhaft die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines im Aerosol-Jet- (AJ-) Verfahrens additiv hergestellten POWs aus 390119 UV Supraflex Lack der Firma Jänecke+Schneemann (J+S).

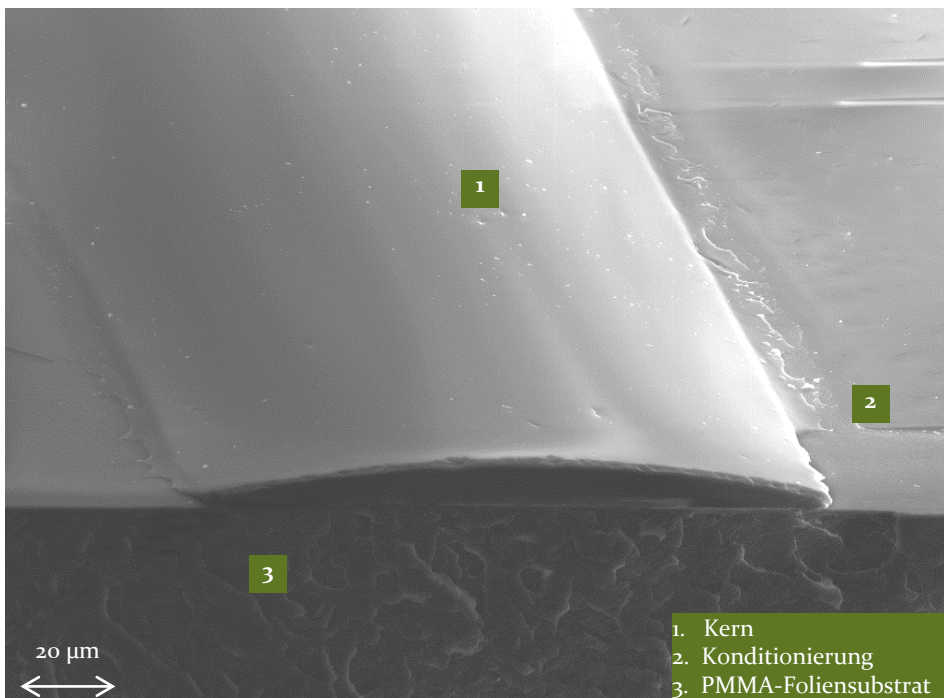


Bild 11: Rasterelektronenmikroskopische (REM-) Aufnahme eines additiv hergestellten POWs. [P1]

Dieser besitzt einen typischen kreissegmentförmigen Kernquerschnitt ohne aufgebrachte Mantellage auf 125 µm dickem Polymethylmethacrylat-(PMMA-) Foliensubstrat mit zur linken und rechten Seite des Wellenleiters aufgebrachten Konditionierungslinien aus G 8/372 L NVK S-040 der Firma Actega. Der Aufbau erfolgte im mehrstufigen „Optische Aufbau- und Verbindungstechnik für baugruppenintegrierte Bussysteme“ (OPTAVER)-Prozess, welcher im nachfolgenden Kapitel 3 näher erläutert wird.

2.4 Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter gegeben. Hierbei wird in erster Linie eine Abgrenzung zu den aktuell im Einsatz befindlichen Verfahren zur Herstellung von PLWL durchgeführt, da diese bezüglich der eingesetzten Materialien, Verfahren und Ihrer Geometrie POW durchaus ähnlich sind. Aus dem in Tabelle 6 durchgeführten Vergleich der einzelnen Verfahren mit dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Aerosol-Jet-Druck im OPTAVER-Prozess (Details siehe Kapitel 3) kann in der Folge der Forschungsbedarf abgeleitet werden. Aufgrund der Vielzahl der im Umfeld befindlichen Herstellungsverfahren werden diese im Einzelnen in nur wenigen Sätzen erläutert und kurz angegeben, warum diese nicht für die hier durchgeführte Forschungsarbeit in Betracht gezogen werden. Die dabei angeführten Quellen geben die Möglichkeit, die einzelnen Prozesse detaillierter zu betrachten.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass für die Herstellung von Glasfasern/POF meist Faserziehverfahren zum Einsatz kommen, bei denen eine kontinuierliche Verjüngung des Durchmessers hin zur gewünschten Abmessung erfolgt [27]. Alternativ werden Außen- oder Innenbeschichtungsverfahren [27; 41], das Sol-Gel-Verfahren [42], Ionendiffusion [30; 34] oder chemische bzw. physikalische Gasphasenabscheidungsverfahren [43] eingesetzt.

Inkjet-Druck

Sofern das verwendete Substratmaterial nicht als unterer Mantel genutzt werden soll, muss dieses aufgebracht und ausgehärtet werden. Durch eine piezogesteuerte Druckdüse, in welcher sich das flüssige Polymermaterial befindet, wird das Kernmaterial tropfenförmig aufgebracht und anschließend ausgehärtet. Da es sich hierbei um keinen kontinuierlichen strahlförmigen Materialaustritt, sondern um mehr oder weniger eng aneinander liegende Tropfen handelt, bestehen zudem Probleme in der Erzeugung einer kontinuierlichen Ausprägung der Randstruktur der späteren Wellenleiter.

In einem angepassten nachfolgenden Prozessschritt wird dann das Claddingmaterial aufgebracht und ausgehärtet. [44, 45, 46]

Die 3D-Fähigkeit ist in diesem Verfahren durch die nur sehr geringen Abstände zwischen Düse und Substrat von typischerweise 0,1 mm bis 1 mm stark eingeschränkt. Für Anwendungen im 2D-Bereich ist der Inkjet-Druck jedoch aufgrund der geringeren Investitionskosten dem Aerosol-Jet-Verfahren vorzuziehen. Durch dieses Verfahren können Dämpfungswerte von etwa 0,2 dB/cm, vergleichbar dem OPTAVER-Verfahren, erzeugt werden. [44, 45, 46]

Dispensieren

Auch hier gilt, sofern das verwendete Substratmaterial nicht als unterer Mantel genutzt werden soll, dass dieses aufgebracht und ausgehärtet werden muss. Im nächsten Schritt wird das in einer Kartusche befindliche Kernmaterial durch pneumatischen Druck kontinuierlich über eine Düsen spitze mit sehr geringem Abstand zum Substrat (typischerweise halber Düsen spitzendurchmesser also wenige hundert Mikrometer) auf selbiges aufgebracht und ausgehärtet. Dabei steht das Substrat über den vorhandenen Materialaustrittsstrom in direktem Kontakt zum Drucksystem. Im darauffolgenden Prozessschritt wird das obere Mantelmaterial aufgebracht und ausgehärtet. [47]

Für 2D-Anwendungen ist dieses Verfahren aufgrund der simplen Maschinenhandhabung, geringeren Investitionskosten und dem geregelten kontinuierlichen Materialaustritt dem Inkjet-Verfahren vorzuziehen. Der geringe Abstand zwischen Düse und Substrat beschränkt hierbei die 3D-Fähigkeit zunehmend. Die entstehenden Dämpfungswerte der Wellenleiter sind ebenfalls vergleichbar mit dem OPTAVER-Verfahren. [47]

Mosquito-Methode

Grundlage für dieses Verfahren bildet das Dispensieren. Hierbei werden in einem ersten Prozessschritt flächig große Mengen Mantelmaterial auf das vorhandene Substratmaterial aufgebracht (bspw. durch Spin-Coating) und in flüssigem Zustand belassen. Im Anschluss daran wird das Kernmaterial in selbiges injiziert. Hierbei dringt die Düsen spitze in die gewählte Tiefe des Mantels ein und bringt das Kernmaterial unter konstantem Vorschub ein. Damit sich im inneren des Mantels eine kreisrunde Kernstruktur ausbildet, ist die Auswahl geeigneter Materialien ein entscheidender Punkt. Maßgeblich hängt dies von den Oberflächenspannungen der beiden Polymere ab. Anschließend erfolgt die Aushärtung des Gesamtsystems. [48, 49]

Da der flächige flüssige Auftrag des Mantelmaterials mit anschließender Kerninjektion in 3D aktuell noch nicht beherrschbar ist, ist dies ein maßgeblicher Nachteil gegenüber des OPTAVER-Verfahrens. Die entstehenden Dämpfungswerte sind ebenfalls vergleichbar. Zudem ist die fehlende Materialvielfalt ein entscheidender Nachteil. [48, 49]

Fotolithographie

Bei diesem Verfahren werden Lichtwellenleiter schichtweise aus der flüssigen Phase heraus erzeugt. Hauptsächlich werden hierfür Ormocere eingesetzt, jedoch sind prinzipiell auch andere UV-härtende Materialsysteme verwendbar. Auf ein Trägersubstrat wird im ersten Schritt großflächig, beispielsweise durch Spin-Coating, flüssiges Mantelmaterial aufgebracht, welches in der Folge durch UV-Belichtung ausgehärtet wird. Im nächsten Schritt wird das spätere Kernmaterial aufgebracht und unter der Verwendung geeigneter Masken selektiv belichtet. Das verbleibende nicht verfestigte Kernmaterial wird unter Verwendung geeigneter Lösungen chemisch entfernt. Abschließend erfolgt wiederum das großflächige Aufbringen von Mantelmaterial sowie dessen Aushärtung. [P2]

Nachteilig gegenüber des OPTAVER-Verfahrens sind hierbei die Notwendigkeit einer Maske sowie der damit verbundene Herstellungsprozess und der Ressourceneinsatz. Die Beschaffung und Entsorgung der Chemikalien, die nicht vorhandene 3D-Fähigkeit und die geringe Materialvielfalt sind weitere negative Punkte. Für den Prozess spricht, dass aktuell geringere Dämpfungswerte von bis zu 0,04 dB/cm erreicht werden können. [P2]

Fotolyse

Die Fotolyse ist ein Verfahren, welches auf den Einsatz von PMMA-Material eingeschränkt ist. Auf dem Substratmaterial wird PMMA aufgebracht und ausgehärtet. Alternativ kann auch direkt PMMA als Substratmaterial eingesetzt werden, wodurch der erste Prozessschritt eingespart werden kann. Durch den Einsatz ionisierender Strahlung wird lokal, unter Nutzung einer Maske, der Brechungsindex erhöht und somit die spätere Lichtleitung ermöglicht. Abschließend erfolgt die Aufbringung und Aushärtung des PMMA-Mantelmaterials. [50]

Ein entscheidender Vorteil dieses Verfahrens gegenüber des OPTAVER-Prozesses ist die Möglichkeit, auch Singlemode-Wellenleiter herstellen zu können. Als Nachteile sind jedoch die nicht vorhandene 3D-Fähigkeit, die Notwendigkeit einer Maske, die materialseitige Beschränkung auf PMMA und höhere Dämpfungswerte im Bereich von 0,9 dB/cm bis 1,7 dB/cm zu nennen. [50]

Fotolocking

Auch hierbei erfolgt zunächst das Aufbringen und Aushärten des unteren Mantelmaterials, sofern nicht direkt das Substrat als Claddingmaterial eingesetzt werden kann. Nachfolgend wird eine Polymermatrix mit hohem Anteil an Monomeren und Fotoinitiatoren aufgebracht und selektiv über eine Maske belichtet. Hierbei erfolgt die Polymerisation der Fotoinitiatoren mit den Monomeren, wodurch lokal Bereiche mit erhöhtem Brechungsindex entstehen, welche die späteren Kernstrukturen darstellen. Im Unterschied zu anderen belichtenden Verfahren werden die unbelichteten Bereiche des Kernmaterials nicht entfernt. Abschließend erfolgt das Aufbringen und Aushärten des Mantelmaterials. [50]

Die geringe Materialvielfalt, die Notwendigkeit einer Maske sowie die nicht vorhandene 3D-Fähigkeit sind die zu nennenden Nachteile. Auch hier sind die erzielten Dämpfungswerte von 0,3 dB/cm bis 0,8 dB/cm wenn auch nur geringfügig höher, als dies beim OPTAVER-Prozess der Fall ist. [50]

Fotobleaching

Dieses Verfahren beruht auf dem Einsatz fotosensitiver, farbstoffdotierter Polymere. Diese werden großflächig aufgebracht und selektiv über eine Maske belichtet. Anders als bei vergleichbaren Verfahren wird in den belichteten Bereichen der Brechungsindex gesenkt. Diese Bereiche können in der Folge als Mantelschichten genutzt werden können. Der Wellenleiter selbst entsteht somit indirekt. Im letzten Schritt wird die Mantelschicht aufgebracht und ausgehärtet. [50]

Auch hier ist der Einsatz einer Maske nachteilig. Ebenso ist keine Möglichkeit zur dreidimensionalen Ausprägung von Wellenleitern gegeben. Die Dämpfungswerte von 0,8 dB/cm bis 1,31 dB/cm übersteigen zudem die des OPTAVER-Verfahrens. Die geringe Langzeitstabilität der belichteten Bereiche ist ein weiteres Problem, das bei dieser Art der Herstellung auftritt. [50]

Reaktives Ionenätzen (Reactive Ion Etching, RIE)

Nachdem das untere Mantelmaterial aufgebracht und ausgehärtet ist, erfolgt das Auftragen einer reaktiven Polymerschicht, welche als späterer Kern dient. Unter Plasmaatmosphäre erfolgt die maskierte Bestrahlung der reaktiven Polymerschicht mit Ionen, welche die nicht von der Maske geschützten Bereiche sukzessive abätzt. Abschließend erfolgen der Auftrag und die Aushärtung des oberen Mantels. [42, 50]

Die äußerst feine Auflösung dieses Verfahrens ($< 100 \text{ nm}$) ist ein maßgeblicher Vorteil gegenüber des OPTAVER-Verfahrens, wodurch es zudem möglich ist, Singlemode-Wellenleiter herzustellen. Auch die äußerst geringen Dämpfungswerte von bis zu $0,01 \text{ dB/cm}$ sind positiv hervorzuheben. Nachteilig ist jedoch wiederum die nicht vorhandene 3D-Fähigkeit, die Notwendigkeit spezieller Masken und die kostspielige Anlagentechnologie unter Plasmaatmosphäre. [42, 50]

Replikationstechnologien (Heiß- und Spritzprägen sowie Reaktions- und Spritzguss)

Die hier zusammengefassten Technologien zeichnen sich durch den Einsatz eines formgebenden Werkzeugs aus. Die Werkzeuge werden dabei dafür benutzt, entweder die Form für den späteren Wellenleiter vorzugeben oder das Negativ dessen zu sein. Bei vorhandener Form erfolgt die Befüllung des Werkzeugs schichtweise in der Reihenfolge Mantel-Kern-Mantel oder es wird lediglich der Kernwerkstoff im Werkzeug ausgehärtet und auf die spätere Manteloberfläche aufgebracht. Im Fall, dass das Werkzeug das negativ des Wellenleiters darstellt, erfolgt zumeist das Eindringen des Werkzeugs in das verfestigte oder noch flüssige Kern- oder Mantelmaterial. Die so entstehenden Gräben können in der Folge je nach Anwendungsfall mit Kern oder Mantelmaterial befüllt werden. Abschließend wird das Gesamtsystem mit Mantelmaterial überdeckt und ausgehärtet. [42, 50]

Die hier zusammengefassten Verfahren erlauben nur bedingt die Herstellung von 3D-Wellenleitern, auch wenn es je nach Form des Werkzeugs durchaus Möglichkeiten dazu gäbe. Die Herstellung der Werkzeuge und Formen schränkt jedoch die Flexibilität der Verfahren stark ein und kann als größter Nachteil betrachtet werden. [42, 50]

Laserablation

Sollte das vorhandene Substrat nicht als unterer Mantel dienen, wird zusätzliches Material aufgebracht und ausgehärtet. Auf dieses wird das Kernmaterial aufgebracht und ausgehärtet. Anschließend erfolgt der laserinduzierte Abtrag des überschüssigen Kernmaterials, sodass nur noch freiliegende Kernstrukturen vorhanden sind. Im letzten Schritt wird Mantelmaterial aufgebracht und ausgehärtet. [51, 52]

Auch dieses Verfahren ist nicht 3D-fähig. Die aufwendige und lange Prozessführung mit der damit verbundenen Verdampfung des Kernmaterials ist zudem negativ. Es ist jedoch möglich sehr niedrige Dämpfungswerte von bis zu $0,035 \text{ dB/cm}$ zu erreichen, wodurch sich dieses Verfahren gegenüber dem OPTAVER-Prozess auszeichnet. [51, 52]

Tabelle 6: Vergleich der aktuell im Einsatz befindlichen Verfahren zur Herstellung von polymeren Lichtwellenleitern.

Technologievergleich potentieller Herstellungsverfahren für polymere optische Wellenleiter							
Technologie	3D-Fähigkeit	Dämpfung [dB/cm]	Single-mode	Maske	Materialvielfalt	Chemikalien	Prozessdauer
Laserablation	nein	0,035	ja	nein	sehr hoch	nein	hoch
Replikationstechnologien	nein	0,2	nein	nein	sehr hoch	nein	sehr niedrig
Reaktives Ionenätzen	nein	0,01	ja	ja	niedrig	nein	sehr hoch
Fotobleaching	nein	0,8	nein	ja	niedrig	ja	hoch
Fotolocking	nein	0,3	nein	ja	niedrig	ja	sehr hoch
Fotolyse	nein	0,9	ja	ja	nur PMMA	ja	hoch
Fotolithographie	nein	0,04	ja	ja	niedrig	ja	sehr hoch
Mosquito-Methode	nein	0,2	nein	nein	niedrig	nein	niedrig
Dispensieren	möglich	0,2	nein	nein	sehr hoch	nein	sehr niedrig
Inkjet-Druck	möglich	0,2	nein	nein	hoch	nein	sehr niedrig
Aerosol-Jet-Druck	ja	0,2	nein	nein	hoch	nein	niedrig

Tabelle 6 gibt in kompakter Form einen Überblick über die im Vorfeld beschriebenen alternativen Herstellungsverfahren für polymere Lichtwellenleiter sowie dem Aerosol-Jet-Druck. Aus dieser geht somit hervor, dass sämtliche aktuell verwendeten Herstellungsverfahren für polymere Lichtwellenleiter zum Aufbau zweidimensionaler Strukturen konzipiert sind. Dabei ist es bei manchen Verfahren theoretisch möglich, dreidimensionale Lichtwellenleiter herzustellen. In der Praxis wird dies jedoch aufgrund der damit verbundenen Kosten und der zusätzlichen Prozesszeit (3D-Masken, Prozessführung etc.) keine Anwendung finden. Durch den Einsatz des Aerosol-Jet-Drucks ist es somit erstmals möglich, dreidimensionale Oberflächen mit lichtleitenden Strukturen zu funktionalisieren. Darüber hinaus zeichnet sich der OPTAVER-Prozess ebenfalls in den Punkten Materialvielfalt, dem Entfallen einer Maske sowie des nicht notwendigen Chemikalieneinsatzes aus.

Durch die Visualisierung der notwendigen Schritte zur Herstellung polymerer Lichtwellenleiter in Bild 12 ist die Verkürzung der Prozesskette durch den Einsatz des OPTAVER-Verfahrens in einfacher Form möglich. Da der OPTAVER-Prozess und im Speziellen der Aerosol-Jet-Druck mit dessen vielfältigen Möglichkeiten und Vorteilen bislang nicht zur Herstellung polymerer optischer Wellenleiter wissenschaftlich untersucht wurde, erfolgt dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

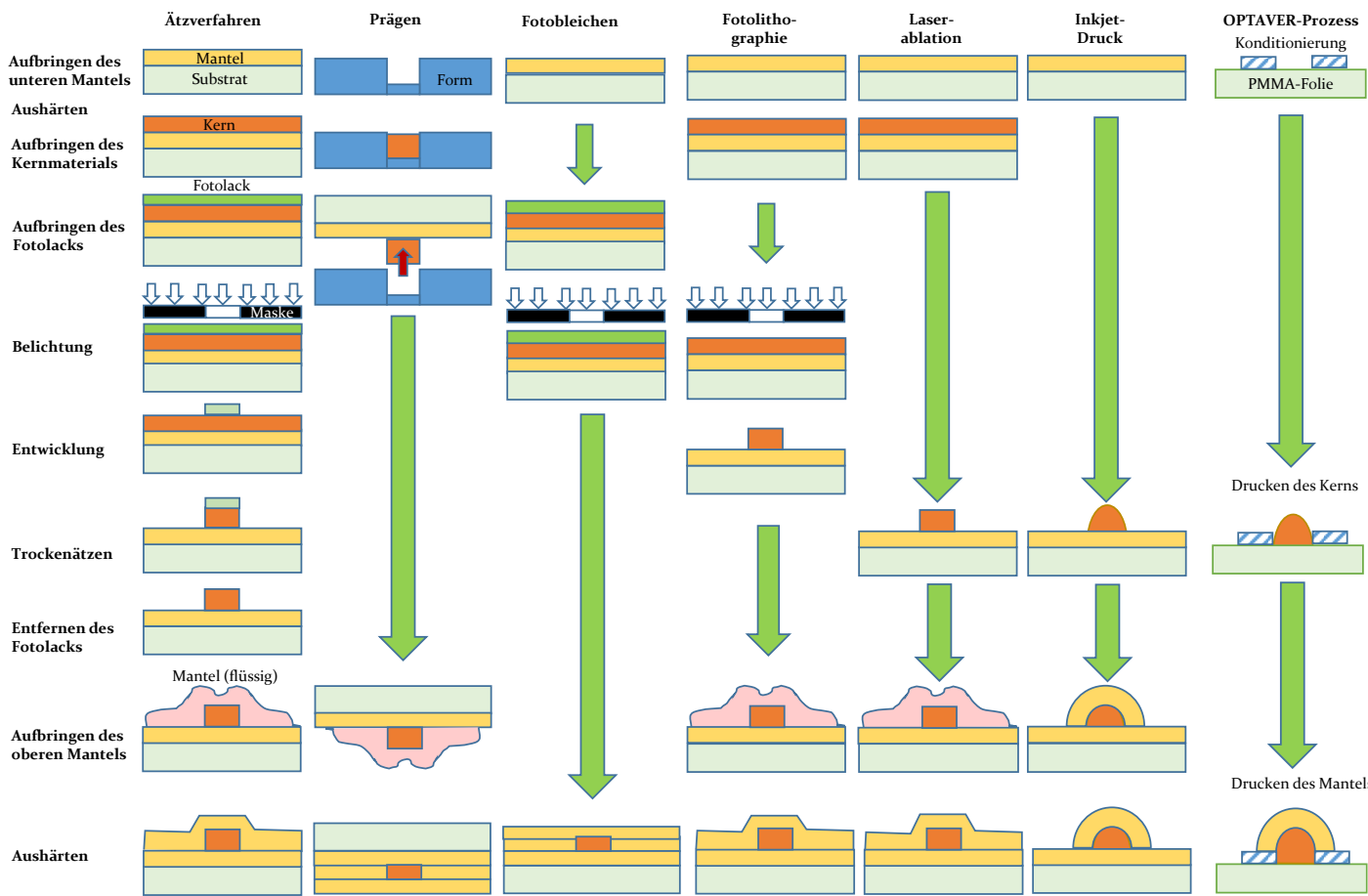


Bild 12: Schematische Darstellung diverser Prozessketten zur Herstellung planarer Wellenleiter und POW. [4, 42, 53, 54, 55]

Das Aufbringen des unteren und oberen Claddings sowie des Kernmaterials erfolgt in den meisten Fällen durch gleichmäßig flächigen Auftrag (bspw. Spin-Coating) mit nachgelagertem Aushärtungsschritt (UV-Belichtung, Temperierung). Hierbei wird überschüssiges Material aufgebracht, welches in der Folge wiederum entfernt werden muss. Durch den gezielten Auftrag flüssiger Bahnen im Aerosol-Jet-Druck können somit zum einen Prozessschritte eingespart und zum anderen Ressourcen geschont werden.

2.5 Ableitung des Handlungsbedarfs und der daraus resultierenden Zielsetzung

Die Notwendigkeit für den Ersatz metallischer Kabel durch optische Fasern wurde in den vorangegangenen Kapiteln eingehend erläutert. Speziell wurde dabei auf den Einsatz von POF für die Kurzstreckenübertragung eingegangen. Generell haben alle kabelbasierten Lösungen spezifische Nachteile, welche durch die Integration des Übertragungskanals auf oder in das jeweilige Substratmaterial eliminiert werden können. So entfällt die Handhabungsproblematik biegeschlaffer Teile, Konfektionierungsaufwand wird eingespart und eine Fixierung auf der jeweiligen Oberfläche führt in manchen Anwendungen zur Erhöhung der Prozesssicherheit und damit zur Minimierung des Ausfallrisikos. Um jedoch den Transfer von der POF hin zur direkt auf oder im Bauteil integrierten optischen Leiterbahn zu schaffen, bedarf es vollkommen neuer Lösungswege.

Des Weiteren konnte vor allem durch die Betrachtung alternativer Herstellungsverfahren der Bedarf an einer Prozessführung, die es erlaubt, auch auf dreidimensionalen Oberflächen flexibel Lichtwellenleiter aufzubauen, aufgezeigt werden. Auch der zumeist notwendige Einsatz von Chemikalien, welche wiederum umweltschädlich sind und als Sondermüll entsorgt werden müssen, motiviert eine alternative Prozessführung.

Das Aerosol-Jet-Verfahren der Firma Optomec ist ein digitales Direktdruckverfahren, bei dem es möglich ist, masken- und berührungslos unterschiedliche Werkstoffe auf dreidimensionalen Oberflächen aufzubringen. Die Erforschung und Entwicklung des Aerosol-Jet-Verfahrens begann Ende der 1990er Jahre im Rahmen eines Forschungsprojekts der Defense Advanced Research Program Agency (DARPA). Bis heute wird dieses Verfahren intensiv zum Aufbau elektrisch leitfähiger Strukturen, zumeist auf Basis von Silbertinte, wissenschaftlich untersucht. Diese Arbeit betrachtet weltweit erstmalig den additiven Aufbau lichtleitender Strukturen im Aerosol-Jet-Prozess durch die Verarbeitung flüssiger Polymere. [56, 57]

Ziel dieser Arbeit ist es somit eine Prozesstechnik für den Aerosol-Jet-Druck zu entwickeln, die es erlaubt, auf optisch transparenten Polymeren Lichtwellenleiter zu generieren, indem durch ultraviolettes (UV-) Licht härtende Adhäsive aufgetragen werden. Die Schwerpunkte liegen in der Erforschung eines Prozessmodells, welches die Beziehungen zwischen verschiedenen Kunst- und Klebstoffen in Verbindung mit den jeweiligen Prozessparametern des Aerosol-Jet-Verfahrens und deren Auswirkungen auf die Qualität der lichtleitenden Strukturen abbildet.

Die Wahl geeigneter Kunststoff/Klebstoff-Kombinationen auf Basis von mechanischen, thermischen und optischen Eigenschaften stellt die Grundlage des produktionstechnischen Verfahrens dar. Anhand dieser Materialkombinationen werden die optimalen Prozessparameter der Aerosol-Jet-Anlage in Folge experimenteller Versuchsdurchführungen erörtert. Dabei steht die geometrische Qualität, definiert durch optimiertes Aspektverhältnis, geringe Rauheit und Welligkeit sowie möglichst kein Overspray (siehe Kapitel 3.2.2) der polymeren Lichtwellenleiter als primäres Forschungsziel voran. Durch das Erreichen möglichst hoher geometrischer Qualität soll die optische Qualität, definiert durch die Transmissionsrate des Materials, die Intensitätsverteilung im Wellenleiter selbst, die Dämpfung und damit verbunden die am Lichtwellenleiterausgang messbare Lichtleistung und die Datenübertragungskapazität, gewährleistet werden.

Der Einsatz des Aerosol-Jet-Verfahrens zur Herstellung optischer Lichtwellenleiter mit möglichst niedrigen Dämpfungswerten unterliegt vielfältigen Einflüssen. Sowohl die angesprochenen Materialkombinationen, das Arbeitsmilieu und die damit verbundenen Faktoren Verschmutzung und UV-Einstrahlung, als auch das prozesstechnische Zusammenspiel von Aerosol-Erzeugung, -Absaugung, -Fokussierung sowie Abstand zwischen Düse und Substrat spielen dabei eine entscheidende Rolle.

3 Der OPTAVER-Prozess zur Herstellung flexibler Datenübertragungsnetzwerke

Der OPTAVER-Prozess, welcher im Rahmen der gleichnamigen Forschergruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) etabliert wurde, ist ein mehrstufiges, additives Herstellungsverfahren für polymere optische Wellenleiter. Die Forschergruppe selbst gliedert sich dabei in fünf Teilprojekte. Die Ergebnisse dieser Arbeit fokussieren sich auf das Teilprojekt 2 des Forschungsverbunds und somit den Aerosol-Jet-Druck des Wellenleiterkerns und -mantels. Da es sich jedoch um einen äußerst eng vernetzten Gesamtprozess handelt, kann auf die Inhalte anderer Teilprojekte zur Erstellung einer durchgängigen Dokumentation an einigen Stellen nicht verzichtet werden. Die Prozesskette wurde bereits schematisch in Bild 12 dargestellt und wird zusammen mit den notwendigen Materialien, Fertigungsprozessschritten und Rahmenbedingungen innerhalb dieses Kapitels näher erläutert.

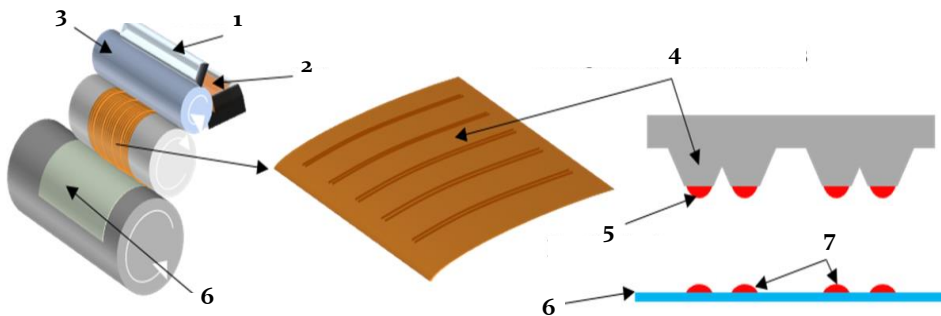
Der hier vorgestellte Lösungsansatz beruht auf dem steigenden Bedarf an optischen Datenübertragungslösungen und der fehlenden Prozesstechnik, vor allem für dreidimensionale Anwendungen. Im OPTAVER-Prozess wird ausgehend von einem flexiblen, transparenten Foliensubstrat eine Konditionierung desselbigen vorgenommen. Diese wird im Flexodruck-Verfahren zur linken und rechten Seite des späteren Wellenleiters mit definiertem Abstand aufgetragen und unter UV-Licht ausgehärtet. Die Konditionierung der Foliensubstrate sowie die damit verbundene Materialauswahl wird an der Leibniz Universität Hannover am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) vorgenommen und erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS). Die Konditionierungslinien selbst weisen eine möglichst niedrige Oberflächenenergie auf, welche deren hydrophobe Materialeigenschaften hervorruft. Diese werden zur Erhöhung des Aspektverhältnisses, respektive des Kontaktwinkels, des im nächsten Prozessschritts unter Verwendung des Aerosol-Jet-Verfahrens aufgetragten Kernmaterials eingesetzt. Das noch flüssige, zwischen die beiden Konditionierungslinien eingebrachte Polymer formt aufgrund der Wechselwirkung zwischen der Oberflächenenergie des Festkörpers und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit eine kreissegmentförmige Struktur aus, welche in der Folge wiederum durch UV-Licht ausgehärtet wird. Da es sich hierbei um eine Solidifizierung einer Flüssigkeit handelt, sind die entstehenden Oberflächenrauheiten äußerst gering ($R_z < 0,8 \mu\text{m}$), wodurch deren spätere

3.1 Das Flexodruck-Verfahren zur Herstellung konditionierter Foliensubstrate und die daraus resultierende Manipulation der Oberflächenphysik

optische Eigenschaften verbessert werden. Abschließend wird das Mantelpolymer im AJ-Verfahren auf den verfestigten Kern aufgetragen und durch UV-Licht ausgehärtet. Diese gedruckten Wellenleiter sind leicht, flexibel, 3D-fähig und aufgrund ihrer polymeren multimodalen Stufenindexprofileigenschaften besonders für die Kurzstreckenübertragung im Bereich bis 100 m einsetzbar.

3.1 Das Flexodruck-Verfahren zur Herstellung konditionierter Foliensubstrate und die daraus resultierende Manipulation der Oberflächenphysik

Der Flexodruck ist ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren, welches aktuell zum Bedrucken von Verpackungen und Zeitschriften eingesetzt wird [55]. Prinzipiell handelt es sich um ein Hochdruckverfahren, in dem flexible Fotopolymerdruckformen zusammen mit flüssiger Tinte verarbeitet werden können (siehe Bild 13) [55]. Hierbei wird über ein Rakel (1) Tinte aus dem Vorratsbehälter (2) auf die Rasterwalze (3) übertragen. Auf einer zweiten Walze befindet sich die eigentliche Druckform (4), auf deren Erhebungen über das Andrücken an die Rasterwalze funktionales Polymer (5) übertragen wird. Gleichzeitig wird das eigentliche Substratmaterial (6) auf einer dritten Walze an die Druckform gepresst, womit ein durch Kraft und Abstand definierter Kontakt zum Übertrag des Polymers stattfindet. Die hierbei entstehenden Konditionierungslinien (7) werden in einem letzten Prozessschritt durch UV-Belichtung polymerisiert. [P3]



- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Rakel | 5. Funktionales Polymer |
| 2. Tintenvorratsbehälter | 6. Flexibles Substratmaterial |
| 3. Rasterwalze | 7. Konditionierungslinien |
| 4. Druckform mit profilierter Struktur | |

Bild 13: Schematische Darstellung des Flexodruck-Verfahrens zur Konditionierung der Foliensubstrate. [P4]

Die verwendete profilierte Druckform mit ihren trapezförmigen Negativstrukturen wird meist fotolithographisch oder durch Laserbearbeitung hergestellt. Dies begrenzt deren maximale Auflösung derzeit auf 10 μm . Verschiedene Ansätze zur weiteren Optimierung der Auflösung der Stempeloberflächen durch bspw. Fluorierung bzw. verbesserte Laserstrukturierung oder einer Kombination aus beidem sind aktueller Forschungsgegenstand. Hierdurch soll die Randwelligkeit der im Nachgang aufgetragenen Lichtwellenleiterkerne verringert werden. [P5]

Die so hergestellten Konditionierungslinien aus Actega G8-372L/NVK-S zeichnen sich besonders durch deren geringe Oberflächenenergie von nur 25 mN/m, im Vergleich zur unbehandelten PMMA-Folie mit 44 mN/m, aus. Aus der geringeren Oberflächenenergie resultiert eine erhöhte Hydrophobie gegenüber dem eingebrachten flüssigen Kernmaterial. Dies führt zu einem höherem Aspektverhältnis und damit verbunden größerem Kontaktwinkel. In Bild 14 werden diese Zusammenhänge veranschaulicht. [P5]

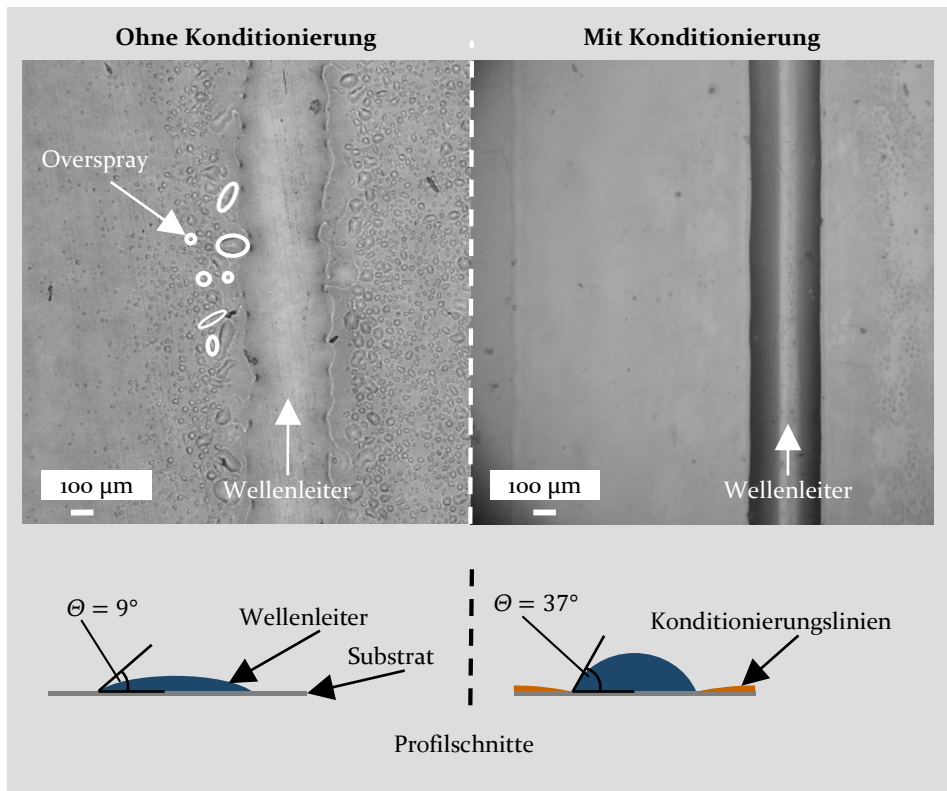


Bild 14: Vergleich gedruckter POW auf PMMA-Foliensubstrat; ohne Konditionierung (links); mit Konditionierung (rechts). [P5]

In Bild 14 ist zudem die Verringerung der Randwelligkeit und des Oversprays zu erkennen. Auf unvorbehandeltem Foliensubstrat können im Aerosol-Jet-Verfahren aktuell keine Randstrukturen mit optischer Güte generiert werden. Vielmehr bilden sich in Kombination mit dem vorhandenen Overspray Randbereiche, in denen die einzelnen Tropfen mit dem Kernmaterial verschmelzen und somit Strukturen mit undefinierten Randwelligkeiten ausbilden.

Die schematisch dargestellten Profilschnitte zeigen die jeweils laser-scanning-mikroskopisch ermittelten Kontaktwinkel zwischen Wellenleiter und Substrat, welche von 9° auf 37° erhöht werden. Zur messtechnischen Ermittlung des maximalen Kontaktwinkels zwischen Kern und Konditionierungsmaterial kommt zudem ein Kontaktwinkel-Goniometer zum Einsatz. Hierbei wird ein Tropfen einer Flüssigkeit (J+S 390119) auf ein festes Substrat (Actega G8-372L/NVK-S) aufgebracht und der Kontaktwinkel optisch vermessen. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Messreihen zeigen, dass der maximal mögliche Kontaktwinkel bei $61,4^\circ$ liegt.

Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf Feststoffen

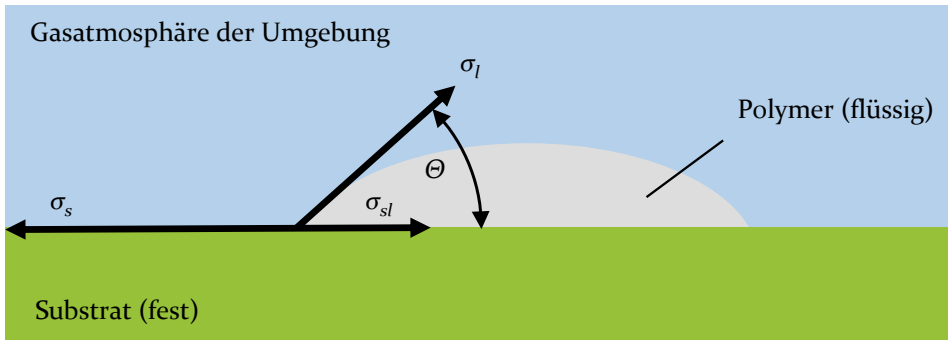
Um das Verhalten der flüssigen Polymere an der Oberfläche des PMMA-Substrats zu optimieren, ist ein grundlegendes Verständnis der Hydrodynamik und des Verhaltens von Stoffen an Grenzflächen erforderlich. Generell ist das Zusammenwirken von Adhäsion und Kohäsion sowie das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf Feststoffen für die hier durchgeführten Forschungsarbeiten von großer Bedeutung.

Adhäsion ist das Wirken der Anziehungskraft zwischen Molekülen oder Atomen unterschiedlicher Stoffe, die bei hinreichender Annäherung eintritt. Ein Beispiel hierfür ist das Haften von flüssigem Polymer an der Substratoberfläche. Kohäsion ist das Wirken der Anziehungskraft zwischen Atomen, Ionen und Molekülen gleicher Stoffe. Im Beispiel Polymer und Substrat sorgt die Kohäsion für den Zusammenhalt der Flüssigkeit, also konkret für die Ausbildung einzelner Tropfen. [58]

Eine Folge der Adhäsions- und Kohäsionskräfte ist die in (15) definierte Oberflächenspannung σ . Diese ist definiert als die Arbeit dW_A , die pro Fläche dA geleistet werden muss, um die Oberfläche der Flüssigkeit zu vergrößern. Ihre Einheit ist $\text{J/m}^2 \triangleq \text{N/m} \triangleq \text{kg/s}^2$. Die Oberflächenspannung bewirkt, dass Flüssigkeiten ihre Oberfläche möglichst klein halten und ist temperaturabhängig. [58]

$$\sigma = \frac{dW_A}{dA} \quad (15)$$

In Abhängigkeit von den lokalen Benetzungsbedingungen nehmen Flüssigkeiten beim Aufbringen auf ein festes Substrat verschiedene Ausprägungsformen an. Die Tropfenform der Flüssigkeit wird durch seinen Kontaktwinkel Θ (auch als Randwinkel bezeichnet) charakterisiert. Wie in Bild 15 zu sehen, ist dieser Winkel zwischen einer an der Flüssigkeitsoberfläche angelegten Tangente und der Substratoberfläche aufgespannt. [59]



- Θ = Kontaktwinkel (Randwinkel; Benetzungswinkel)
- σ_s = Oberflächenenergie des Substrats
- σ_l = Oberflächenspannung des flüssigen Polymers
- σ_{sl} = Oberflächenspannung zwischen Substrat und Polymer

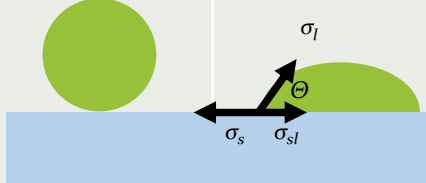
Bild 15: Schematische Darstellung der Kräfteverhältnisse eines flüssigen Polymers auf einer ebenen Substratoberfläche. [59]

Am Tangentenursprung herrscht bei vektorieller Betrachtung ein Gleichgewicht zwischen den Ober- und Grenzflächenspannungen der drei Phasen Polymer/Substrat (σ_{sl}), Polymer/Gasatmosphäre (σ_l) und Substrat/Gasatmosphäre (σ_s). Die Ausprägung der Benetzung wird durch die energetischen Verhältnisse des Gesamtsystems bestimmt, dessen wesentliche Größen nachfolgend erläutert werden. [59]

Die Benetzung des Substrats durch eine Flüssigkeit kann auf verschiedene Arten erfolgen (siehe Tabelle 7). Dabei wird die Ausprägung des Kontaktwinkels Θ durch das an die Flüssigkeit anliegende vektorielle Kräftegleichgewicht bestimmt. Der Fall, dass überhaupt keine Benetzung ($\Theta = 180^\circ$, keine Adhäsion) einsetzt, ist jedoch rein theoretischer Natur, da immer eine geringe Adhäsion wirkt. [59]

3.1 Das Flexodruck-Verfahren zur Herstellung konditionierter Foliensubstrate und die daraus resultierende Manipulation der Oberflächenphysik

Tabelle 7: Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf Festkörpern. [60, 61]

Benetzung	„keine“	„definierte“	„vollständige“
Randwinkel	$\Theta \rightarrow 180^\circ$	$180^\circ > \Theta > 0^\circ$	$\Theta \rightarrow 0^\circ$
Visualisierung			
			festes Substrat

Zudem nimmt der Kontaktwinkel eines Flüssigkeitstropfens bei gleichmäßiger Erwärmung unter Erhaltung der Symmetrie ab. Dies ist darin begründet, dass die Oberflächenspannung mit steigender Temperatur sinkt. Das Benetzungsverhalten wird mathematisch durch die Young-Gleichung (16) beschrieben: [59, 62]

$$\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cos \Theta \quad (16)$$

In der Klebstofftechnik wird die Spreitung (spontane Ausbreitung einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche ohne äußere Beeinflussung, wie beispielsweise Druck, Walzen etc.) des Klebstoffs auf dem Substrat angestrebt. Die vollständige Spreitung wird bei $\Theta = 0^\circ$, entsprechend $\cos 0^\circ = 1$, erzielt. Soll eine Flüssigkeit ein festes Substrat mit möglichst kleinem Randwinkel benetzen, muss seine Oberflächenspannung geringer als die Oberflächenenergie des Substrats sein ($\sigma_l < \sigma_s$). Ist hingegen die Grenzflächenenergie zwischen Substrat und Flüssigkeit größer als die Oberflächenenergie zwischen Substrat und Gasatmosphäre, tritt nur eine geringe Benetzung ein ($\sigma_s < \sigma_{sl} \rightarrow \cos \Theta < 0 \rightarrow \Theta > 90^\circ$). [59, 60]

Für die im OPTAVER-Verfahren eingesetzten Polymere (Actega und J+S) ergibt sich aus dem messtechnisch ermittelten, maximalen Kontaktwinkel von $61,4^\circ$ ein maximales Aspektverhältnis von 0,297. Oberhalb dieser Grenze werden die aufgetragenen Konditionierungslinien vom Kernmaterial geflutet. Hierdurch kommt es zu parasitären Erscheinungen wie Tropfenbildung („Bulging“), Materialübertrag auf die Außenseite der Konditionierung und direkten flächigen Kontakt zwischen Kern und Konditionierung. Die Konditionierung würde in diesem Fall als Mantelmaterial fungieren und somit zwangsläufig zu einer Beeinflussung der optischen Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems führen. [P6]

3.2 Das Aerosol-Jet-Drucksystem zur Herstellung des Wellenleiters

Die additive Herstellung von lichtleitenden Strukturen auf dreidimensionalen Baugruppen ist bislang unbekannt und nicht erforscht. Das Aerosol-Jet-Printing® der Firma Optomec ist ein vielversprechendes Verfahren für diesen Einsatzfall.

Hierbei handelt es sich um einen amerikanischen Anlagenhersteller, weswegen in der Folge an vielen Stellen auf nordamerikanische (United States, US-) Maßeinheiten zurückgegriffen wird. Dies soll es späteren Anwendern erleichtern die hier geleistete Forschungsarbeit ohne Umrechnung reproduzieren und vergleichen zu können. Beim ersten Erscheinen im Text wird jedoch der Vollständigkeit halber stets auch die jeweilige SI-Einheit angegeben.

Ähnlich wie das Inkjet-Verfahren ist es ein masken- und berührungsloses Druckverfahren. Die für den Druckprozess notwendige Prozesskette, Hard- und Software gliedert sich in: [63, 64]

- 1) Erstellung des Drucklayouts für die jeweilige Substratoberfläche in der Neotech Motion 3D Software.
- 2) Import, Ausführung und Maschinensteuerung in die Remote Control Software.
- 3) Prozessgassteuerung und Regelung in der Optomec KEWA Process Control Software.
- 4) Additiver Fertigungsschritt an einer rechnergestützten numerisch gesteuerten (Computerized Numerical Control, CNC-) 5-Achs-Anlage mit eingebautem AJ-Druckkopf.

Auf die Punkte 1) und 2) wird im Kapitel 3.2.1 eingegangen. Im Abschnitt 3.2.2 erfolgt die Beschreibung der Punkte 3) und 4), wobei mit letzterem der eigentliche additive Fertigungsschritt verbunden ist.

3.2.1 CAD-CAM-Kette und Maschinensteuerung des Aerosol-Jet-Druckers

Für die Planung, Konstruktion und spätere Realisierung von Objekten und des jeweiligen Leiterbahnlayouts wird die Software Motion 3D der Firma Neotech Advanced Manufacturing Technologies (AMT) GmbH verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Computer-Aided Design- (CAD-)/Computer-Aided Manufacturing- (CAM-) System, welches speziell für das Bedrucken von dreidimensionalen Oberflächen konfiguriert wurde und somit

auch das Routing über unebene Strukturen hinweg erlaubt. Aus den geometrischen Daten der erstellten Komponenten generiert das Programm einen Numerical Control- (NC-) Maschinencode, welcher an die Maschinensteuersoftware Remote Control weitergegeben werden kann, um anschließend die 5-Achs-Bewegungsplattform der Aerosol-Jet-Maschine zu steuern.

Für die additive Herstellung von POW im OPTAVER-Prozess wird das Layout des PMMA-Substrats erstellt. Anschließend erfolgt die Eingabe der Düsenparameter. Im nächsten Schritt wird auf dem CAD-Modell ein einheitlicher Startpunkt, der sog. Work Point Zero (WPZ), festgelegt. Dieser wird an den Startpunkt der zu generierenden Leiterbahn gelegt. Der WPZ dient grundsätzlich als Referenzpunkt für das später erzeugte NC-Programm und wird automatisch in den Maschinencode integriert.

Im Druckprozess wird dieser Punkt von der Düse angefahren, der Shutter geöffnet und Material auf das Substrat aufgebracht. Im Anschluss an die Definition des Substrats sowie des Leiterbahnlayouts wird der Post Processor bestimmt und die erstellten Daten in einen NC-Code transferiert, welcher an die Steuerungssoftware übergeben werden kann.

Die Remote Software führt das Programm aus und steuert die gewünschten Bewegungen zwischen Düse und Substrat. Bild 16 stellt das geöffnete Programmfenster mit seinen wichtigsten Bestandteilen dar.

Die Befehlsleiste beinhaltet alle Funktionen zum Steuern und Ausführen des Programms. Die in das Programm geladenen NC-Daten erscheinen als ausführbarer Code am linken Bildschirmrand. In der unteren Leiste sind die aktuellen Maschinenkoordinaten dargestellt. Der WPZ kann in der Software beliebig verändert und gespeichert werden. So lassen sich mehrere WPZs für die Düseneinheit und die integrierte Universal Serial Bus (USB-) Kamera festlegen. Die Düseneinheit bzw. die Kamera können ebenfalls manuell gesteuert werden. Dabei lässt sich der Druckkopf in X-, Y- und Z-Richtung frei bewegen.

Für den OPTAVER-Prozess ist es zwingend notwendig, das flüssige Polymer präzise zwischen die beiden Konditionierungslinien zu drucken. Zwei wesentliche Faktoren erschweren dies jedoch, weshalb im aktuellen Systemaufbau kein vollautomatisierter Druckprozess mit festem WPZ möglich ist:

- 1) Geometrische Abweichungen der Konditionierung (Parallelität, Welligkeit, Defekte) auf den PMMA-Folien
- 2) Ein- und Ausbau der Druckkopfkomponenten des AJ-Druckers

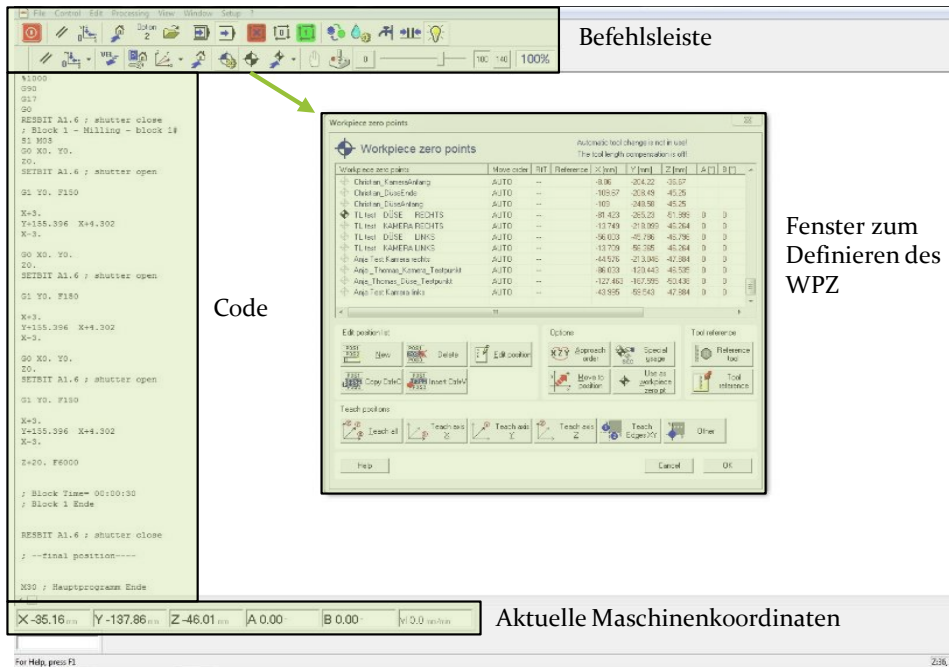


Bild 16: Überblick über die Remote Control Software für die Steuerung der AJ-Anlage.

Da die Konditionierung der Foliensubstrate eine Fremdleistung darstellt, kann hierauf kein Einfluss genommen werden. Zur Reinigung und Lagerung werden die Systemkomponenten nach jeder Nutzung demontiert.

Durch den erneuten Einbau bei Inbetriebnahme entstehen geringe, jedoch messbare Abweichungen zwischen den Koordinaten der Düsenspitze, aus welcher der Aerosol-Strahl austritt, und dem eingebauten Kameramodul, mit dessen Hilfe die Druckposition zwischen den Konditionierungslinien und damit verbunden der WPZ identifiziert wird.

Bei Abständen zwischen den Konditionierungslinien von 100 µm bis 500 µm und Düsendurchmessern von 200 µm bis 300 µm können schon geringste Abweichungen zum Ausschuss führen. Um die Eingabe des WPZ zu erleichtern und den Grad der Automatisierung des Drucks zu erhöhen, wurde das in Bild 17 illustrierte Excel-Tool mit zugehöriger Anleitung entwickelt. [S1]

Bild 17: Excel Tool zur Druckkoordinatenberechnung. [S1]

Für die Ermittlung der notwendigen Koordinaten wird dabei wie folgt vorgefahren:

- 1) Substrat auf dem Maschinenbrett fixieren.
- 2) Kamera auf den gewünschten Startpunkt des Drucks zwischen die Konditionierungslinien bewegen.
- 3) Koordinaten in der Remote Software durch den Befehl *teach all* bestätigen und diese als Anfangspunkt im Excel-Tool eintragen.
- 4) Position als neuen Referenzpunkt auswählen.
- 5) Kamera an den Endpunkt bewegen und wiederum in der Remote Software bestätigen.
- 6) Versatz der Kamera zur Düsen Spitze ermitteln: Hierfür wird die Düse auf eine beliebige freie Fläche bewegt, ein Punkt gedruckt, die X- und Y-Koordinaten im Excel-Tool unter Versatz Düse eingetragen, der Punkt mit der Kamera angefahren, die Koordinaten unter Versatz Kamera eingetragen und gespeichert.
- 7) Die nun ausgegebenen berechneten Werte für den Anfangspunkt der Düse als neuen Referenzpunkt (WPZ) speichern und nacheinander in das Hauptprogramm eintragen.
- 8) Abschließend die gewünschte Vorschubgeschwindigkeit eintragen.

3.2.2 Der Aerosol-Jet-Druckprozess

Das Schichtmaterial, nachfolgend Tinte genannt, liegt im flüssigen Aggregatzustand vor und wird pneumatisch, für Viskositäten von 1 cP ($1 \text{ P} = 0,1 \text{ (kg/m}^2\text{s)} = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) bis 1000 cP, oder durch Ultraschall, für Tintenviskositäten von 0,5 cP bis 20 cP, zerstäubt. Da die ultraschallbasierte Zerstäubung für die in dieser Arbeit verwendeten flüssigen Polymerwerk-

stoffe aufgrund der zu hohen Viskositäten (>100 cP) nicht verwendet werden kann, wird darauf nicht im Detail eingegangen. Lediglich im Rahmen der Tintenauswahl werden die Kriterien für die Wahl der richtigen Zerstäubungsart vorgestellt. [65, 66]

Eine weitere maschinenseitige Differenzierung wird in Bezug auf den verwendeten Düsendurchmesser getroffen. Es wird zwischen Wide Nozzle und Fine Feature unterschieden. Unter Wide Nozzle werden hierbei Düsendurchmesser oberhalb von $300\text{ }\mu\text{m}$ bezeichnet, welche aktuell zumeist aus metallischen Werkstoffen gefertigt werden. Fine Feature Düsen bestehen aus Keramik und sind von $10\text{ }\mu\text{m}$ bis $300\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser verfügbar. [65, 66]

Im OPTAVER-Verfahren muss möglichst präzise zwischen die aufgetragenen Konditionierungslinien, welche Abstände von $100\text{ }\mu\text{m}$ bis $500\text{ }\mu\text{m}$ aufweisen, gedruckt werden, weshalb hier keramische Düsen mit einem Durchmesser von $250\text{ }\mu\text{m}$ bis $300\text{ }\mu\text{m}$ zum Einsatz kommen. Unterhalb dieses Durchmessers wirken sich prozessbedingte Unregelmäßigkeiten, wie schwankende Gasströme, in größerem Maße auf die austretende Materialmenge aus und führen in den meisten Fällen zu einer Verstopfung des Gesamtsystems. Das verwendete hochviskose Polymermaterial ist darüber hinaus mit Düsendurchmessern unter $250\text{ }\mu\text{m}$ nur bei hohen Vorheiztemperaturen prozessierbar. [65, 66]

Aufbau der Aerosol-Jet-Anlage

Der Anlagenaufbau sowie eine Prinzipdarstellung der pneumatischen Aerosol-Generierung sind in Bild 18 dargestellt. Im Tintenvorratsbehälter, welcher über eine im direkten Kontakt befindliche Heizmanschette temperiert werden kann, liegt das flüssige Ausgangsmaterial vor (1). Dieses wird durch Zugabe des Zerstäubergases (ZG), auch Prozess- oder Atomizer-Gas genannt, in feine Mikrotropfen (Tropfendurchmesser zwischen $1\text{ }\mu\text{m}$ und $5\text{ }\mu\text{m}$) übersetzt (2). Das Funktionsprinzip des pneumatischen Zerstäubers beruht auf dem Bernoulli-Effekt bzw. Venturi-Prinzip [67]. Dabei wird ein Trägergas, in diesem Fall Stickstoff, mit hoher Geschwindigkeit durch einen engen Kanal geleitet. Der Kanal führt über ein Steigrohr hinweg, welches 1 mm bis 5 mm in die Tinte eintaucht und etwa 2 cm hoch ist (3). [67]

3.2 Das Aerosol-Jet-Drucksystem zur Herstellung des Wellenleiters

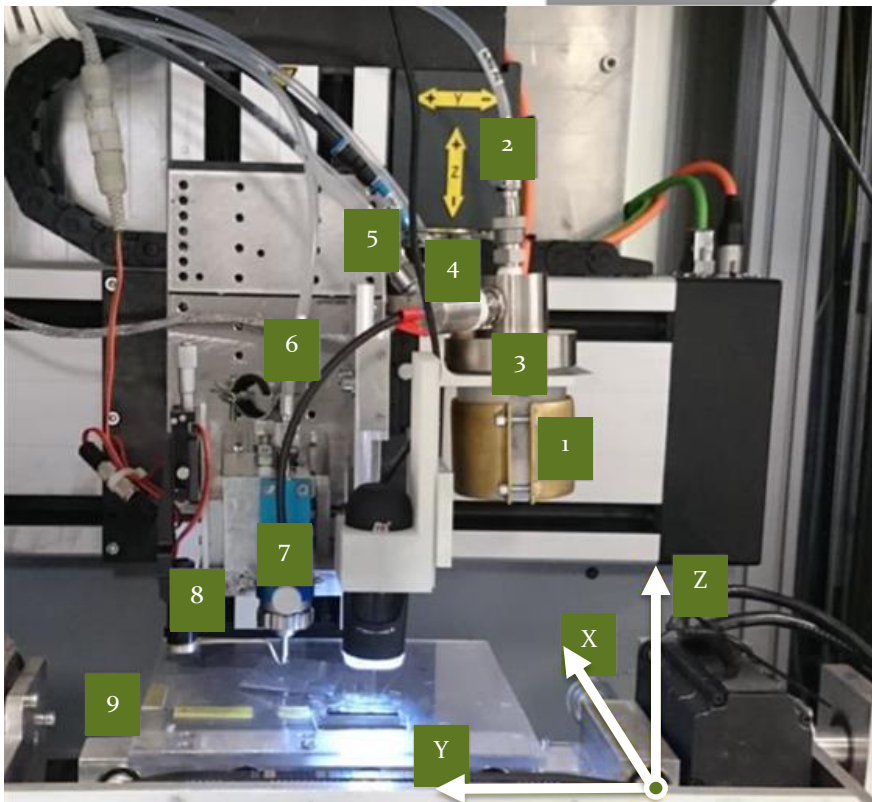
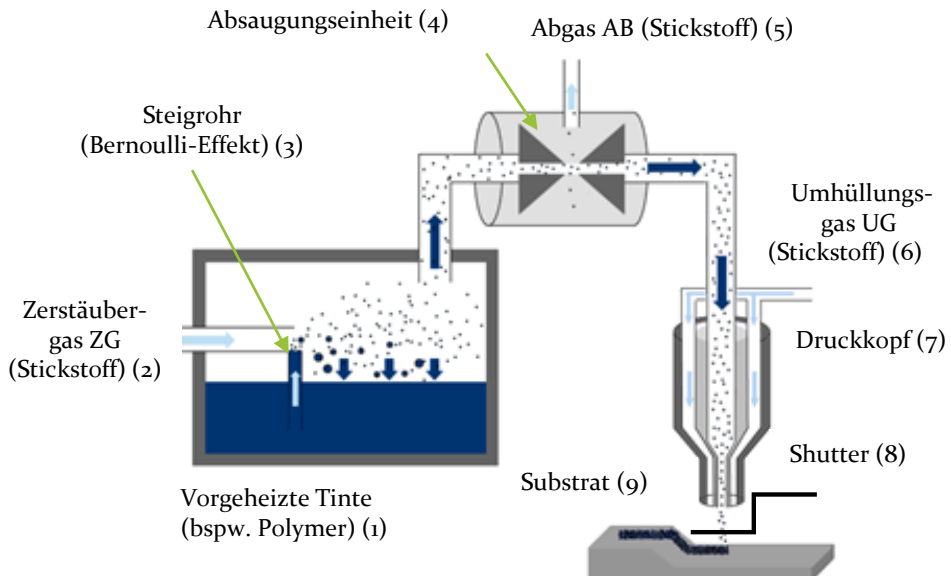


Bild 18: Schematische (oben) und reale (unten) Darstellung des Aerosol-Jet-Druckverfahrens mit pneumatischer Zerstäubung. [68, P4]

Durch den entstehenden Sog wird Tinte aus dem Behälter nach oben gezogen und mit hoher Geschwindigkeit in feine Tropfen geschert. Tropfen mit zu großer Masse fallen in das Tintenreservoir zurück, während kleinere Tropfen im Trägergas dispergiert bleiben und über den Auslass zu einer Absaugungs- oder Homogenisierungseinheit (Virtual Impactor) gelangen (4). Die Absaugungseinheit hat die Aufgabe, das überschüssige Trägergas aus dem Aerosol zu extrahieren und damit den Gasdurchfluss auf ein für den Druckkopf geeignetes Maß zu reduzieren. Die Einheit selbst besteht aus zwei kegelförmig zulaufenden Engstellen, die mit geringem Abstand spiegelbildlich zueinander angeordnet sind. In dem dazwischenliegenden Hohlraum wird durch einen zweiten Gasstrom, dem Abgas (AB) oder auch Exhaust Gas, welcher einen negativen Druck aufweist, der Zerstäubergasstrom reduziert (5). Das Gas-Tropfengemisch strömt durch die erste Verengung hindurch und wird aufgrund der Durchmesser verringering beschleunigt (Massenerhaltung). Beim Passieren des Spalts zwischen den beiden Konen wird das überschüssige Trägergas zusammen mit Tropfen, deren Impuls zu gering ist, um auf ihrer ursprünglichen Bahn zu verweilen, vom Hauptstrom getrennt. Nach dieser Reduzierung bleiben, je nach Prozessführung, etwa 60 Standardkubikzentimeter (sccm) bis 100 sccm (1 sccm = 1 ccm/min) Aerosol-Durchfluss (AS), zusammen mit Tropfen, deren Durchmesser im Bereich von 2 μm und 4 μm liegt, erhalten. [65, 66]

Nach der Homogenisierung wird das Aerosol zum Druckkopf (7) geleitet. Dieser besteht wiederum aus zwei konisch zulaufenden Einsätzen, die den Aerosol-Strahl erneut beschleunigen und mit Umhüllungsgas (UG), auch Schutzgas oder Sheath Gas (Stickstoff) genannt, umgeben (6). Dieses verhindert den Kontakt zwischen Aerosol und Düsenwandung im Druckkopf, wodurch die Düse weniger schnell verschmutzt, und fokussiert den Aerosol-Strahl nach dem Austritt aus der Düse zum Substrat hin. Das aus der Düsenspitze austretende Aerosol wird als Gesamtdurchfluss (GF) bezeichnet. [65, 66]

Da es sich beim Aerosol-Jet-Printing um einen kontinuierlichen Prozess handelt, wird nach Inbetriebnahme der Gaszufuhr der Anlage so lange Material gedruckt, bis diese wieder abgeschaltet wird. Die Anlage benötigt hierbei eine etwa fünfminütige Anlaufzeit, bis zerstäubtes Material aus der Düsenspitze austritt. Zusätzlich sollten die kritischen Systemkomponenten (Virtual Impactor; Verbindungsschläuche, Druckkopf) vor jedem erneuten Hochfahren der Gasströme gereinigt werden, um vor allem die sich während des Ausschaltens absetzenden Materialtropfen aufgrund der schnell

abfallenden Gasdruckverhältnisse zu entfernen. Verunreinigungen im System führen zwangsläufig zu schwankenden Drücken und in der Folge zu unterschiedlichen Massedurchflüssen. [65, 66]

Um den Aerosol-Strahl bei Bedarf dennoch unterbrechen zu können, ohne die Gaszufuhr abschalten zu müssen und den Gesamtprozess zu stoppen, ist unterhalb des Druckkopfs ein Metallbügel (Shutter) montiert, welcher ohne die Düsen Spitze zu berühren, den Aerosol-Strahl für kurze Zeit unterbrechen kann und das in dieser Zeit austretende Material auffängt (8). Dieser ist über eine Schraube höhenverstellbar und kann so auch für verschiedene Düsengeometrien verwendet werden. Die Ansprechzeit, die dieser benötigt, um zwischen seinen beiden logischen Zuständen (offen/geschlossen) zu schalten, beträgt ca. 2 ms. Nach Austritt aus der Düsen Spitze erreicht der Tropfenstrahl das jeweilige Substratmaterial (9). [65, 66]

In Bild 19 sind die auch im folgenden verwendeten Abkürzungen für die jeweiligen Gasflüsse noch einmal kompakt in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Mit dieser einfachen Übersicht sollen mögliche Verwechslungen ausgeschlossen und somit eine höhere Verständlichkeit erzielt werden.

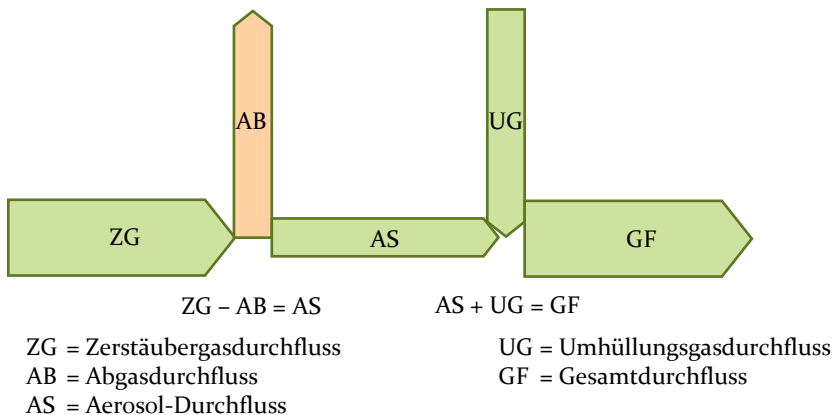


Bild 19: Schematische Darstellung der Gasflüsse im Aerosol-Jet-Druck mit den jeweils verwendeten Abkürzungen.

Steuerungssoftware KEWA Process Control

Zur Steuerung und Kontrolle der drei Gasströme wird die Software KEWA Process Control der Firma Optomec verwendet. Hier wird der eigentliche Druckprozess durch Aktivierung der Gaszufuhr in Gang gesetzt. Die Einschaltreihenfolge der Gasströme ist für eine stabile Prozessführung nicht unerheblich: [65, 66]

Als Erstes ist das Umhüllungsgas einzuschalten. Anschließend wird das Abgas aktiviert, bevor das Zerstäubergas zugeschaltet wird. Wichtigster Punkt ist hierbei, dass das Zerstäubergas zuletzt eingeschaltet wird, da dieses für die Aerosol-Bildung verantwortlich ist und bei falscher Einschaltreihenfolge zwangsläufig zu einer Kontamination des Gesamtsystems durch sich ablagernde Tropfen führt. [65, 66]

Weiterhin besteht die Gefahr der Beschädigung der Düsenspitze, wenn das eingeschaltete Zerstäubergas ohne Reduzierung mit hohem Druck in den Druckkopf gelangt. Zusätzlich wird die Düsenspitze beim Einschalten des Umhüllungsgases von evtl. vorhandenen Resttropfen befreit. Beim Herunterfahren der Gaszufuhr ist in umgekehrter Reihenfolge zu verfahren. [65, 66]

In der Software kann zwischen Wide Nozzle und Fine Feature, je nach verwendeter Düse, unterschieden werden. Einstellbar sind hierbei Werte bis 200 sccm für UG und jeweils 2000 sccm für AB und ZG. Gleichzeitig überwacht die Software im Livebild die aktuell gemessenen Druckverhältnisse in der Anlage. Hier besteht die Möglichkeit, auf plötzliche Schwankungen aufgrund von Agglomerationen der Aerosol-Tropfen innerhalb der Systemkomponenten oder Druckverlusten zu reagieren und den Prozess bei Bedarf zu unterbrechen. [65, 66]

Grundlagen des Druckens

Die Breite des Aerosol-Strahls, und damit die spätere Linienbreite der aufgebrachten Strukturen, wird maßgeblich vom Verhältnis zwischen Umhüllungsgas- und Aerosol-Durchfluss im Druckkopf beeinflusst. Je höher der Anteil des Umhüllungsgases desto stärker wird der Aerosol-Strahl komprimiert. Auf diese Weise lässt sich der austretende Strahl auf bis zu 10 % des Düsendurchmessers reduzieren, bevor er vollständig unterbrochen wird. [65, 66, 69, P7]

Ein zweiter wichtiger Faktor für die Linienbreite der aufgedruckten Bahn ist der Abstand zwischen Düse und Substratoberfläche. Je größer die Distanz desto breiter werden die Bahnen. Bei zu geringer Distanz (meist unter 2 mm, jedoch wiederum abhängig von den gewählten Gasdruckeinstellungen) ist die Impulskraft des Aerosol-Strahls so hoch, dass die Leiterbahnen auseinandergedrückt werden und anstelle eines gleichmäßigen Leiterbahnprofils ein M-förmiger Querschnitt der Bahnen entsteht (siehe Bild 20). [65, 66, 69, P7]

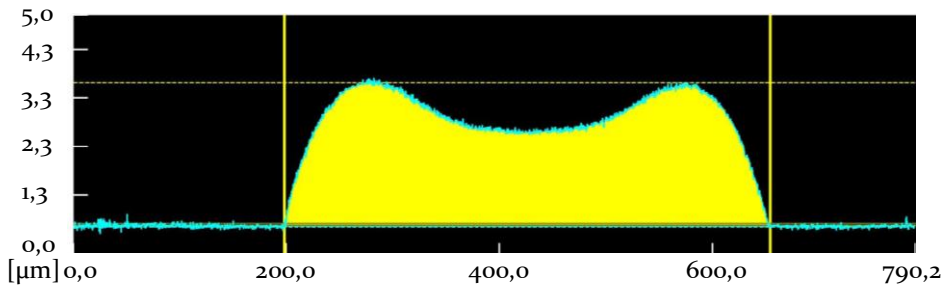


Bild 20: Laser-scanning-mikroskopische Aufnahme eines M-förmigen Leiterbahnprofils (Tinte: PolyTec VP 4641-1; Substrat: Polycarbonat). [P7]

Letztlich kommt es hier zu einem klassischen Freistrah, beim Austritt aus der Düse bildet die Umgebungsluft eine Grenzschicht zwischen dem Strahl und dem ruhenden Fluid. Die Scherung führt zu einem Impulsaustausch über die Grenzfläche, also senkrecht zur Strahlrichtung. Die ruhende Luft wird dadurch beschleunigt und das Fluid im Strahl abgebremst. Somit kommt es zur Aufweitung des Strahls. Mit zunehmendem Abstand der Düse zum Substrat verringert sich der Impuls, den die Aerosol-Tropfen erfahren, bis sie schließlich aus ihrer ursprünglich parallel verlaufenden Bahn abdriften. Da der Impuls eine Funktion von Masse und Geschwindigkeit ist, werden kleine Tropfen schneller aus der Bahn herausgetragen. Dieser Effekt wird Overspray genannt und ist eine parasitäre Erscheinung, welche es zu vermeiden gilt. Mögliche Problemstellungen, welche hierdurch entstehen können, sind Kurzschlüsse bei der Verwendung metallischer Tinten und die Beeinträchtigung der optischen Güte durch sich mit dem Kern verbindende Tropfen bei polymeren Tinten. Durch Anpassung der Prozessparameter und des Düsenabstands kann dieser Effekt verringert werden. [65, 66, 69]

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Substrat-Tinten-Kombinationen getestet [70]. Hauptanwendungsgebiet des Verfahrens ist aktuell das Drucken von Antennenstrukturen für Mobiltelefone. Doch auch im Bereich der dreidimensionalen Leiterbahnstrukturierung, zur Verbindung von Chipstapeln oder, wie in dieser Arbeit beschrieben, in der Optoelektronik wird das Aerosol-Verfahren verwendet. Entscheidend für jeden einzelnen Anwendungsfall ist allerdings die Auswahl der jeweiligen Drucktinte. Aufgrund der herstellerabhängigen Zusammensetzung jeder Tinte und den anwendungsspezifischen Anforderungen an die abzuschcheidenden Bahnen (geforderte Breite, Schichtdicke etc.), muss der Zerstäuber-, der Abgas- und der Umhüllungsgasdurchfluss immer wieder neu ermittelt werden. Bei pneumatischer Vernebelung besitzt jedes Druckmedium seinen eigenen

Zerstäubungspunkt, welcher individuell eingestellt werden muss, um einen stabilen Aerosol-Strom zu ermöglichen. Ist der erforderliche Aerosol-Durchfluss gefunden, muss die Menge des Umhüllungsgasstroms darauf abgestimmt werden. Um die Prozesseinstellungen effektiv zu optimieren, gibt Optomec einige Empfehlungen, mit deren Hilfe das Prozessfenster des verwendeten Druckmediums eingegrenzt werden kann. Diese sind in Bild 21 in Form eines Leitfadens zusammengetragen. [68, 69, 70, 71, P1]

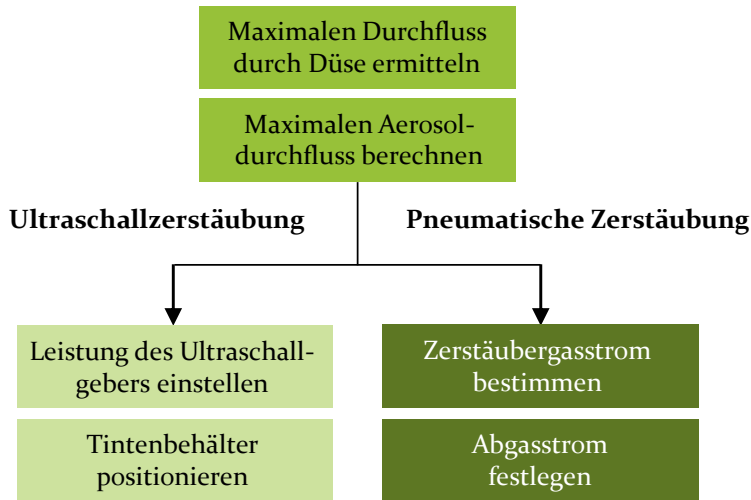


Bild 21: Leitfaden zur Druckparameteridentifizierung neuer Tinten. [S2]

Das in Bild 22 dargestellte Prozessfenster einer Tinte wird durch den minimal notwendigen AS zur Schichterzeugung und den maximal erlaubten Düsendruck der Aerosol-Jet-Anlage gebildet. Die Düsen des Druckkopfs sollten während des Betriebs nicht über ein Pfund pro Quadratzoll (psi), entsprechend 68,94 mbar, belastet werden. Bei einem höheren Druck besteht die Gefahr, dass die Düse von innen beschädigt wird. Daher muss zunächst definiert werden, bei wie viel Standardkubikzentimeter Durchfluss dieser Druck erreicht ist. Zu diesem Zweck werden zunächst alle Durchflussregler in der KEWA-Steuersoftware der Anlage auf null gesetzt und danach der Durchfluss des UG so lange erhöht, bis der Drucksensor der Düse ca. 1 psi anzeigt. Es gilt folgender formaler, die Gasströme betreffender, Zusammenhang: [71]

$$GF = UG + AS \text{ mit } UG \geq AS \quad (17)$$

Während des Druckprozesses summieren sich UG und AS und bilden den Gesamtdurchfluss durch den Druckkopf. Dabei sollte UG immer größer bis maximal gleich AS sein, andernfalls kann UG den Aerosol-Strahl nicht vollständig umhüllen und der Aerosol-Strahl kommt in Kontakt mit der Düsenwandung, welches eine Verschmutzung der Düse oder Blockade des Druckkopfs zur Folge hat. Aus dieser Bedingung ergibt sich eine Höchstgrenze für AS von $0,5\ GF$. [71]

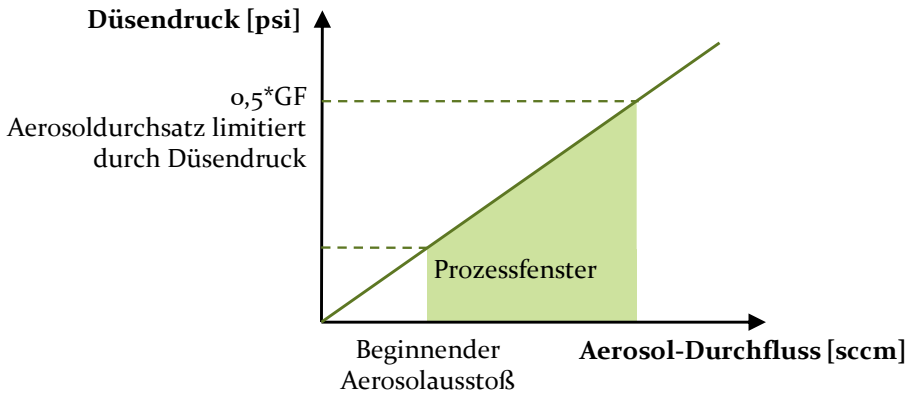


Bild 22: Graphische Darstellung des allgemeinen Prozessfensters einer im AJ-Verfahren prozessierbaren Tinte. [S2]

Die Untergrenze des Prozessfensters wird durch den Punkt beschrieben, bei dem ZG gerade ausreicht, um ein Aerosol zu erzeugen bzw. es zum Druckkopf zu transportieren. Bei pneumatischer Zerstäubung berechnet sich AS aus der Differenz zwischen ZG und AB . [71]

$$AS = ZG - AB \text{ mit } AB < ZG \quad (18)$$

ZG muss kontinuierlich erhöht werden, bis die Kraft des Gases ausreicht, um erste Tröpfchen aus der Tinte abzuscheren. Dieser Punkt ist erreicht, wenn an der Wandung des Tintenbehälters erste Tröpfchen in Form eines feinen Nebels sichtbar werden. Danach nimmt die Zerstäubungsrate progressiv mit steigendem Zerstäuberdurchfluss zu (siehe Bild 23). Für eine ausreichende Aerosol-Bildung ist es empfehlenswert, die Durchflussmenge der beginnenden Zerstäubung um mindestens 150 sccm zu überschreiten. AB muss stets kleiner ZG sein, um AS über den Virtual Impactor hinaus zu gewährleisten, im gegensätzlichen Fall würde das gesamte Aerosol abgesaugt werden. [71]

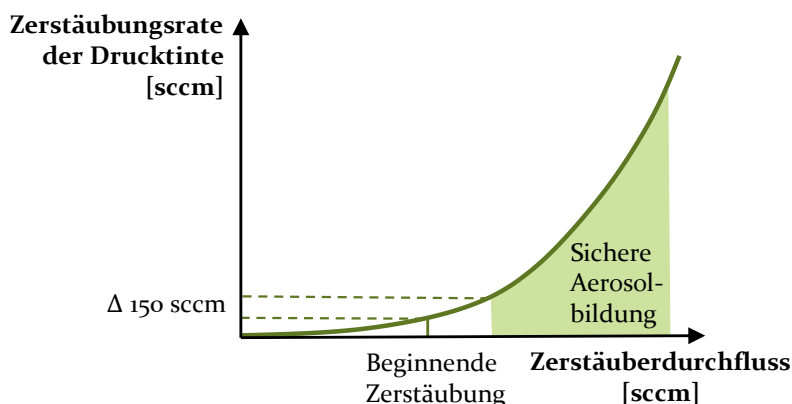


Bild 23: Zerstäubungsrate in Abhängigkeit vom Zerstäuberdurchfluss. [S2]

Im Aerosol-Jet-Verfahren verarbeitbare Drucktinten

Als Tinte für die Aerosol-Jet-Anlage können Flüssigkeiten, Lösungen und Suspensionen mit einer Viskosität zwischen 1 - 1000 cP und Partikelgrößen bis 500 nm verwendet werden. Das Spektrum erstreckt sich dabei von leitfähigen Tinten mit Kupfer-, Silber- oder Palladiumnanopartikeln zum Druck elektrisch leitfähiger Strukturen, über isolierende Polymertinten, bis hin zu Biomaterialien. Die Druckmaterialien bestehen dabei aus einem Gemisch von funktionalen Ausgangsstoffen (Silber, Palladium, Polymer etc.), Lösungsmitteln und Additiven (siehe Bild 24). Letztere werden von den Tintenherstellern zugegeben, um gezielt die Eigenschaften der Schichtwerkstoffe zu verändern. [65, 66]

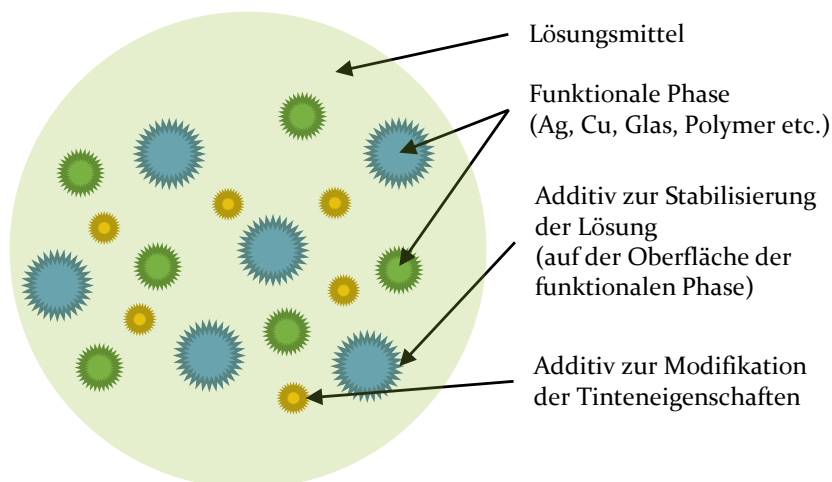


Bild 24: Schematische Darstellung der Zusammensetzung von im Aerosol-Jet-Verfahren verarbeitbarer Drucktinten. [18]

Tenside wie Zonyl FS-300 können beispielsweise dazu beitragen, die Benetzungsfähigkeit zu verbessern, andere Polymeradditive können die Haftung auf einigen Substraten unterstützen. Dabei muss stets die Verträglichkeit des Substrats mit den eingesetzten Additiven gewährleistet sein, um schädliche Einflüsse, wie etwa ungewollte chemische Reaktionen, zu vermeiden. Tinten, die direkt für das Aerosol-Jet-Verfahren entwickelt wurden, sind in der Regel ohne weitere Modifikation einsetzbar. Bei Bedarf lassen sich die Formulierungen mit Lösungsmittel weiter verdünnen, um so die Viskosität oder Partikelkonzentration zu senken und die Zerstäubung zu verbessern. Dies kann beispielsweise dann notwendig werden, wenn sich durch längere Nutzung die Konzentration der Suspension verändert hat. Außerdem kann die Zugabe eines zweiten Lösungsmittels helfen, die Aerosol-Erzeugung bei Tinten mit einem leicht flüchtigen Lösungsmittel zu stabilisieren. [71]

Die Wahl der richtigen Zerstäubungsart, pneumatisch oder per Ultraschall, ist entscheidend für das Druckergebnis. Die Entscheidung hängt maßgeblich von der Viskosität der Tinte, den Partikelgrößen der enthaltenen Feststoffe und dem Dampfdruck des Lösungsmittels ab. Zur Ultraschallzerstäubung sind Feststoffpartikelgrößen unter 100 nm nötig. Optimal sind Partikel, die 50 nm nicht überschreiten. Sind in der Tinte zu große Partikel enthalten, bleiben diese im Tintenbehälter zurück und verändern über die Zeit die Viskosität der Tinte und der Prozess wird instabil. [71]

Als Indikator für die Flüchtigkeit eines Lösungsmittels kann dabei dessen Dampfdruck herangezogen werden, da Verdampfungsrate und Dampfdruck korrelieren. Um mit dem pneumatischen Zerstäuber einen möglichst stabilen Prozess zu generieren, sollten Lösungsmittel mit einem Dampfdruck $< 0,1$ mmHg bevorzugt werden, wie Ethylenglykol, Terpeneol oder N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP). Die Aerosol-Bildung über Ultraschall eignet sich hingegen für Lösungsmittel mit einem höheren Dampfdruck. Tabelle 8 fasst abschließend alle Anforderungen der beiden Zerstäuber zusammen. [67, 71]

Tabelle 8: Übersicht über die Rahmenbedingungen zur Auswahl der jeweiligen Zerstäubungsart. [65, 66]

Pneumatische Zerstäubung	Ultraschallzerstäubung
Lösungsmittel mit niedrigem Dampfdruck ($< 0,1$ mmHg)	Lösungsmittel mit hohem Dampfdruck
hohe Viskosität (1 - 1000 cP)	geringe Viskosität (0,5 - 20 cP)
Feststoffpartikelgröße > 50 nm	Feststoffpartikelgröße < 50 nm

3.2.3 Materialauswahl auf Basis der verwendeten Herstellungsverfahren im OPTAVER-Prozess

Essentiell für die additive Herstellung von Lichtwellenleitern mit optischer Güte ist die Auswahl und damit verbunden die Kompatibilität der eingesetzten Materialien. Der Aufbau ohne aufgebrachte Mantellage eines POWs ist in Bild 25 dargestellt. Generell ist darauf zu achten, dass die einzelnen Polymere möglichst passend (Oberflächenphysik, Maschinenanforderungen, Optik) aufeinander abgestimmt sind.

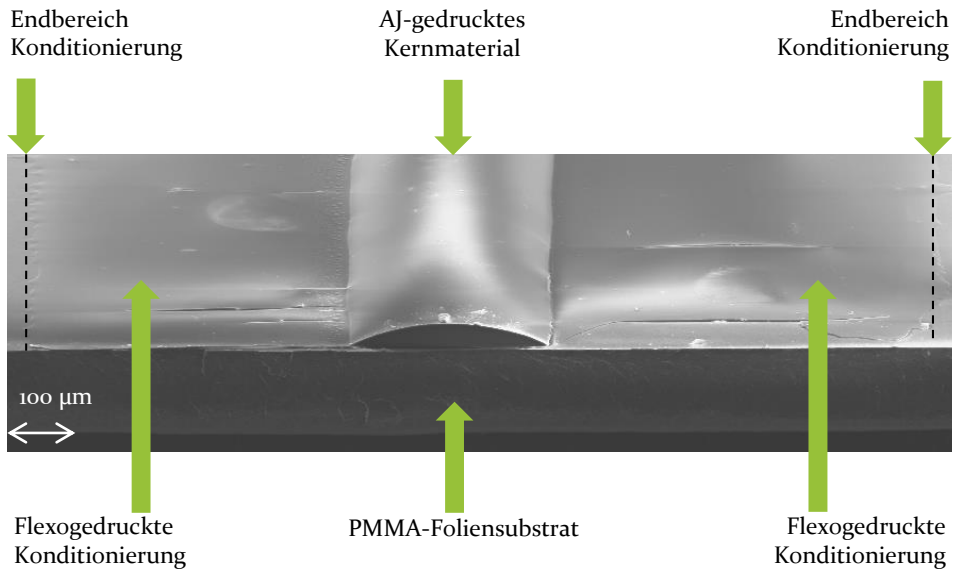


Bild 25: REM-Aufnahme eines im OPTAVER-Prozess hergestellten POW. [P8]

Das Substratmaterial dient im OPTAVER-Prozess zugleich als unterer Mantel der aufgebrachten Kernstruktur, weshalb bei der Materialauswahl nicht nur mechanische, sondern auch optische Kennwerte zu beachten sind. In Bild 26 ist ein Wechselwirkungsdiagramm für die Materialauswahl dargestellt, in welchem die einzelnen Materialspezifikationen kurz zusammengefasst sind.

Auf das gewählte Substratmaterial wird im ersten Prozessschritt die Konditionierung aufgebracht. Hier gilt es Materialien zu identifizieren, welche aufgrund Ihrer Eigenschaften, wie bspw. Viskosität, im Flexodruck-Verfahren verarbeitbar sind. Diese müssen basierend auf deren Oberflächenspannung im flüssigen Zustand eine ausreichende Benetzung des Substratmaterials erlauben und nach dem Aushärten eine möglichst niedrige Oberflächenenergie besitzen, um den Kontaktwinkel des Kernmaterials zu maximieren. Bei der Prozessführung ist zudem auf eine hohe Genauigkeit,

verbunden mit einer resultierenden möglichst geringen Randwelligkeit, zu achten.

Der im Aerosol-Jet-Verfahren aufgebrauchte Kern muss einen höheren Brechungsindex als das verwendete Substrat (unterer Mantel) und der aufgebrauchte Mantel besitzen, um die Totalreflexion und somit die optische Leitfähigkeit zu gewährleisten. Die Viskosität des Materials muss nach optionaler Temperierung unter 1000 cP liegen, um pneumatisch zerstäubt werden zu können und die ausgehärtete Kernstruktur sollte Oberflächenrauheiten unter 10 % der eingekoppelten Lichtwellenlänge enthalten, um Streuverluste so gering wie möglich zu halten. Die exakte Abstimmung der Oberflächenenergie des festen Kerns auf die Oberflächenspannung des gedruckten flüssigen Mantels ist ebenfalls zu beachten. [68, P9]

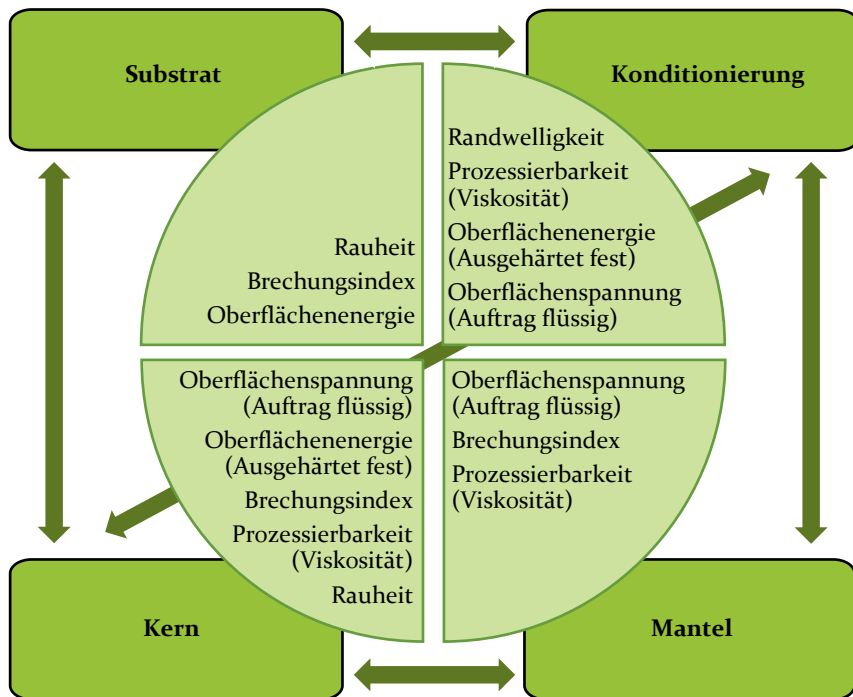


Bild 26: Wechselwirkungsdiagramm für gedruckte polymere Wellenleiter.

Auf dieser Basis erfolgte eine detaillierte Materialrecherche, bei der insgesamt über 20 Hersteller und mehr als 150 potentielle Polymere ermittelt werden konnten [S3, S4]. Anhand dieses Materialkatalogs wurden diverse Substratmaterialien in Kombination mit den im AJ-Verfahren aufgebrauchten flüssigen Polymeren kombiniert. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die betrachteten Materialien, deren Einsatzart sowie zugehörige studentische Quellen.

Tabelle 9: Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Materialien sowie deren Einsatzart und zugehörige studentische Quellen.

Materialbezeichnung	Einsatz als	In
Glas	Substratmaterial	S5; S6
Polyimid (PI)	Substratmaterial	S5; S7
Polyvinylchlorid (PVC)	Substratmaterial	S7
Polycarbonat (PC)	Substratmaterial	S5
Polymethylmethacrylat (PMMA)	Substratmaterial	S8; S9; S10
Poly-3,4-ethyldioxythiophen: Polystyrolsulfonat (PEDOT:PSS)	Kernmaterial	S5
Norland NOA 61	Kernmaterial	S6
EpoCore 2, 5, 10, 15, 20	Kernmaterial	S7; S8; S9
Ink_Epo	Kernmaterial	S7
Ink_Ormo	Kernmaterial	S7
Loctite 3105	Kernmaterial	S7
Loctite Ablelux OGR-146-TUV	Kernmaterial	S7
Loctite Ablelux OGR-150-THTG	Kernmaterial	S7
PolyTecVP 4641-1	Kernmaterial	S5
Actega G8-372/NVK-S	Kernmaterial	S9
Jänecke+Schneemann 390119 UV Supraflex	Kernmaterial	S10; S11
EpoClad 5	Mantelmaterial	S8

Bei den durchgeführten Voruntersuchungen (einfache Drucktests Linien/Konturen auf den unterschiedlichen Substraten mit unterschiedlichen Konditionierungen) konnten die besten Ergebnisse mit dem UV Supraflex Lack 390119 der Firma Jänecke+Schneemann auf mit Actega G8-372/NVK-S vorkonditionierten PMMA-Folien erzielt werden [S7]. Die hier verwendeten UV-härtenden Polymere sind radikal härtende Systeme, welche reaktive Bindemittel enthalten. Diese bilden eine feste chemische Verbindung aus, sobald sie durch den Initiator angeregt werden. Der Initiator zerfällt durch die UV-Einstrahlung zu Radikalen und startet so die Kettenreaktion [72]. Mehrere Faktoren wirken sich dabei positiv auf die Verarbeitung von J+S Lack im AJ-Prozess aus:

1. Geeigneter Viskositätsbereich: dynamisch 72,491 cP bei 40 °C (siehe Bild 27)

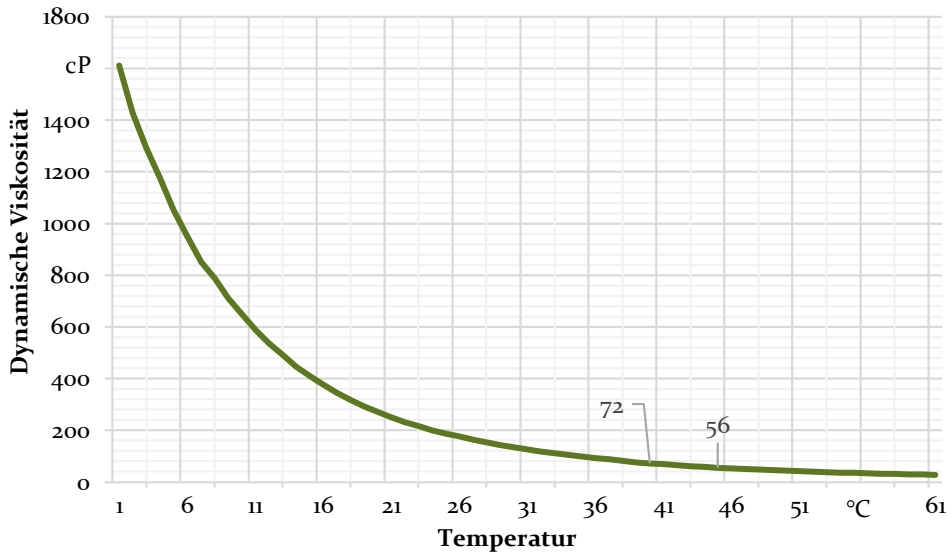


Bild 27: Graphische Darstellung der dynamischen Viskosität bei steigenden Temperaturen für J+S 390119.

2. Hohe Beständigkeit gegenüber Sonnenlicht
3. Langzeitstabilität (über mehrere Tage hinweg verarbeitbar)
4. Großes Prozessfenster (Prozessparameter können in weiten Bereichen variiert werden, um das Druckergebnis anzupassen)
5. Geringe Kontamination der Anlage und damit verbunden geringer Reinigungsaufwand (Aushärten in Schläuchen/Düse etc.)
6. Geringer Lösungsmittelanteil (< 1,0 % organische Lösungsmittel)
 - Geringer Schrumpf; hohe Formbeständigkeit
 - Einfache Aushärtung (UV-Licht ohne zusätzliche Temperierung)
 - Keine Lösungsmittelrückstände an der Lichtwellenleiteroberfläche
7. Kein sprödes Aushärten
 - Keine Rissbildung
 - Kein Ablösen vom Substrat
8. Schnelles und vollständiges Aushärten
9. Brechungsindex (1,52 bei 850 nm) passend zur eingesetzten PMMA-Folie (1,49 bei 850 nm), um Totalreflexion an den Grenzflächen zu gewährleisten

3-3 5-M-Analyse zur Ableitung der relevanten Einflussgrößen auf die Qualität der gedruckten POW

Mit Hilfe der 5-M-Analyse, welche auch als Ishikawa-Diagramm oder Ursache-Wirkungs-Diagramm bezeichnet wird, können in übersichtlicher Form die auf eine definierte Zielgröße einflussnehmenden Faktoren oder Probleme strukturiert zusammengefasst werden. In Bild 28 ist eine leicht modifizierte Version des klassischen 5-M-Diagramms für die Qualität gedruckter POW dargestellt.



Bild 28: 5-M-Analyse der prozessrelevanten Einflussgrößen auf die Qualität gedruckter POW.

Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Herstellung von POW im AJ-Prozess wurde das Ishikawa-Diagramm vertikal dargestellt und vier der fünf Oberbegriffe auf der linken Seite eingepflegt. Zudem erfolgt eine farbliche Trennung in rot und schwarz, welche auf eine im Vorfeld durchgeführte ABC-Analyse zurückzuführen ist. In Bild 28 stehen die roten Punkte (A) für Einflüsse die entweder schwer (oder im aktuellen Versuchsaufbau gar nicht) zu beherrschen sind oder den Prozess maßgeblich beeinflussen. Schwarz hinterlegte Faktoren (B) sind generell beherrschbar oder im Vergleich zu den roten weniger bedeutend. Einflussfaktoren, welche mit C bewertet wurden, wie beispielsweise die Eintauchtiefe des Stempels in die flüssige Tinte, konnten somit bereits frühzeitig von der weiteren Versuchsdurchführung ausgeschlossen werden. An dieser Stelle erfolgt bereits vor der analytischen Betrachtung der Versuchsergebnisse (Kapitel 4) und der Prozessmodellierung (Kapitel 5) eine kurze Beschreibung der fünf M: [73]

Maschine

Die drei Gasströme, welche für den eigentlichen Druckprozess verantwortlich sind, unterliegen trotz konstanter Einstellung starken Druckschwankungen, welche von der KEWA Process Control Software aufgezeichnet werden. Generell ist mit der AJ-Maschine kein über mehrere Stunden hinweg stabiler Prozess realisierbar. Die Druckverhältnisse bei der Prozessführung unterliegen einer in den meisten Fällen (> 90 %) ansteigenden Druckentwicklung, welche direkt mit der Kontamination des Drucksystems mit sich ablagernden Tintentropfen korreliert. Eine durchgehende Prozessführung über mehr als sechs Stunden hinweg sollte nicht ohne zwischenzeitlichen Reinigungsschritt (Empfehlung alle 3 h reinigen) des Gesamtsystems erfolgen, da die Druckergebnisse drastisch vom Ursprungszustand abweichen. Bei sinkenden Drücken ist das System auf undichte Stellen, insbesondere an den zahlreichen Verbindungsstellen der Einzelkomponenten, zu prüfen. Zumeist bedarf es hier lediglich einer Schmierung oder eines Austauschs der Dichtringe.

Die Druckgeschwindigkeit ist für die Präzision des Materialauftrags verantwortlich. Bei höheren Geschwindigkeiten müssen somit die Gaseinstellungen angepasst werden, um die Qualität des Druckbilds zu wahren. Temperaturschwankungen im System führen zwangsläufig zu Viskositätsänderungen und müssen somit stets berücksichtigt werden. Eine unscheinbare, jedoch für die Verarbeitung von flüssigen Polymeren systemrelevante Maschinenkomponente ist der Verbindungsschlauch zwischen dem Düsenkopf und dem Virtual Impactor. Dabei sind die beiden Faktoren Länge und

Krümmung entscheidend. Da die Tropfen einen relativ großen Impuls, verglichen mit den vorhandenen Gasmolekülen, besitzen, ist deren Flugrichtung vornehmlich horizontal. Dies resultiert in einem direkten Wandungskontakt bei Krümmungen. Auch in der Praxis kann beobachtet und belegt werden, dass es im Bereich der Schlauchkrümmung zu einem Absetzen der Tropfen und somit zu Verstopfungen im System kommt. Das Schlauchstück selbst sollte bei maximalem Radius so kurz wie möglich gehalten werden. Die Erscheinung von Overspray (siehe Bild 14) korreliert direkt mit der gewählten Z-Position der Düse. Bei zu großer (> 10 mm) und zu geringer (< 3 mm) Distanz zum Substrat ist eine vermehrte Tropfenablagerung außerhalb des Fokusbereichs zu beobachten.

Methode

Die Druckstrategie, bezogen auf Gaseinstellungen und die Anzahl der gedruckten Lagen mit oder ohne zwischenzeitlichen Aushärtungsschritt, hat die stärksten Auswirkungen auf die Qualität. Hierdurch wird auch der Parameter Druckgeschwindigkeit gesteuert. Die besten Ergebnisse konnten hierbei mit mehrlagigem Druck (min. sechs Lagen), nachträglicher UV-Belichtung und moderaten Aerosol-Einstellungen von 800 sccm (ZG), 740 sccm (AB) und 80 sccm (UG) erzielt werden. Aufgrund der vorhandenen, verwendeten optischen Messgeräte (siehe Kapitel 4.9) wird die Mindesthöhe der gedruckten POW auf 50 μm gesetzt. Die Temperierung der Komponenten, besonders der Tinte zur Manipulation der Viskosität, stabilisiert den Gesamtprozess. Dabei müssen die eingestellten Maschinenparameter exakt auf die Viskosität der Tinte angepasst werden, da zu hohe Viskositäten zu mangelndem Durchfluss und der Bildung größerer Tropfen führen, womit wiederum eine erhöhte Kontamination einhergeht. Zu geringe Viskositäten resultieren in einer vermehrten Overspray-Bildung aufgrund der kleineren Aerosol-Tropfen und äußern sich ebenfalls in einer beschleunigten Verschmutzung. Vor allem entsteht hier eine Tropfenbildung an der Düsenspitze, wie in Bild 29 exemplarisch dargestellt.

Mensch

Die Überwachung des Gesamtprozesses unterliegt dem Bediener. So muss bei der Entwicklung fehlerhafter Leiterbilder eine direkte Maßnahme eingeleitet werden, um keinen unnötigen Ausschuss zu produzieren. Da der AJ-Druck vielfältigen Einflussfaktoren unterliegt, stellt dies die größte Herausforderung dar und bedarf explizitem Expertenwissen. Das Tragen von Schutzkleidung erhöht dabei den Grad der Sauberkeit und damit der Qualität des Druckergebnisses.



Bild 29: Tropfenbildung an der Düsenspitze.

Milieu

Der Aufbau optischer Komponenten unterliegt einem hohen Maß an technischer Sauberkeit. Generell sollte die Herstellung stets in einem Reinraum oder zumindest einer reinraumähnlichen Umgebung, wie einer Flow-Box, erfolgen, da jedes Staubkorn die optischen und mechanischen Eigenschaften des POWs massiv beeinflusst. Zudem beeinflussen weitere Umgebungseigenschaften wie UV-Licht, Temperatur und Luftfeuchtigkeit den Gesamtprozess. Ein Arbeiten unter Rotlicht bei stabilen Umgebungsbedingungen führt zu einer erhöhten Qualität.

Material

Die meisten auf das verwendete Material einflussnehmenden Faktoren wurden bereits im Vorfeld erläutert. Speziell werden hier noch einmal die schwer beherrschbaren oder maßgeblich am Prozess beteiligten A-Faktoren betrachtet. Da die Konditionierung den Rahmen für den späteren Wellenleiterkern bildet, muss diese mit höchster Präzision erfolgen. Hierbei führen Randwelligkeiten, Fehlstellen und Verschmutzung zwangsläufig zu Defekten innerhalb des Wellenleiterkerns. Ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess ist nötig, um eine Erhöhung der Prozessfähigkeit zu gewährleisten. Große produktionstechnische Schwierigkeiten bereitet das Applizieren eines geeigneten Mantelmaterials auf den ausgehärteten Kern. Die Herausforderung besteht darin, die Oberflächenenergie des Kerns so auf die Oberflächenspannung des Mantels (oder umgekehrt) anzupassen, dass weder ein Abfließen vom Kern, noch eine Materialanhäufung auf selbigem erfolgt und somit eine vollständige Benetzung ermöglicht wird.

4 Analytische Betrachtung der Versuchsergebnisse und Qualifizierung des Herstellungsverfahrens

Aufbauend auf der durchgeführten 5-M-Analyse werden in diesem Abschnitt prozessrelevante Versuchsergebnisse dargestellt, welche für die Qualifizierung des Herstellungsverfahrens von maßgeblicher Bedeutung sind. Im Fokus steht hierbei die Lösungsstrategieentwicklung für die identifizierten Herausforderungen.

4.1 Bestimmung des Materialdurchflusses

Für die Durchführung einer Materialdurchflussmessung an der Aerosol-Jet-Anlage wird zunächst ein leichtes Substrat, wie beispielsweise Aluminiumfolie, mit den Maßen (2 x 2) cm² in einer Präzisionswaage, welche über eine Einhausung zum Schutz vor Luftströmungen und Druckveränderungen verfügt, gewogen. Im Anschluss wird das Substrat über eine definierte Zeitspanne (meist fünf Minuten) mit flüssigem Polymer bedruckt und wiederum gewogen. Die Verwendung eines möglichst präzisen Messmittels ist aufgrund der geringen Massenänderungen (nur wenige Milligramm) durch das aufgebrachte Polymer essentiell. Während der Durchflussermittlung sind alle Drücke in der KEWA Process Control-Software auf Konstanz zu überprüfen. Mit dem ermittelten Differenzgewicht, bezogen auf die Zeit, kann der Materialdurchfluss berechnet werden. Bei der Verwendung einer Heizmanschette sollte eine mindestens 30-minütige Vorwärmzeit eingeplant werden, um die Tinte auf ein stabiles Temperaturniveau zu bringen.

Versuchsdurchführungen für J+S 390119

Um die Reproduzierbarkeit des Materialauftrags der AJ-Anlage qualifizieren zu können, wird an 35 aufeinanderfolgenden Arbeitstagen der Materialdurchfluss für J+S 390119 bei konstanten Maschineneinstellungen ($ZG = 800$ sccm; $AB = 740$ sccm; $UG = 80$ sccm; Temperatur der Heizmanschette $T_H = 45$ °C; Vorwärmzeit $t_V = 30$ min; Düsendurchmesser $d_D = 300$ µm) gemessen. Zudem wird das Gesamtsystem vor jeder Messung gereinigt. Die äußeren Einflüsse innerhalb der klimatisierten Laborhalle sind in den Monaten September und Oktober, in denen die Werte aufgenommen werden, weitestgehend konstant (relative Luftfeuchtigkeit 50 % +/-10%; Hallentemperatur 20 °C +/-2 °C). Die Ergebnisse sind in Bild 30 graphisch aufgetragen. Dabei lässt sich aus dem Diagramm eine

Spannweite von 0,0250 mg/s bei einem Maximum von 0,0323 mg/s und einem Minimum von 0,0073 mg/s ableiten. Im arithmetischen Mittel beträgt der Materialdurchfluss 0,0191 mg/s. Weiterhin lässt sich aus dem Verlauf der Messwerte kein Trend oder eine Tendenz hin zu bestimmten Materialdurchflüssen erkennen.

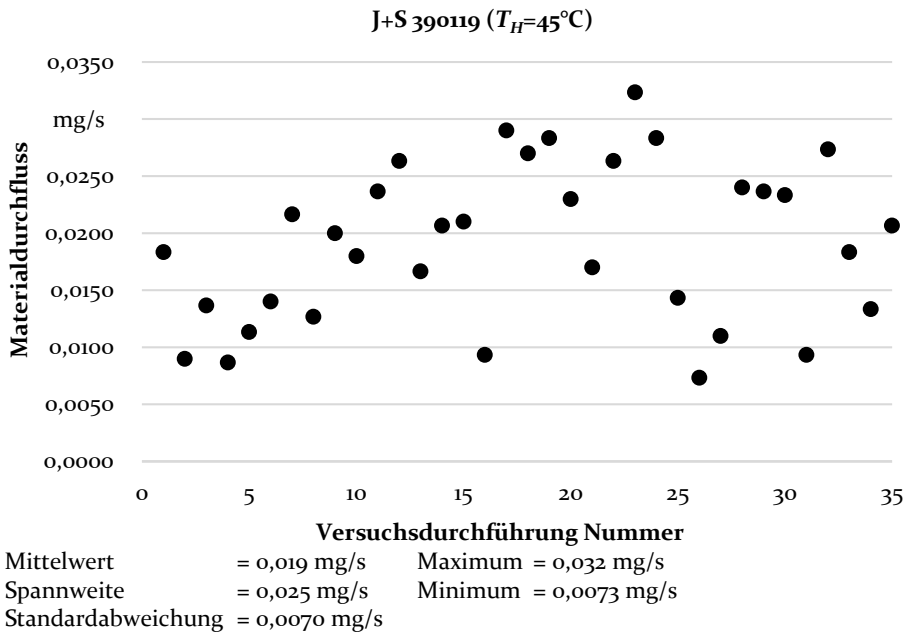


Bild 30: Graphische Darstellung des gemessenen Materialdurchflusses bei konstanter Versuchsdurchführung an 35 aufeinanderfolgenden Arbeitstagen. [S12]

Aus diesem instabilen Verhalten resultieren Herausforderungen für die Festlegung der Druckgeschwindigkeit. Unter der Annahme einer konstanten Druckgeschwindigkeit von beispielsweise 100 mm/min ergeben sich für jede gedruckte Leiterbahn unterschiedliche Höhen und Breiten. Vor dem Drucken ist somit stets die Durchführung einer Materialdurchflussmessung notwendig, um darauf aufbauend die Druckgeschwindigkeit bestimmen zu können, die für die Herstellung der benötigten Leiterbahngeometrie erforderlich ist.

Mithilfe der Fehlerbaumanalyse (siehe Bild 31) werden mögliche Ursachen für derartige Materialdurchflussschwankungen systematisch hinterfragt. Die Fehlerbaumanalyse stellt eine Qualitätsmanagementmethode dar, welche, ausgehend von einem bestimmten Fehler im System, alle potentiellen Ursachen evaluiert. Dabei entsteht eine baumartige Strukturierung, in der einzelne Ursachen anhand der booleschen Operationen Konjunktion, Disjunktion und Negation verknüpft werden können. [74]

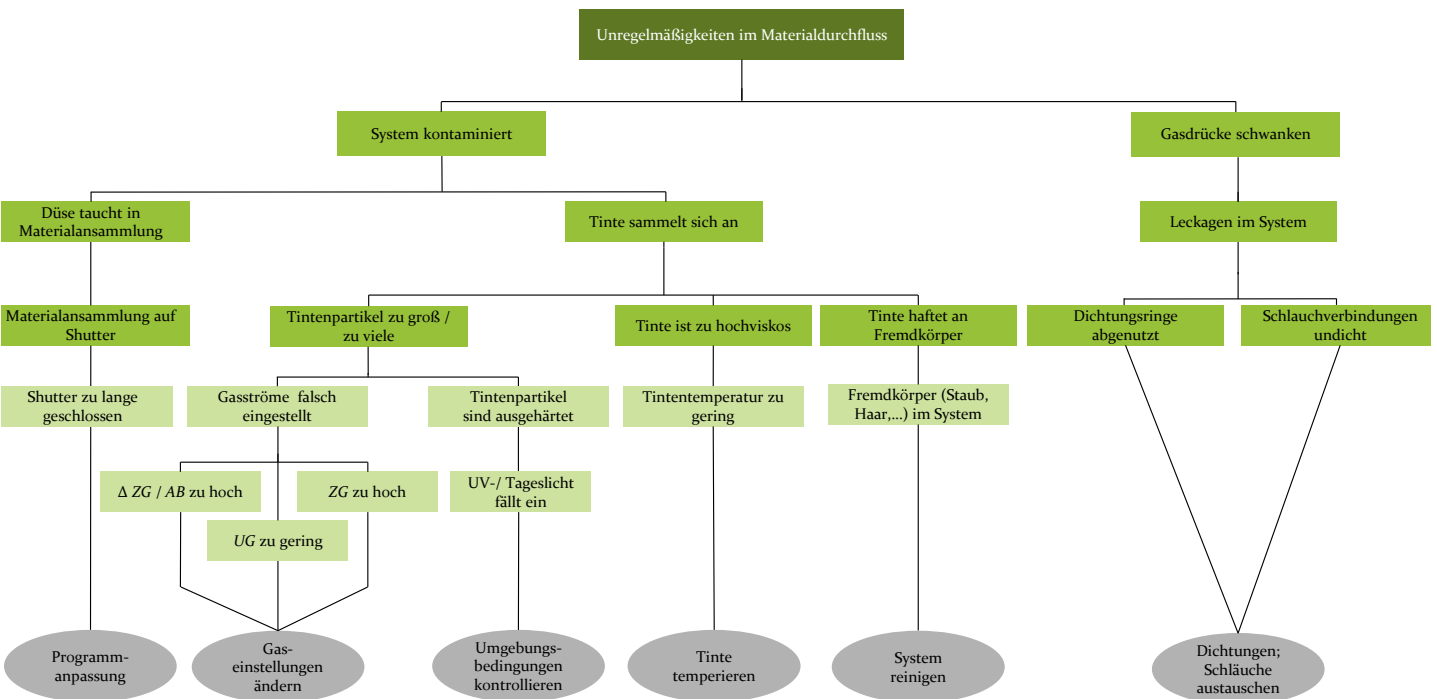


Bild 3r: Fehlerbaumanalyse ausgehend von Unregelmäßigkeiten im Materialdurchfluss.

Als Hauptursachen werden Verstopfungen im System und schwankende Gasdrücke identifiziert. Die Kontamination im System kann entweder durch das Eintauchen der Düse in das Material oder durch Tintenansammlung hervorgerufen werden. Tintenansammlungen im System entstehen aufgrund unpassender Gasstromparameter oder UV-Lichteinstrahlung aus der Umgebung. Letztere führt zu einem ungewollten Aushärten der Tinte im System selbst. Bei der Prozessierung von Drucktinten mit sehr hoher Viskosität (> 500 cP) kommt es zunehmend zu Materialansammlungen im System, welche durch eine Temperierung und einer damit verbundenen Senkung der Viskosität vermieden werden können. An Fremdkörpern, wie etwa Staub im System, lagert sich vermehrt Tinte ab, weshalb ein regelmäßiger Reinigungsprozess unabdingbar ist.

Einer der Gründe für die schwankenden Gasdrücke sind Leckagen im System. Diese werden durch abgenutzte Dichtungsringe oder undichte Schlauchverbindungen hervorgerufen. Ein regelmäßiges Schmieren (nach jeder Reinigung) oder ein Austausch (je nach Zustand, jedoch spätestens halbjährlich), verringern diese Schwankungen. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Faktor ist der Einfluss parallel betriebener (am selben Stickstoffverteiler angeschlossener) Anlagen. Beim Ein- und Ausschalten dieser Anlagen kommt es trotz Durchflussregler immer wieder zu Schwankungen des Stickstoffquellendrucks, welcher an der AJ-Anlage ebenfalls zu Druckveränderungen und somit zu schwankenden Massedurchflüssen führt.

Aufgrund der durchgeführten Fehlerbaumanalyse kann die Produktivität der Maschine durch Verringerung der Stör- oder Ausfallzeiten erhöht werden. Dem Werker wird somit in einfacher Form eine erste Hilfestellung an die Hand gegeben, welche es ihm erlaubt den aufgetretenen Fehler schnellstmöglich zu finden.

Variation der Gasströme

Durch die Variation der Gasströme werden die Zusammenhänge zwischen Zerstäubergas-, Abgas- und Umhüllungsgasstrom in Bezug auf den Materialdurchfluss analysiert. Die Erwartungen an diese Versuchsreihe sind sowohl für gleiche Gasparametereinstellungen gleiche Materialdurchflüsse zu erhalten, als auch die Materialdurchflüsse zwischen verschiedenen Gasparametereinstellungen klar abgrenzen zu können. Der Versuchsplan umfasst zwei Faktorstufen und einen Zentralpunkt für die beiden Faktoren Umhüllungsgasstrom und Abgasstrom. Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen wird als Zentralpunkt ein Umhüllungsgasstrom von 80 sccm und ein Abgasstrom von 740 sccm festgelegt. Im Vergleich zum Zentralpunkt

liegen die Ausprägungen für die Faktorstufen von Umhüll- und Abgasstrom um jeweils 30 sccm höher bzw. niedriger. Der Zerstäubergasstrom wird für die hier durchgeführte Versuchsreihe konstant auf 800 sccm eingestellt, da bei diesem Wert eine Aerosol-Bildung für das eingesetzte Material sichergestellt ist. Bild 32 zeigt den Aufbau des Versuchsplans mit Zentralpunkt (Z) und listet alle Faktorstufenkombinationen (FSK) auf. Zu jeder FSK erfolgen fünf Materialdurchflussmessungen, woraus ein Versuchsumfang von 25 Einzelmessungen resultiert. Darüber hinaus wird das System nach jeder durchgeführten FSK gereinigt.

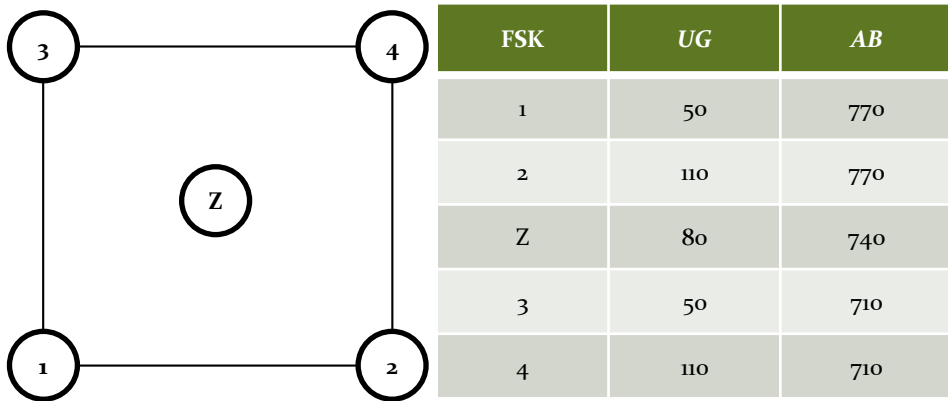


Bild 32: 2²-Versuchsplan für unterschiedliche Gasströme mit Zentralpunkt.

Alle weiteren Parameter und Maschineneinstellungen werden wiederum analog zur obigen Vorgehensweise verwendet. Die sich einstellenden Gasdrücke für alle drei Gasströme werden während der Versuchsdurchführung ebenfalls erfasst, um deren Einflüsse auf den Materialdurchfluss quantifizieren zu können.

Bild 33 zeigt die Messergebnisse der Materialdurchflüsse aller fünf Einzelmesswerte der jeweiligen Faktorstufenkombinationen. Es ergeben sich gegenseitig schneidende und nur bedingt voneinander abzugrenzende Kennlinien. Eine statistische Auswertung der Ergebnisse zur Bestimmung von Effekten ist aus diesem Grund nicht möglich. Allein die Kombination aus einem Abgasstrom von 710 sccm und einem Umhüllungsgasstrom von 110 sccm neigt durchgehend zu niedrigen Werten. Dahingegen weisen alle anderen Kombinationen sowohl Materialdurchflüsse im oberen Bereich zwischen 0,015 mg/s und 0,020 mg/s, als auch im unteren Bereich von 0,005 mg/s bis 0,010 mg/s auf.

4.1 Bestimmung des Materialdurchflusses

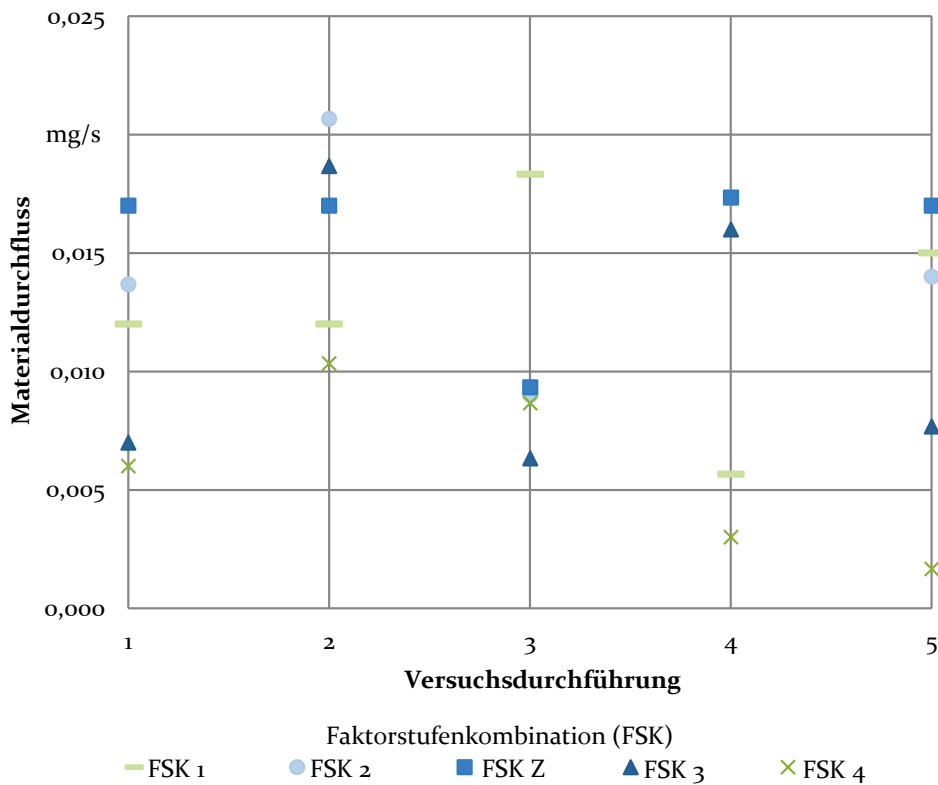


Bild 33: Ergebnisse der Materialdurchflussmessungen bei variierenden Gaseinstellungen.

Um in der Folge die Ursache für die Schwankungen im Materialdurchfluss trotz gleicher Gasparameter und Temperierung der Tinte ermitteln zu können, gilt es, gemäß guter wissenschaftlicher Praxis, weitere potentielle Einflussfaktoren auszuschließen. Dazu stellt Bild 34 die maschinenseitigen Gasdrücke für ZG, AB und UG nach Faktorstufenkombination geordnet dar. Über den gesamten Verlauf hinweg lässt sich erkennen, dass alle drei Gasdrücke ein gleichmäßiges Verhältnis zueinander aufweisen. Das heißt, ausgehend von sich erhöhenden oder verringernden Zerstäubergasdrücken ergeben sich höhere bzw. geringere Gasdrücke für UG und AB. Außerdem zeigen sich korrespondierend zum Materialdurchfluss Schwankungen in den Gasdrücken der jeweiligen Faktorstufenkombination. Die Schwankungen liegen beim Zerstäubergasdruck zwischen 4,40 psi und 4,75 psi, beim Umhüllungsgasdruck zwischen 0,10 psi und 0,50 psi sowie beim Abgasdruck zwischen -0,25 psi und -0,55 psi mit Standardabweichungen von jeweils 0,116 psi, 0,095 psi und 0,091 psi.

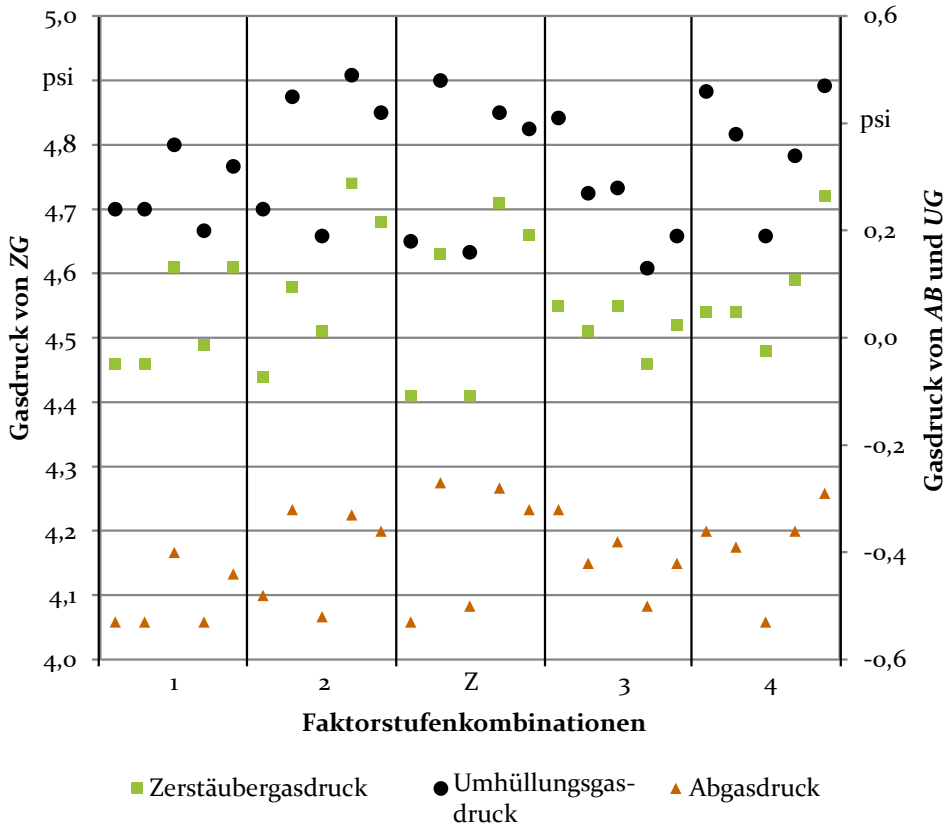


Bild 34: Gasdrücke für Zerstäuber-, Ab- und Umhüllungsgas geordnet nach Faktorstufenkombinationen.

Bild 35 stellt einen Bezug zwischen den maschinenseitigen Gasdrücken und dem Materialdurchfluss her. Dazu sind die Gasdrücke unabhängig von den Faktorstufenkombinationen nach steigendem Materialdurchfluss geordnet abgebildet. Die ermittelten Trendlinien lassen einen Zusammenhang zwischen niedrigeren Gasdrücken und geringen Materialdurchflüssen sowie von höheren Gasdrücken mit hohen Materialdurchflüssen vermuten. Bei genauerer Betrachtung von Einzelwerten kann diese These jedoch widerlegt werden. So zeigen die beiden rot hervorgehobenen Messergebnisse vergleichbare Druckverhältnisse (Ordinate), der Materialdurchfluss (Abszisse) ist jedoch annähernd verdoppelt. Es kann somit gezeigt werden, dass die maschinenseitigen Gasdrücke keinen direkt mit dem Materialdurchfluss korrelierenden Einfluss haben.

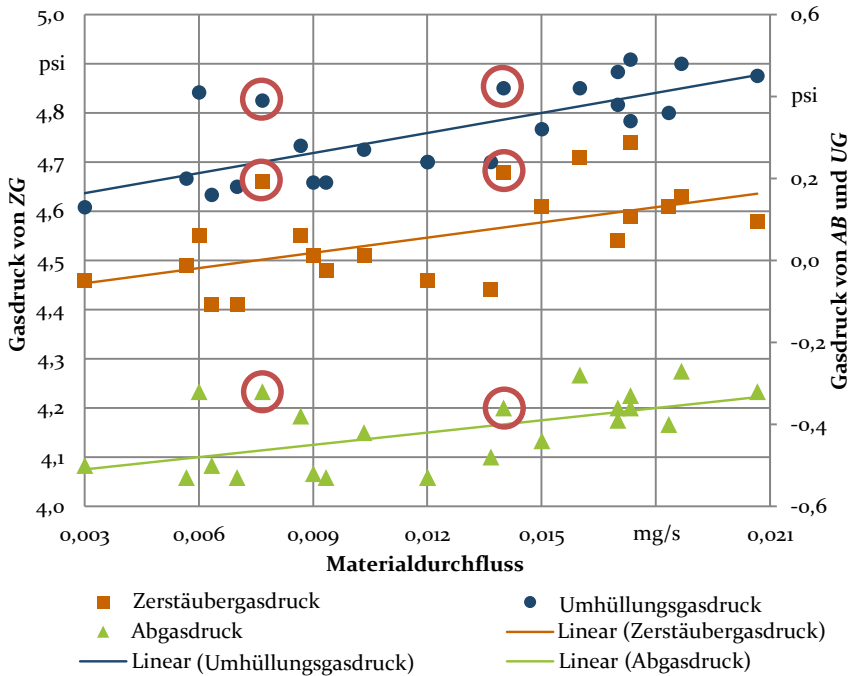


Bild 35: Korrelierte graphische Darstellung des Materialdurchflusses und der maschinen-seitigen Gasdrücke.

Einfluss der Tintentemperatur

Um die Temperaturabhängigkeit des Materialdurchflusses zu quantifizieren, werden wiederholt Messungen bei verschiedenen Einstellungen der Heizmanschette durchgeführt. Die Vorwärmzeit von 30 min sowie alle sonstigen Einstellungen werden entsprechend der vorherigen Versuchsdurchführung beibehalten. Die Heizmanschette wird hierbei auf 40 °C, 45 °C, 50 °C und 55 °C betrieben. Die resultierenden Tinten- bzw. Lacktemperaturen werden über das Einführen eines berührenden Temperaturfühlers in den Tintenbehälter ermittelt. Bild 36 zeigt die dabei evaluierten Messergebnisse. Der Massedurchfluss steigt bei Temperaturerhöhung aufgrund der Verringerung der Viskosität fortschreitend an. Dabei nimmt der verwendete J+S-Lack eine Temperatur von etwa 80 % bis 90 % der eingestellten Heizmanschettentemperatur in °C an. Bei steigenden Temperatureinstellungen kommt es zudem vermehrt zu Massedurchflussschwankungen (siehe Bild 37), da größere Mengen Material in Aerosol umgesetzt werden und somit die Wahrscheinlichkeit der Ablagerung einzelner Tropfen im Gesamtsystem bzw. der Tropfenbildung an der Düsenspitze ansteigt. Bis zu einer Heizmanschettentemperatur von 45 °C ist das Durchflussver-

halten vergleichsweise stabil ($\sim 10\%$ Abweichung). Ab 50°C ist mit größeren Schwankungen ($\sim 20\%$ Abweichung) zu rechnen, weshalb für den verwendeten J+S Lack eine maximale Vorwärmtemperatur von 45°C nicht überschritten werden sollte.

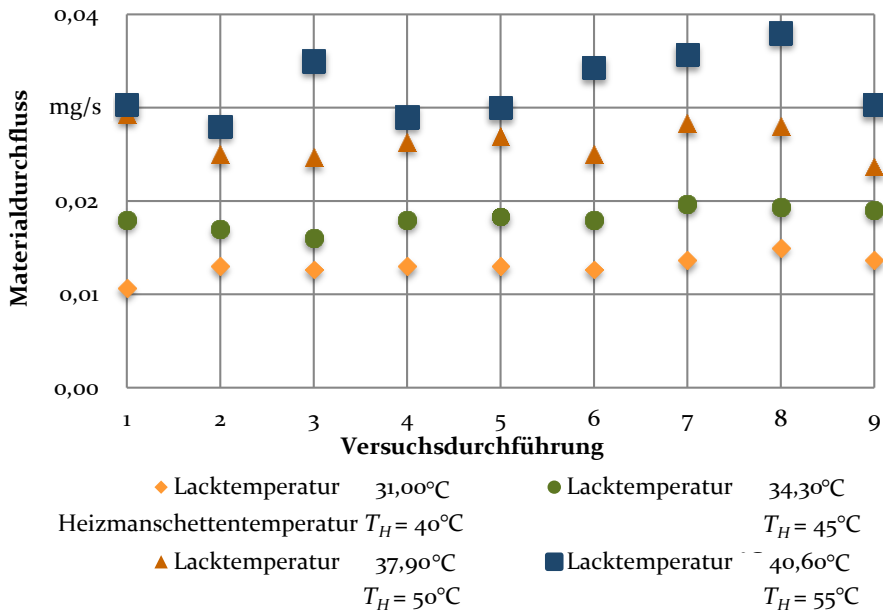


Bild 36: Abhängigkeit des Materialdurchflusses von der Lacktemperatur im Inneren des Tintenbehälters.

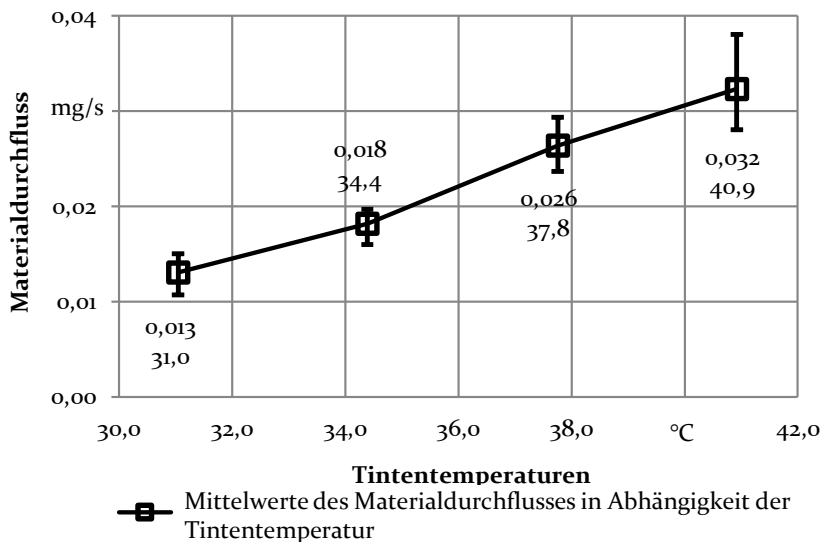


Bild 37: Box-Plot-Darstellung des Ausmaßes der Materialdurchflussschwankungen bei steigender Tintentemperatur.

Steigendes ZG und AB

Anhand der 15 im Vorfeld definierten Polymerwerkstoffe (siehe Kapitel 3.2.3) wurde die vom Hersteller Optomec in Bild 23 dargestellte These überprüft. Diese besagt, dass bei steigenden ZG auch die Durchflussmenge kontinuierlich ansteigt. Die Ergebnisse sind exemplarisch für vier Versuchsdurchführungen in Bild 38 dargestellt. Folgende Rahmenbedingungen wurden dabei eingehalten:

- 1) Keramische Düse, Fine Feature, Durchmesser: 300 µm
- 2) UG konstant: 80 sccm
- 3) Konstanter AS: 60 sccm
- 4) ZG und AB kontinuierlich in 100 sccm Schritten steigend
- 5) Wartezeit vor erneuter Versuchsdurchführung bei jeder neuen Maschineneinstellung: 5 min
- 6) Versuchsdauer pro Maschineneinstellung: 5 min
- 7) Temperatureinstellung der Heizmanschette: 45 °C

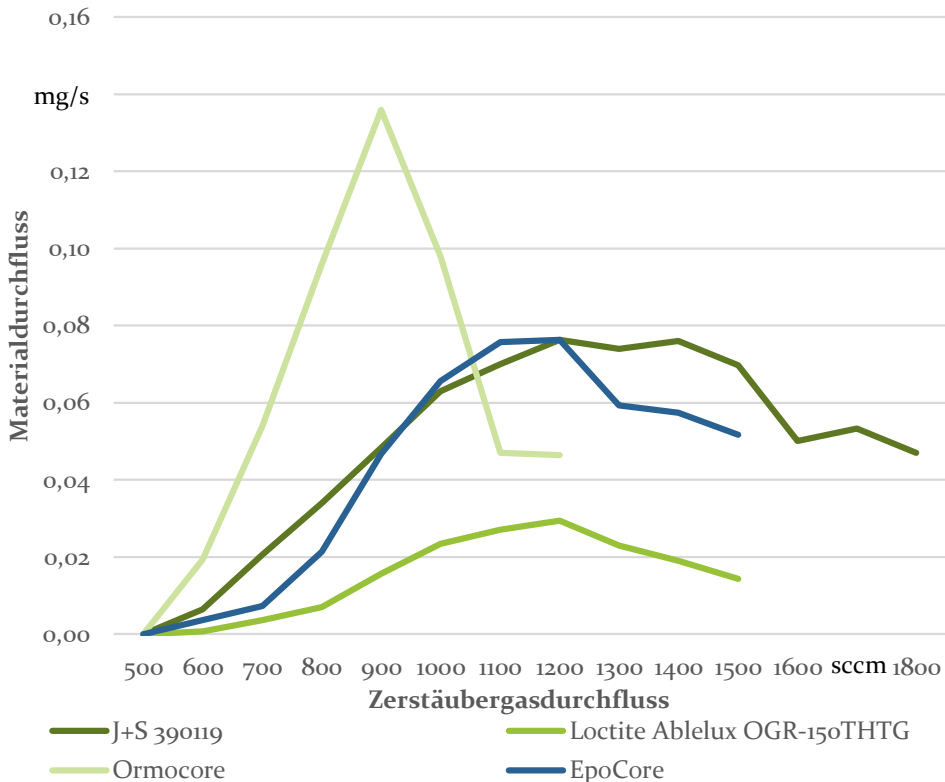


Bild 38: Materialdurchflussmessungen für steigenden Zerstäubergasdurchfluss anhand von J+S 390119 (oben) und Loctite Ablelux OGR-150 THTG (unten). [P10]

Aus den in Bild 38 graphisch dargestellten Messergebnissen geht hervor, dass der Materialdurchfluss für steigende Gasraten kontinuierlich bis zu einem Maximalwert ansteigt, jedoch bei Überschreiten dieses Werts wiederum abfällt. Zumeist liegt dieser Maximalwert, viskositätsabhängig, bei 900 sccm bis 1200 sccm.

Aus den durchgeführten Experimenten und den damit verbundenen Beobachtungen der Maschine, geht eindeutig hervor, dass oberhalb dieses Wertebereichs zu viel Material zerstäubt wird, welches sich in der Folge in den einzelnen Systemkomponenten ablagert und zu einer Verringerung des Materialausstoßes führt. Dies ist darin begründet, dass mit zunehmender Zerstäubungsrate die Menge an zu großen und zu kleinen Tropfendurchmessern entsprechend der jeweiligen Verteilungsfunktion ansteigt. Da diese Tropfen jedoch nicht das Potential besitzen zur Düsen Spitze vorzudringen, lagern sie sich je nach Durchmesser an jeweils dafür charakteristischen Stellen im Gesamtsystem ab.

Zu große Tropfen ($> 5 \mu\text{m}$ Durchmesser) beispielsweise, welche nicht direkt wieder in den Tintenbehälter zurückfallen, lagern sich im Regelfall im Virtual Impactor ab und verändern dort die Strömungsverhältnisse. Auf Dauer führt dies zwangsläufig zum Erliegen des Gesamtdurchflusses. Zu kleine Tropfen ($< 1 \mu\text{m}$ Durchmesser), welche nicht im Virtual Impactor reduziert werden und den Weg durch diesen hindurch schaffen, lagern sich vermehrt im Knick des Verbindungsschlauchs zwischen Virtual Impactor und Düsen Spitze ab. Zum einen wirken sich die geringeren Außentemperaturen stärker auf kleinere Tropfendurchmesser aus, da hier die abzukühlende Masse geringer ist. Dies führt zu einer Viskositätserhöhung und damit verbunden zu einer höheren Trägheit der Masse. Zum anderen haften sich kleinere Tropfen leichter an der Schlauchwand an, mit welcher sie zwangsläufig und verstärkt im Knick des Schlauchs in Kontakt kommen. Um die Wahrscheinlichkeit einer Verstopfung der Systemkomponenten zu verringern, sollte der maximal mögliche Durchfluss, analog zur Messung in Bild 38 ermittelt und der Atomizer Gasstrom im Dauerbetrieb mindestens 200 sccm unterhalb dieses Punkts eingestellt werden.

Zusammenfassung Materialdurchfluss

Trotz größerer Abweichungen bei konstanten Maschineneinstellungen können einige generelle Aussagen zum Materialdurchflussverhalten beim Einsatz des Aerosol-Jet-Verfahrens getroffen werden. Diese erlauben es dem jeweiligen Maschinenbediener grundlegende Zusammenhänge, welche wiederum von der gewählten Drucktinte und deren Material- und

Fließeigenschaften abhängen, in einfacher Form abzuleiten. Im Einzelnen handelt es sich dabei um folgende Punkte:

- 1) Der Materialdurchfluss steigt linear bei steigender Tintentemperatur an. In gleichem Maße steigen jedoch dessen Schwankungen.
- 2) Der Materialdurchfluss steigt bei steigendem ZG bis zu einem definierten materialabhängigen Maximalwert an. Wird dieser Wert überschritten, sinkt der Materialdurchfluss wiederum ab.
- 3) Ein abnehmender AB bei konstantem ZG und UG führt zu erhöhtem Materialdurchfluss, jedoch auch zu reduzierter Betriebszeit.
- 4) Ist AS größer als UG, sammelt sich verstärkt Tinte an der Düsen spitze an, da das Material nicht mehr in ausreichendem Maße davon abgehalten werden kann, mit der Düsenwandung in Kontakt zu treten und der Materialdurchfluss kommt zum Erliegen.
- 5) Höhere Gasdrücke resultieren tendenziell in höheren Materialdurchflüssen.
- 6) Systemwartung (Dichtungen, Schläuche) und -reinigung sind die Grundvoraussetzung für konstante Materialdurchflüsse.
- 7) Im Dauerbetrieb sollte ZG mindestens 200 sccm unterhalb des maximal möglichen Materialdurchflusses eingestellt werden, um die Betriebszeit zu maximieren.

Die im Kapitel 4.1 dargestellten Versuchsdurchführungen zur Ermittlung des Materialdurchflusses führen zu einem gesteigerten Prozessverständnis, welches wiederum zur Erhöhung der tatsächlichen Prozesszeit führt. So können die Stillstandszeiten mit Hilfe des Fehlerbaums reduziert und die Prozesszeiten durch definierte Temperaturbereiche und definierte Zerstäubergaseinstellungen mehr als verdoppelt werden.

Aktuell können bei einem achtstündigen Maschinenbetrieb tatsächlich etwa sechs Stunden zum Druck genutzt werden. Zum Vergleich waren es bei Beginn der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen nur etwa zwei Stunden. Darüber hinaus muss weiterhin vor jeder Versuchsdurchführung der Materialfluss ermittelt werden, um auf die jeweiligen vorhandenen Schwankungen reagieren zu können. Eine exakte Quantifizierung dieser Aussagen bedarf weiterer Forschungsarbeit.

4.2 Ursachen und Lösungen für Bulging

Wie in Bild 39 und Bild 40 dargestellt, kann es beim Drucken der Leiterbahnen zur Tropfenbildung zwischen den Konditionierungslinien kommen. Für dieses auch als Bulging bekannte Phänomen können mehrere Ursachen identifiziert werden: [75]

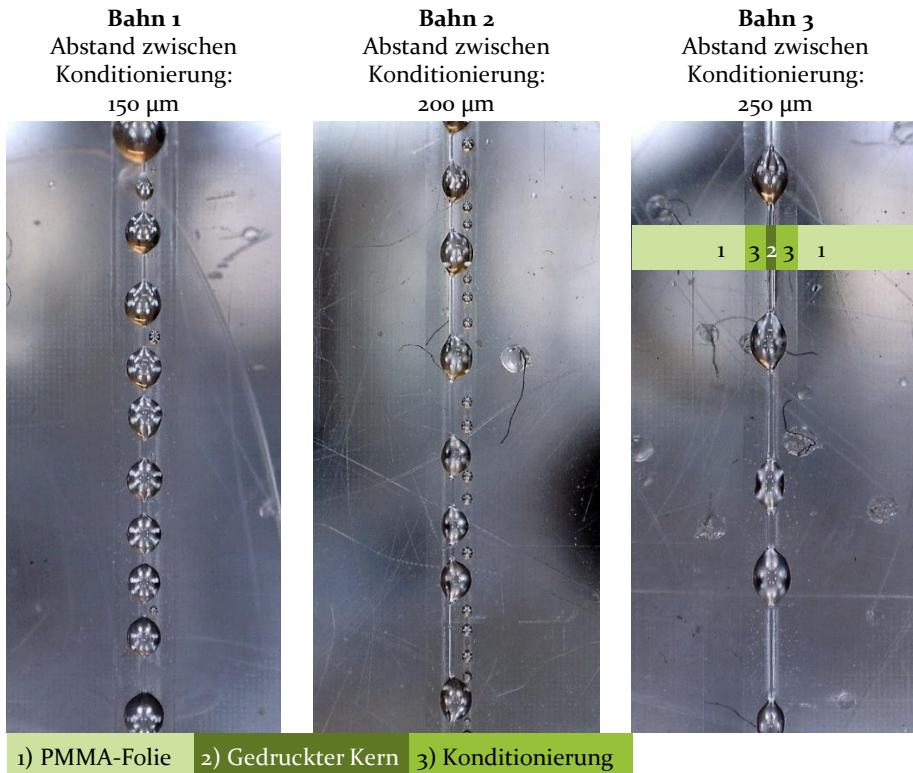


Bild 39: Bulging bei der Herstellung polymerer Lichtwellenleiter in Abhängigkeit des Abstands der Konditionierungslinien.

- 1) Unstetigkeiten/Fehlstellen innerhalb der gedruckten Konditionierungslinien

Tropfenbildung entsteht zumeist in unmittelbarer Nähe zu einer Fehlstelle in der Konditionierung (siehe Bild 40). Material wird hierbei aufgrund der wirkenden entnetzenden Eigenschaften der Konditionierung verdrängt und sammelt sich in unmittelbarer Nähe zur Unstetigkeit als Tropfen. Es kommt allerdings in fast allen Fällen nur zur einseitigen Tropfenbildung, wobei sich das Material mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf der Seite der Unstetigkeit sammelt, an der es den geringeren Kräfteverhältnissen ausgesetzt ist. Zudem wirkt sich dieser Effekt noch stärker aus, je niedriger

der Abstand zwischen den Konditionierungslinien ist (siehe Bild 39). Durch kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen bei der Herstellung der Konditionierungslinien (Erhöhung der Auflösung der profilierten Struktur [siehe Bild 13] durch Laserstrukturierung und Fluorierung [P5]) in Kombination mit einer Anpassung der Druckstrategie (mehrlagiges Drucken siehe [P1]) kann dieser Fehler weitestgehend behoben werden.

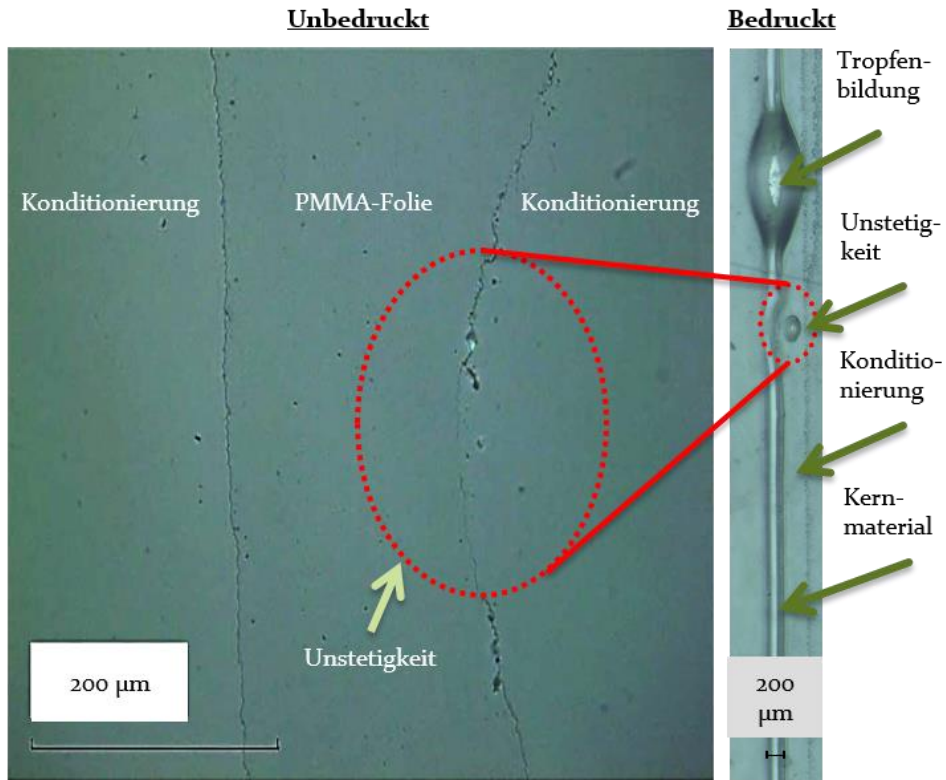


Bild 40: Bulging aufgrund von Unstetigkeiten im Konditionierungslinienverlauf. [P9]

2) Zu viel Kernmaterial appliziert

Vor jedem Leiterbahndruck sollte eine mikroskopische Untersuchung der Konditionierungslinien vorgenommen werden, um die Faktoren Abstand, Welligkeit, Defekte und Fremdkörper zu bestimmen. Nur so ist es möglich, bereits im Vorfeld Aussagen über die spätere Qualität der Lichtwellenleiter treffen zu können. Anhand dieser Voruntersuchungen kann das in Kapitel 5.1 beschriebene Berechnungsverfahren eingesetzt werden, welches abhängig vom Abstand der Konditionierungslinien und des aktuellen Masse-durchflusses erlaubt, die Geschwindigkeit der Überfahrt und damit verbunden den Materialaustritt aus der Düse exakt auf das gewünschte

Volumen anzupassen. Je nach Güte der Konditionierungslinien ist es zudem ratsam, die ermittelte Maximalgeschwindigkeit um 10 % bis 20 %, gegenüber der berechneten Vorschubgeschwindigkeit (siehe Kapitel 5.1), zu erhöhen, um damit weniger Material einzubringen und somit die Tropfenbildung durch Unstetigkeiten zu vermeiden. [P4]

3) Zu lange Wartezeit zwischen Druck und Härtung

Je länger das gedruckte Polymer in der flüssigen Phase verweilt, desto höher ist dessen Neigung zum Bulging. Das flüssige Material ist stets bestrebt, den energetisch günstigsten Zustand zu erreichen und somit seine Oberfläche zu verringern. Durch den Einbau einer UV-Lampe in die Aerosol-Jet-Anlage kann eine direkte Härtung des gedruckten Polymers durchgeführt werden. Die Zeit, die dem Kernmaterial zur Reduktion seiner Oberfläche hin zum Tropfen bleibt, wird auf diese Weise, abhängig von der verwendeten Druckgeschwindigkeit und des Abstands der UV-Lampe zur Düsen-spitze, verringert.

4.3 Mehrlagiger Wellenleiterdruck und materialabhängige Risiken für das Substrat

Die innerhalb dieses Kapitels gezeigten Versuchsergebnisse werden mit EpoCore 5 auf unkonditioniertem PMMA-Foliensubstrat erzielt. Das Bedrucken von nicht konditioniertem Substratmaterial dient vor allem der Identifikation des Materialverhaltens im Druckprozess und ist ein probates Mittel für deren Charakterisierung. Die hier präsentierten Ergebnisse stellen einige Besonderheiten des mehrlagigen Druckens und Aushärtens heraus und können auf andere Polymere mit ähnlichen Materialeigenschaften übertragen werden. Mikroskopische Aufnahmen des Auftrags von mehreren Kernlagen übereinander, wobei jeweils Aushärtungsschritte zwischengeschaltet werden, können Bild 41 und Bild 42 entnommen werden.

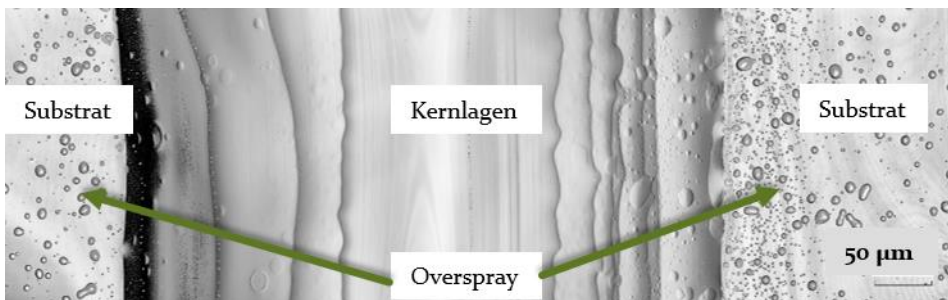


Bild 41: Laser-scanning-mikroskopische Darstellung der Draufsicht auf einen acht-schichtigen Wellenleiterkern mit Aushärteschritt nach jeder Lage.

Ein hierbei auftretendes Phänomen, welches in Bild 41 beobachtet werden kann, ist, dass in der Draufsicht der Eindruck erweckt wird, die Schichten würden nach oben hin schmaler und die Struktur des Kerns sei stufenförmig. Dies ist jedoch auf die Transparenz der Einzelschichten zurückzuführen. Tatsächlich handelt es sich bei der Schicht mit der geringsten Breite um die erste und somit unterste Schicht. Dies ist jedoch erst im Schliff besser zu erkennen (siehe Bild 42). Auffällig sind zudem die hohe Randwelligkeit sowie der massiv auftretende Overspray. Beide Erscheinungen sind zum einen auf die nicht vorhandene Konditionierung zurückzuführen. Zum anderen muss bei mehrlagigem Druck die Z-Position der Düse nach jeder gedruckten Lage angepasst werden, um einen konstanten Arbeitsabstand zu gewährleisten, welches bei diesen grundlegenden Versuchsdurchführungen nicht im Fokus steht und aus diesem Grunde nicht erfolgt.

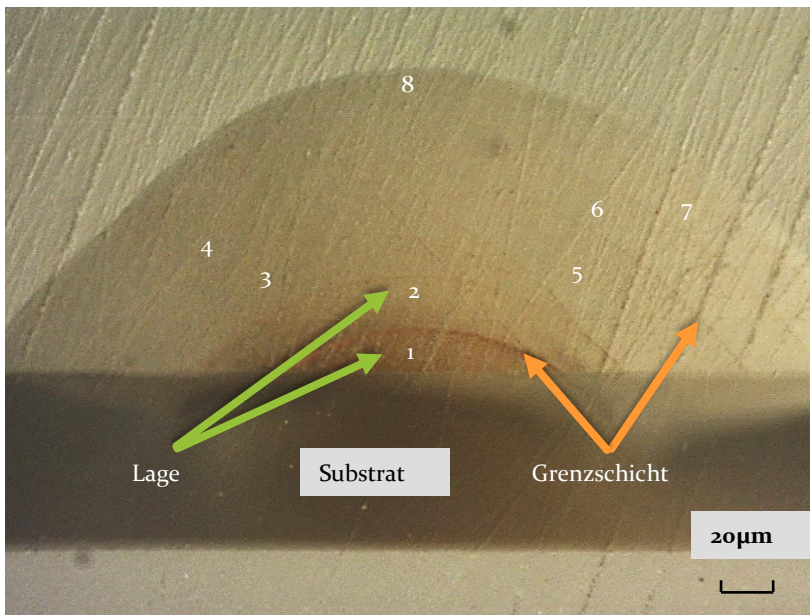


Bild 42: Konfokalmikroskopisch erzeugtes Schliffbild eines achtschichtigen Wellenleiterkerns mit Aushärteschritt nach jeder Lage.

Im Bild 42 lassen sich einzelne Grenzschichten zwischen den Kernlagen erkennen. Des Weiteren ist die Lage 1 deutlich stärker verfärbt als die darauf liegenden Schichten. Dies steht in direktem Zusammenhang mit der UV-Belastung, welche durch die mehrfache Belichtung hervorgerufen wird. Eine Dunkelfärbung des Materials kann auch bei einer Lage durch Mehrfachbelichtung – oder durch höhere Belichtungszeit – beobachtet werden. In weiterführenden Arbeiten gilt es die Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften zu identifizieren.

Auch auf die verwendete PMMA-Folie hat die UV-Aushärtung Einflüsse. So kann wie in der in Bild 43 illustrierten Falschfarbendarstellung eines Schliffbilds eine Rissbildung im Substrat nachgewiesen werden. Durch die Spannungszustände, welche sich bei der Härtung durch das sich verfestigende Material einstellen, entstehen in den Randbereichen des Lichtwellenleiters Risse, welche in das Substrat eindringen. Hierbei spielt vor allem der Materialschrumpf, welcher wiederum maßgeblich durch den Lösungsmittelgehalt des Polymers beeinflusst wird, eine wichtige Rolle. Bei Verwendung des UV Supraflex Lacks 390119 der Firma Jänecke+Schneemann kann keine Rissbildung beobachtet werden. Bei dem Einsatz von EpoCore kann bereits beim Auftrag der zweiten Lage eine deutliche Rissbildung detektiert werden. Zudem reagiert das eingesetzte Lösungsmittel γ -Butyrolacton mit dem PMMA, welches die Rissanfälligkeit der Folie zusätzlich erhöht.

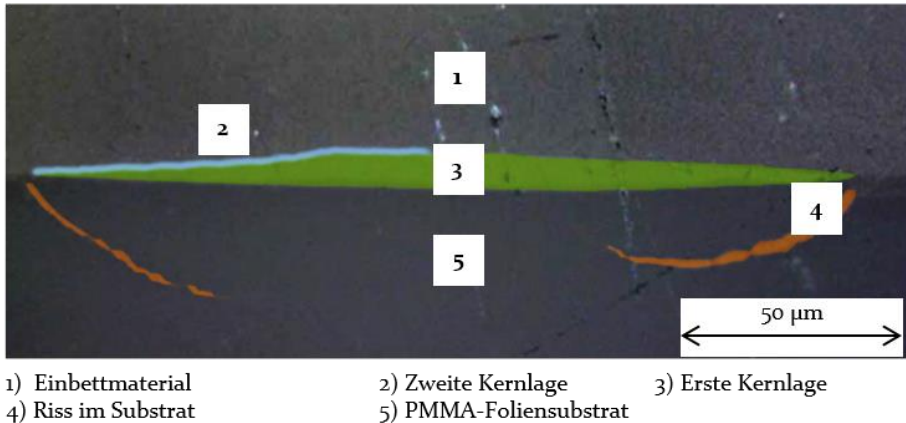


Bild 43: Falschfarbendarstellung des Querschnitts eines zweilagigen EpoCore Lichtwellenleiters im Schliff mit Rissbildung im Substrat. [S13]

4.4 Qualifizierung einer geeigneten Druckstrategie

Um trotz massiver Materialschwankungen stabile Prozessbedingungen zu realisieren, werden verschiedene Druckstrategien gegenübergestellt und qualifiziert. Dabei stehen die Anzahl der Überfahrten über das Substrat (Lagen), die Druckgeschwindigkeit und damit verbunden die Zeit bis zur UV-Belichtung im Fokus.

Bei den durchgeführten Versuchen erreichen die POW ab einer Lagenzahl von sechs bei optischer Betrachtung unter dem integrierten Kameramodul eine gleichbleibend höhere Qualität. Bei einer geringeren Anzahl von La-

gen kommt es zu einem vermehrten Auftreten der unter Kapitel 4.6 beschriebenen Fehlerbilder. Dies ist den schwankenden Materialdurchflussmengen während des Drucks geschuldet, die umso größere Auswirkungen auf den Polymerauftrag auf die Folie haben, je niedriger die Vorschubgeschwindigkeit gewählt wird. So dauert die Überfahrt beim einlagigen Druck um den Faktor zehn länger, da die Vorschubgeschwindigkeit nur ein Zehntel derer des zehnlagigen Drucks ist. Dadurch betrifft beispielsweise der erhöhte Materialaustritt eine zehnmal kleinere Bahnlänge. Der überschüssige Lack sammelt sich an einer Stelle und formt einen Tropfen auf der Leiterbahn. Beim sechs- und zehnlagigen Druck schwanken die Durchflussmengen während des Druckvorgangs in gleichem Maße, allerdings sind die Auswirkungen deutlich geringer, da sich durch den mehrmaligen Druck Leiterbahnabschnitte mit weniger und mehr Material überlagern.

Dieser Zusammenhang wird durch Bild 44 veranschaulicht. Die dargestellten Lichtwellenleiter werden unter Verwendung der fortan als Standard geltenden Maschineneinstellungen ($d_D = 300 \mu\text{m}$, $T_H = 45^\circ\text{C}$, $t_V = 30 \text{ min}$, $UG = 80 \text{ sccm}$, $ZG = 800 \text{ sccm}$, $AB = 740 \text{ sccm}$) produziert.

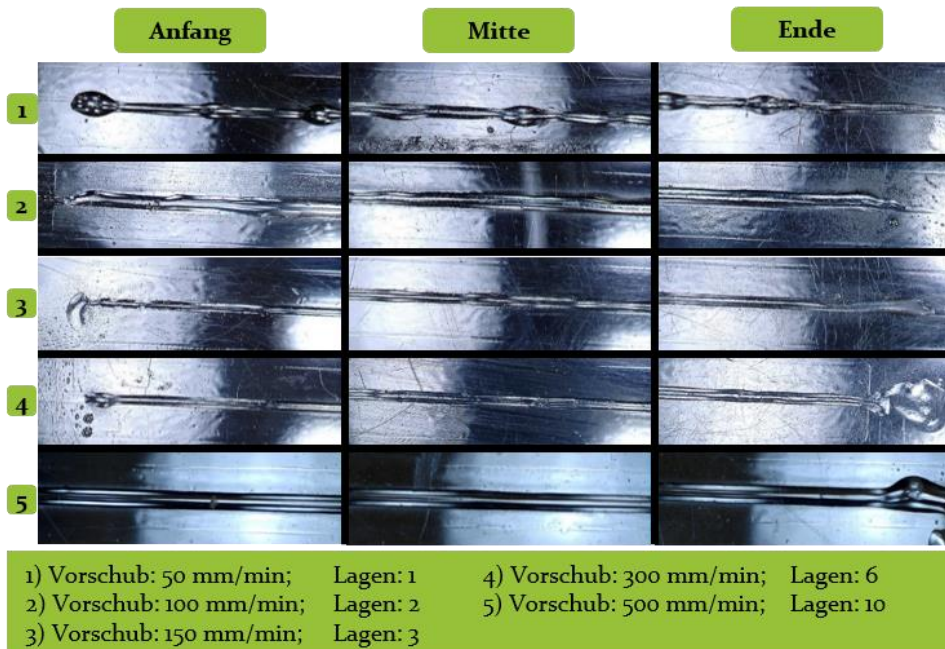


Bild 44: Kameraaufnahmen gedruckter POW in der Draufsicht unter Verwendung unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeiten und Lagenanzahl.

Die in Bild 44 dargestellten Lichtwellenleiter sind jeweils auf PMMA-Folien mit Abständen zwischen den Konditionierungslinien von $300 \mu\text{m}$ und einer

Konditionierungsbreite von 500 μm gedruckt. Von oben nach unten steigt die Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min auf 500 mm/min und die Anzahl der Lagen von eins bis zehn, wobei das Verhältnis aus Vorschub und Lagenzahl stets auf den theoretisch identischen Materialauftrag austariert ist. Die Länge der gedruckten Leiterbahn von Anfang bis Ende ist dabei 250 mm. Auf dieser Strecke wurden drei Aufnahmen erstellt und horizontal aufgetragen.

Eine Tropfenbildung am Ein- und Auslauf in den durch die Konditionierung gebildeten Kanal ist dabei häufig zu beobachten. Dies ist durch die in beide Richtungen offene Konditionierung und den damit einhergehenden veränderten Kräfteverhältnissen zu begründen. Die fehlende Konditionierung am Ein- und Auslass sorgt somit dafür, dass Material aus dem Wellenleiter herausgezogen wird, da außerhalb des konditionierten Bereichs lediglich die Oberflächenenergie des Substrats (welche höher ist) auf die Tinte wirkt und diese sich somit leichter in einen energetisch niedrigen und damit stabilen Zustand bringen kann.

4.5 Geometrische Charakterisierung der gedruckten Strukturen

Die geometrische Charakterisierung der POW erfolgt mit laser-scanning-, licht- sowie rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen. Die Parameter Höhe und Breite werden hierbei maßgeblich durch den Abstand der Konditionierungslinien sowie durch die maximal erzielbaren Randwandwinkel definiert. Diese ergeben sich in Abhängigkeit der eingesetzten Materialkombination Konditionierung/Kern und deren physikalischen Wechselwirkung.

Ein typisches Beispiel für die durchzuführenden Schritte sind in Bild 45 dargestellt, welche mit einem Keyence 3D-Laser-Scanning-Mikroskop VK-9700 durchgeführt werden. Als Erstes wird eine generelle großflächige Betrachtung des Lichtwellenleiters in der Draufsicht vorgenommen, um makroskopische Fehler wie Brüche oder grobe Verschmutzungen zu detektieren (1). Daraufhin erfolgt eine detaillierte Betrachtung des Wellenleiters in vergrößerter Ansicht, um Overspray, Randwelligkeit, Lufteinschlüsse und kleinere Fremdkörper zu erkennen (2). Die Bildgebung in den Schritten (1) und (2) erfolgt jeweils ohne Verwendung der Laserlichtfunktion. Abschließend kann mithilfe des verwendeten Laser-Scanning-Mikroskops und der damit verbundenen Möglichkeit der 3D-Oberflächenvermessung, der Querschnitt und damit die Höhe und Breite zerstörungsfrei bestimmt werden (3).

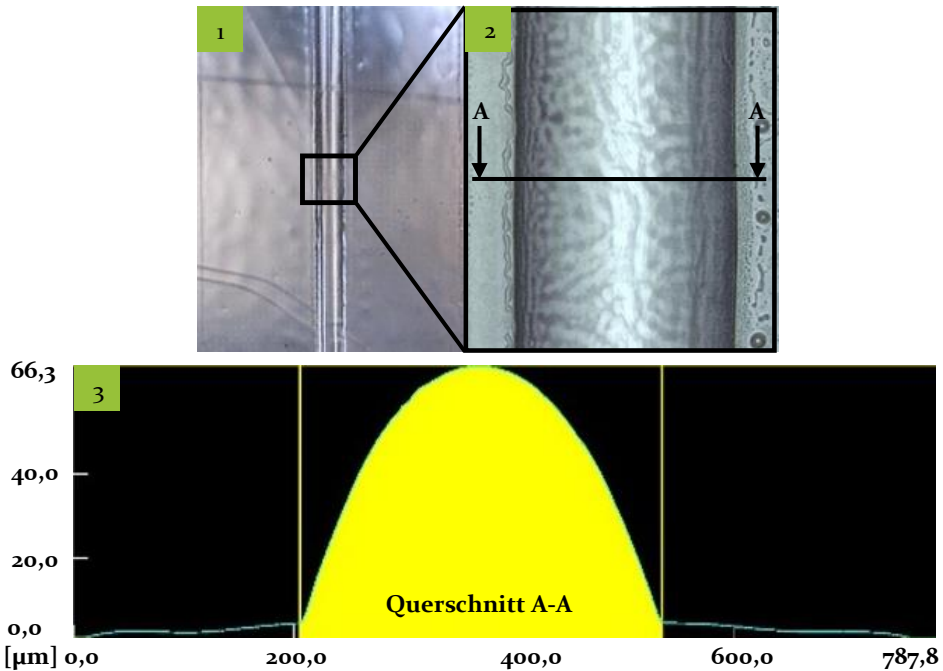


Bild 45: Schrittweise mikroskopische Untersuchung eines Lichtwellenleiters.

In der dazugehörigen Messsoftware kann nach abgeschlossener Bildgenerierung die Bestimmung der Oberflächenrauheit vorgenommen werden. Diese ist für die optische Güte des Lichtwellenleiters von großer Bedeutung [28, 76, 77]. Der dominierende Einfluss auf den optischen Verlust ist nicht auf die Form, sondern auf die Rauheit der Oberflächen zurückzuführen. Es wird angenommen, dass dieser Einfluss wesentlich für die optischen Eigenschaften des Wellenleiters ist [28, 77]. Eine Oberfläche gilt als rau, wenn sie einen arithmetischen Mittenrauwert $R_a > 50$ nm aufweist [28]. Bei Rauheitsmesswerten, die 30 nm nicht überschreiten, beeinträchtigt diese Art des Verlusts die gedruckten Lichtwellenleiter nicht maßgeblich. Zudem führen Mikrokrümmungen, die durch die Leiterbahnoberfläche hervorgerufen werden, zu Verlusten. Diese kommen ab einem Radius von etwa einem Mikrometer zum Tragen. Streuverluste treten bei Rauheitswerten auf, die etwa 10 % der für die Transmission verwendeten Wellenlänge übersteigen und somit im ersten optischen Fenster (850 nm) bei etwa 85 nm liegen [28]. Neben Form und Oberflächenrauheit haben die Abmessungen der gedruckten Bahnen einen wesentlichen Einfluss auf die Lichtübertragungsleistung. Für die Multimode-Übertragung ist eine Querschnittsfläche von mindestens $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ erforderlich. Die geometrischen Oberflä-

cheneigenschaften werden jedoch im aktuellen Arbeitsumfeld durch Verschmutzung drastisch beeinträchtigt. Die gemessenen Werte von bis zu 30 nm beziehen sich auf frisch gedruckte, mit Stickstoff gereinigte Oberflächen, an denen kein Fremdkörpereinschluss nach dem Druck festgestellt wird. [28, 76, 77, 78]

4.6 Zusammenfassung möglicher Fehlerbilder und deren Bekämpfung

In Bild 46 sind die während der Wellenleiterherstellung im OPTAVER-Verfahren auftretenden Fehlerbilder zusammengefasst. Diese Übersicht soll es künftigen Anwendern ermöglichen, auf entstehende Unstetigkeiten schneller reagieren zu können. Die Fehlerursachen können hierbei vornehmlich durch augenscheinlich triviale Lösungen effektiv bekämpft werden.

Eine zu hohe Welligkeit ist dabei ein Indiz für eine unzureichende Parallelität der Konditionierungslinien, da das eingebrachte Wellenleiterkernmaterial direkt an diesen anliegt und somit zu einem Abbild der Randstrukturen der Konditionierung wird. Ein hohes Maß an Verschmutzung der konditionierten Folie oder übermäßig eingebrachtes Kernmaterial, welches zu einem Fluten der Konditionierung führt, sind an dieser Stelle weiter potenzielle Fehlerursachen.

Fremdkörpereinschlüsse im Wellenleiterkern sind immer direkt einhergehend mit vorhandenen Verschmutzungen. Dabei können diese bereits im Vorfeld vorhanden sein oder während des Drucks bzw. des Aushärtungsprozesses eingebracht werden.

Die Ursachen und Lösungsstrategien für Bulging sind im Kapitel 4.2 detailliert erörtert. Bulging steht im direkten Zusammenhang mit massiven Fehlstellen in der Konditionierung, zu großen Mengen an appliziertem Kernmaterial oder zu langen Wartezeiten vor dem Aushärten des flüssigen Kerns.

Lufteinschlüsse im Wellenleiterkern können mit höheren Wartezeiten vor dem Aushärten vermieden werden. Dies kann jedoch wiederum andere gerade beschriebene Problemstellungen mit sich bringen. Dem Material wird dadurch mehr Zeit gegeben, einen homogenen Zustand einzunehmen und im flüssigen Kern verbleibende Restluft auszugasen. Vermehrt treten Luftporen bei Materialien mit hohen Lösemittelanteilen auf, welche bei

der Verfestigung austreiben. Hier gilt, je höher der im Datenblatt des Herstellers angegebene Lösemittelanteil, desto behutsamer (langsamer, leistungsärmer) sollte die Aushärtung gestaltet werden.

Einschnürungen sind eine direkte Folge fehlerhafter Konditionierung. Zudem treten diese verstärkt in Kombination mit Bulging auf (siehe Bild 40).

Oversprays bildet das mit Abstand häufigste Fehlerbild beim Einsatz des Aerosol-Jet-Verfahrens zur Herstellung polymerer Lichtwellenleiter. Generell stellen die meist einseitig verstärkt auftretenden Tropfen (innerhalb der Düsenspitze ist durch vorhandene Verschmutzungen das aerodynamische Gleichgewicht gestört) jedoch keine direkte Gefahr für die Leistung des späteren Wellenleiters dar, da sie die Lichtführung im Kern nicht beeinflussen, solange kein direkter Kontakt zum Kern besteht. Durch maschinenseitige Anpassungen der Druckstrategie (Moderate Gasparametereinstellungen, keine zu hohen oder zu niedrigen Abstände zum Substrat) und hohe technische Sauberkeit (vor allem der Druckdüse) kann dieses Fehlerbild weitestgehend vermieden werden.

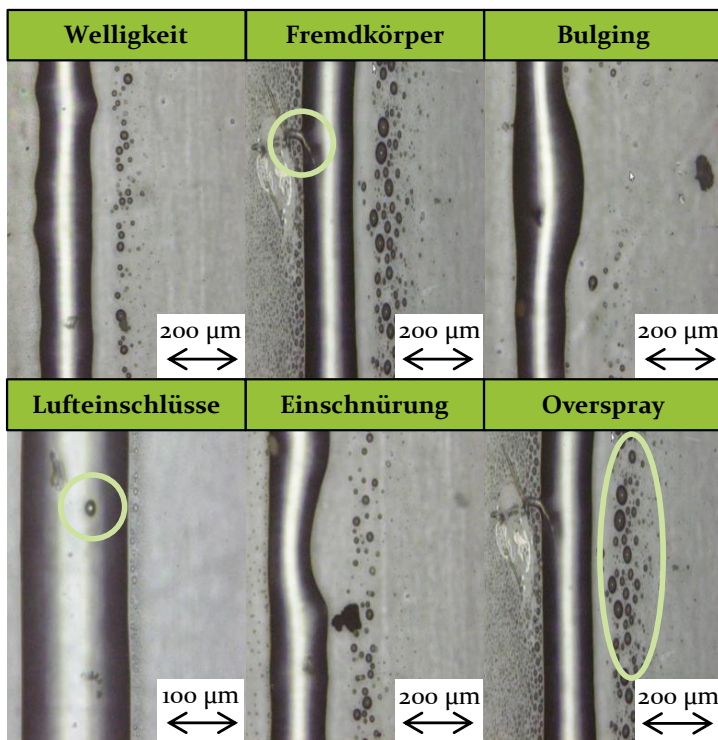


Bild 46: Fehlerbilder bei der Herstellung POW im OPATVER-Verfahren und mögliche Lösungsstrategien.

4.7 Lebensdauercharakterisierung anhand klimatischer Dauerlaufuntersuchungen

Um die hergestellten polymeren Lichtwellenleiter auf deren Eignung im industriellen Einsatz zu qualifizieren, werden diese diversen Klimauntersuchungen unterzogen. Hierbei werden die Qualitätsmerkmale Maßhaltigkeit des Wellenleiters, mechanische Haftfestigkeit (Kapitel 4.8) sowie optische Dämpfung (Kapitel 4.9) auf deren Langzeitzuverlässigkeit geprüft.

Bei der Durchführung einer Normenrecherche stellt sich heraus, dass keine expliziten Normen für gedruckte Wellenleiter existieren. Eine der recherchierten Normen, welche für die hergestellten POW anwendbar erscheint und im Bereich der Luftfahrt Einsatz findet, ist DIN EN (Europäische Norm) 61300-2-XX (Lichtwellenleiter – Verbindungselemente und passive Bauteile – Grundlegende Prüf- und Messverfahren Teil 2). Hierbei werden folgende Prüfungen durchgeführt:

- 1) DIN EN 61300-2-18:
Hochtemperatur Dauerprüfung, 96 h bei 60 °C
- 2) DIN EN 61300-2-19:
Feuchte Luft, 96 h bei 93 % relative Feuchte und einer Temperatur von 40 °C
- 3) DIN EN 61300-2-22: (Kategorie C)
Temperaturwechsel, fünf Zyklen im Temperaturbereich von -10 °C bis 60 °C
- 4) DIN EN 61300-2-22: (Kategorie E)
Temperaturwechsel, 12 Zyklen im Temperaturbereich von -40 °C bis 85 °C

Bei den Versuchsdurchführungen 3) und 4) wird der Lichtwellenleiter jeweils eine Stunde auf der Minimal- bzw. Maximaltemperatur gehalten. Im Übergangsbereich erfolgt eine Abkühlung bzw. Erwärmung der Versuchskammer mit einem Grad Kelvin pro Minute bei einer Toleranz von $\pm 0,2$ °K. Bei den Versuchsdurchführungen 1) bis 3) kann bei den insgesamt 17 untersuchten Lichtwellenleitern keine maßgebliche Veränderung in der Geometrie festgestellt werden. Die Oberflächenrauheit und Welligkeit sind ebenfalls unverändert. Es können lediglich neue Ablagerungen in Form von Schmutz auf der Oberfläche identifiziert werden.

Für die mit einem Versuchsumfang von 13 unter den Bedingungen 4) behandelten Wellenleitern werden die Ergebnisse der Höhenmessung in Bild 47 dargestellt. Hierbei handelt es sich um Wellenleiter unterschiedlicher Chargen (Druckparametereinstellungen). Wesentlich hierbei ist die

gleichbleibende Anzahl der Lagen von zehn und der nachgelagerte Aushärteschritt.

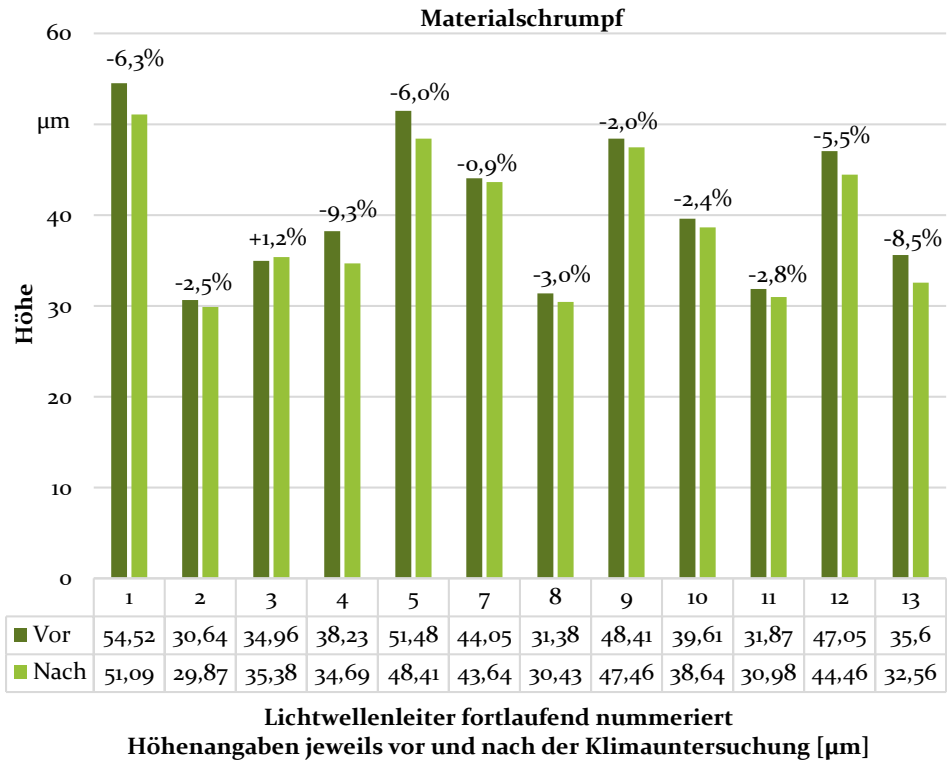


Bild 47: Materialschrumpf bei DIN EN 61300-2-22: Temperaturwechsel, zwölf Zyklen im Temperaturbereich von -40°C bis 85°C .

In Bild 47 ist die im Laser-Scanning-Mikroskop gemessene Höhe an jeweils derselben Stelle für die o.g. Wellenleiter dargestellt. Beim Vergleich der Messwerte vor und nach der Klimabelastung ist zu erkennen, dass die Werte mit Ausnahme des Wellenleiters 3, bei welchem eine Zunahme in der Höhe um $0,426\text{ }\mu\text{m}$ erfolgt, welche aber im Rahmen der Messtoleranz liegt, abnehmen. Der Materialschrumpf beträgt hierbei maximal $3,54\text{ }\mu\text{m}$ bei Probe 4, welcher einer prozentualen Abnahme von $9,3\%$ entspricht. Im Durchschnitt liegt der Schrumpf bei etwa 4% . Die Ursachen hierfür sind das Entweichen von Restluft aus dem Lichtwellenleiter, die Ausgasung noch im Wellenleiter vorhandener Lösungsmittel oder die Nachvernetzung des Polymers.

Es kann somit gezeigt werden, dass die gedruckten POW hinsichtlich ihrer Geometrie durch den Einfluss des Umgebungsklimas lediglich geringen Veränderungen unterworfen sind. Dies ist wiederum bei der Auswahl geeigneter Materialkombinationen für Substrat, Konditionierung, Kern und Mantel zu berücksichtigen. Größere Abweichungen innerhalb des Materialschrumpfs können zum Aufbau von Spannungszuständen im Lichtwellenleiter führen, welche sich negativ auf die optischen und mechanischen Eigenschaften auswirken. Diese Zusammenhänge werden in den Kapiteln 4.8 und 4.9 näher untersucht.

4.8 Mechanische Charakterisierung der gedruckten Strukturen

Soll eine Funktionsschicht auf dem Grundwerkstoff haften, so kann dies durch verschiedene Mechanismen erfolgen. Diese sind mechanische Verklammerung, Diffusion, Pseudodiffusion, Adhäsion und chemische Bindung. Bei der mechanischen Verklammerung kommt es zu einer formschlüssigen Verbindung durch die Beschichtung von Kavernen, Hohlräumen und Hinterschneidungen im Grundwerkstoff. Die Diffusion beruht auf der gegenseitigen Löslichkeit von Grundwerkstoff und Schichtmaterial. In einer Interdiffusionszone gleichen sich die Konzentrationen beider Werkstoffe an. Die Pseudodiffusion hingegen beruht nicht auf dem Konzentrationsausgleich, sondern auf dem Einbringen von Atomen des Schichtwerkstoffs in den Grundwerkstoff infolge äußeren Energieeintrags. Erfolgt die Haftung durch Adhäsion, so haften Grundwerkstoff und Schicht aufgrund der Wechselwirkungen zwischen elektrischen Dipolen, sogenannten Van-der-Waals-Kräften, aneinander. In diesem Fall hängt die Haftfestigkeit von der Stärke dieser Wechselwirkungen ab. Chemische Verbindungen zwischen den Werkstoffen führen ebenfalls zur Haftung. Dabei können sich metallische, ionische oder kovalente Bindungen ausbilden, die in dieser Reihenfolge bezüglich ihrer Stärke ansteigen. [79, 80]

Der Haftungsmechanismus und die Haftkraft von und auf Kunststoffen können dabei in vielen Fällen durch eine Manipulation der Substratoberfläche eingestellt werden. Die Aktivierung durch Plasma, welche die Bildung polarer Funktionsgruppen an der Werkstoffoberfläche begünstigt, kann zur verbesserten Schichthaftung aufgrund von Adhäsion beitragen. Eine weitere Option besteht in der Ozonisierung des Substrats. Obwohl auch bei der Plasmabehandlung Ozon entstehen kann, ist es möglich, dieses gezielt für die Oberflächenbehandlung zu nutzen. Eine Möglichkeit, eine Oberfläche mit Ozon zu behandeln, ist hierbei die Bestrahlung mit

UV-Licht. Die kurzwellige, hochenergetische UV-Strahlung ruft die Bildung von Ozonmolekülen aus dem Umgebungssauerstoff hervor. Diese sehr instabilen Moleküle zerfallen zeitnah wieder in Sauerstoffmoleküle mit zwei Sauerstoffatomen und hochreaktive freie Sauerstoffradikale. Gleichzeitig werden durch die Strahlung Bindungen im molekularen Netzwerk des bestrahlten Polymers aufgebrochen. Die so erzeugten aufgebrochenen Bindungen werden mit Atomen beziehungsweise mit (Sauerstoff-) Radikalen aus der Umgebung gesättigt und gehen neue Bindungen ein. Hierbei kommt es zur Bildung von Hydroxyl-, Carbonyl-, oder Carboxyl-Gruppen und damit verbesserter Adhäsion. [79, 80]

Scherkraftmessung

Um die Haftfestigkeit der gedruckten Wellenleiter auf dem Substrat zu bestimmen, wird eine Scherkraftmessung mit einem Schertester XYZTEC Condor 150-3 durchgeführt. Für die Messungen wird ein Meißel mit einer Breite von 0,6 mm eingesetzt. Die Scherfestigkeit τ_{aB} lässt sich durch die Formeln (19) und (20) ermitteln. [68, 81]

$$\tau_{aB} = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (19)$$

$$S_0 = b_{Meißel} \cdot b_{Bahn} \quad (20)$$

F_{max} ist dabei die gemessene Maximalkraft und S_0 die abgescherte Fläche. Zur Ermittlung von S_0 wird die Kontaktlinie zwischen der Leiterbahn und dem Meißel mit der Breite der Bahn multipliziert. Für die Scherkraft ergibt sich somit beispielsweise eine Scherfläche von 0,6 mm x 0,35 mm, bei einem Abstand der Konditionierungslinien von 350 µm. Generell muss bei Scherkraftmessungen berücksichtigt werden, dass eine plastische Verformung der POW (Bruch) in Form einer Schneid- oder Reißkraft mitgemessen wird, die das eigentliche Ergebnis (Scherkraft) der Messung erhöht. Bei einer Stichprobenanzahl (n) von 25 werden die in nachfolgender Tabelle 10 aufgezeichneten Messwerte ermittelt.

Die Nomenklatur 10L bzw. 6L bezeichnen jeweils die Anzahl der gedruckten Lagen, HT steht für Hochtemperatur, FL für Feuchte-Luft und Z für Temperaturzyklus. Festgehalten werden zudem der maximale bzw. minimale Weg in µm sowie die maximale und minimale Kraft in cN bis es zum Bruch kommt. Die Anzahl der Proben wird im Reiter Umfang angegeben. Zusätzlich wird in der Spalte elastisch dokumentiert, wie viele der untersuchten Probekörper nicht abgeschert werden konnten, da lediglich eine

elastische Verformung (nach Erreichen des maximalen Schermeißelwegs bricht der Wellenleiter nicht, sondern kehrt in die Ausgangsposition zurück) eintritt (siehe Bild 48).

Tabelle 10: Übersicht über die ermittelten Kräfte und Wege der durchgeführten Scherkraftmessung.

Bezeichnung	max. Weg [µm]	min. Weg [µm]	max. Kraft [cN]	min. Kraft [cN]	Umfang	elastisch
10L	109	104	200	162	4	1
6L	104	76	145	110	4	2
10L HT	240	208	145	130	4	0
6L HT	176	80	220	120	3	0
10L FL	512	508	185	160	3	0
6L FL	174	128	255	150	3	0
10L Z	288	272	375	280	2	0
6L Z	192	144	240	155	2	0

In Tabelle 10 werden also zum einen die Scherkraft und damit die Haftung der Lichtwellenleiter auf dem Substrat ermittelt und zum anderen die möglichen Auswirkungen der klimatischen Nachbehandlung auf diese untersucht. Hierbei kommen die in Kapitel 4.6 als 1) bis 3) bezeichneten Prüfnormen zur Anwendung.

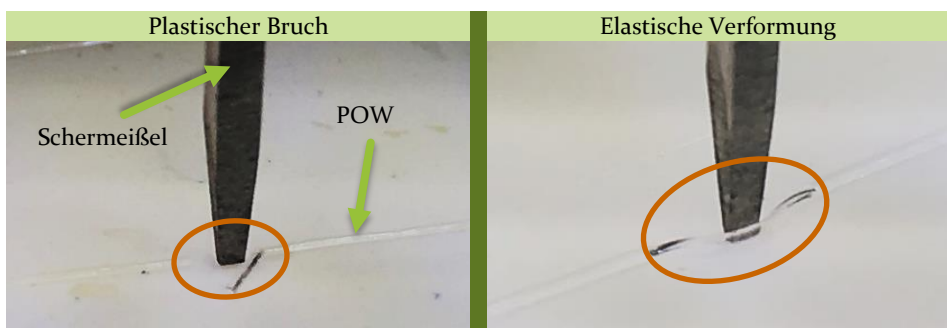


Bild 48: Darstellung der beiden beobachtbaren Bruchcodes für POW beim Einsatz der Scherkraftmessung zur Charakterisierung der Haftfestigkeit.

Elastische Verformung kann in Tabelle 10, nur bei den nicht klimatisch ausgelagerten Lichtwellenleitern, festgestellt werden. Dies ist ein weiterer Beleg dafür, dass durch eine nachgelagerte klimatische Behandlung unvollständige Vernetzungsreaktionen bzw. thermische Aushärtemechanismen einsetzen, welche in einer gesteigerten Sprödigkeit des Wellenleiters resultieren. Tendenziell können bei den nachbehandelten Wellenleitern höhere Scherkräfte gemessen werden. Bei Verwendung der Formeln (21) und (22), bezogen auf die gemessenen Scherkräfte, ergeben sich Scherfestigkeiten zwischen $5,24 \text{ N/mm}^2$ und $17,86 \text{ N/mm}^2$. Diese große Streuung der Messwerte, lässt keine wissenschaftlich fundierte Aussage über die Haftung der POW auf dem PMMA-Substratmaterial zu. Bei einem Vergleich dieser Scherfestigkeiten mit den in der Literatur vorhandenen Werten für Klebstoffe (da keinerlei Referenzwerte für gedruckte Wellenleiter vorhanden sind), scheinen die erhaltenen Ergebnisse jedoch durchaus valide. In [82] werden für Leitklebstoffe Scherfestigkeiten $> 5 \text{ N/mm}^2$ gefordert. Dieser Grenzwert kann in jedem Fall eingehalten werden. Für die Chipmontage durch den Einsatz von Klebstoffen werden in [81] Scherfestigkeiten von $10,5 \text{ N/mm}^2$ bis $18,5 \text{ N/mm}^2$ gefordert. In diesen Wertebereich fallen zumindest über 40 % der gemessenen Proben.

Da die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die vorhandene Literatur nicht exakt gegeben ist, sollen die erhaltenen Werte als Basis für künftige Forschungsaktivitäten im Bereich additiv hergestellter Lichtwellenleiter dienen. Um ein anschauliches Beispiel zur Einordnung der Haftfestigkeit zu geben, kann festgehalten werden, dass es nicht oder nur unter großer Mühe möglich ist, den Lichtwellenleiter händisch vom PMMA-Substrat zu trennen.

Die Anzahl der gedruckten Lagen scheint keinen Einfluss auf die resultierende Haftfestigkeit zu haben. Dies ist darin zu begründen, dass nur die untere Kreissegmentfläche mit definierter Breite in direktem Kontakt zum Substratmaterial steht. Sobald diese vollständig mit Material gefüllt ist, wirken sich darüber liegende Schichten weder positiv noch negativ auf die Haftung aus.

4.9 Funktional optische Charakterisierung der gedruckten Strukturen

Die optische Charakterisierung der POW ist essentiell, um deren Eignung für den praktischen Einsatz als Signal- und Datenübertragungsmedium zu qualifizieren und erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Technischen Universität Dresden.

Hierbei wird die Transmission des Materials ermittelt, die Intensitätsverteilung im Wellenleiter analysiert, die optische Dämpfung gemessen und die Bitfehlerrate nachrichtentechnisch erfasst.

Transmissionsmessung

Die Transmission des Kernmaterials stellt die Grundlage für eine Verwendung als optisches Signal- und Datenübertragungsmedium dar. Hierbei wird Licht in einem Wellenlängenbereich bis 2000 nm durch eine ausgehärtete Testgeometrie geleitet und die austretende Lichtintensität mit der des Referenzstrahls verglichen. Es zeigt sich, dass der verwendete Drucklack J+S 390119 eine durchgehend hohe Lichtdurchlässigkeit von > 91 % im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1100 nm besitzt, welcher auch das erste optische Fenster bei 850 nm inkludiert (siehe Bild 49). Nach einem geringen Abfall erreicht die Transmission am zweiten optischen Fenster bei 1300 nm ein lokales Maximum von über 91 %. Auch im dritten für die High-Speed-Datenübertragung wichtigen Wellenlängenbereich bei 1550 nm werden fast 90 % Transmission erreicht. Ein signifikanter Rückgang erfolgt erst ab etwa 1650 nm. Durch diese Messung kann aufgezeigt werden, dass der eingesetzte Drucklack für eine Vielzahl optischer Anwendungen (Signal-, Datenübertragung, Sensor) verwendet werden kann. Speziell die hohe Transmissionsrate im Bereich des ersten optischen Fensters bietet die Möglichkeit Wellenlängenmultiplexer (Wavelength Division Multiplexing, WDM) mit den additiv hergestellten POW aufzubauen. Diese ermöglichen eine bilaterale Kommunikation über einen Wellenleiter durch die Nutzung verschiedener Wellenlängen. Dies ist darüber hinaus bei Wellenlängen im zweiten oder dritten optischen Fenster möglich. [83]

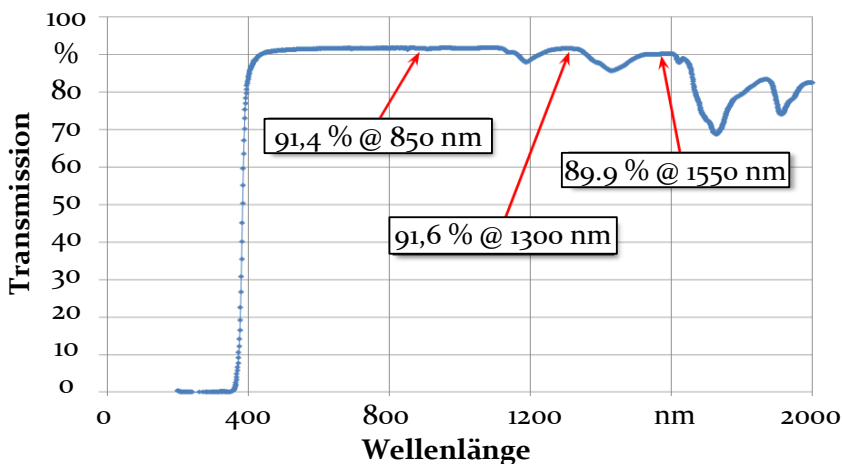


Bild 49: Graphische Darstellung der Transmission von J+S 390119 für Wellenlängen bis 2000 nm.

Analyse der Intensitätsverteilung im Wellenleiterkern

Um die Intensitätsverteilung eines POWs mit der in Bild 50 oben dreidimensional dargestellten Geometrie zu vermessen, wird der mittig in gleicher Abbildung befindliche Aufbau verwendet. Hierbei wird mit Hilfe einer Einkoppelfaser Licht in den Wellenleiterkern eingeleitet und dessen Intensitätsverteilung an dessen Ende durch einen CCD (Charge-Coupled Device) Beam Profiler (Ophir SP620U), welcher über eine Vergrößerungsoptik in Form einer Linse (SPZo8260) verfügt, messtechnisch erfasst.

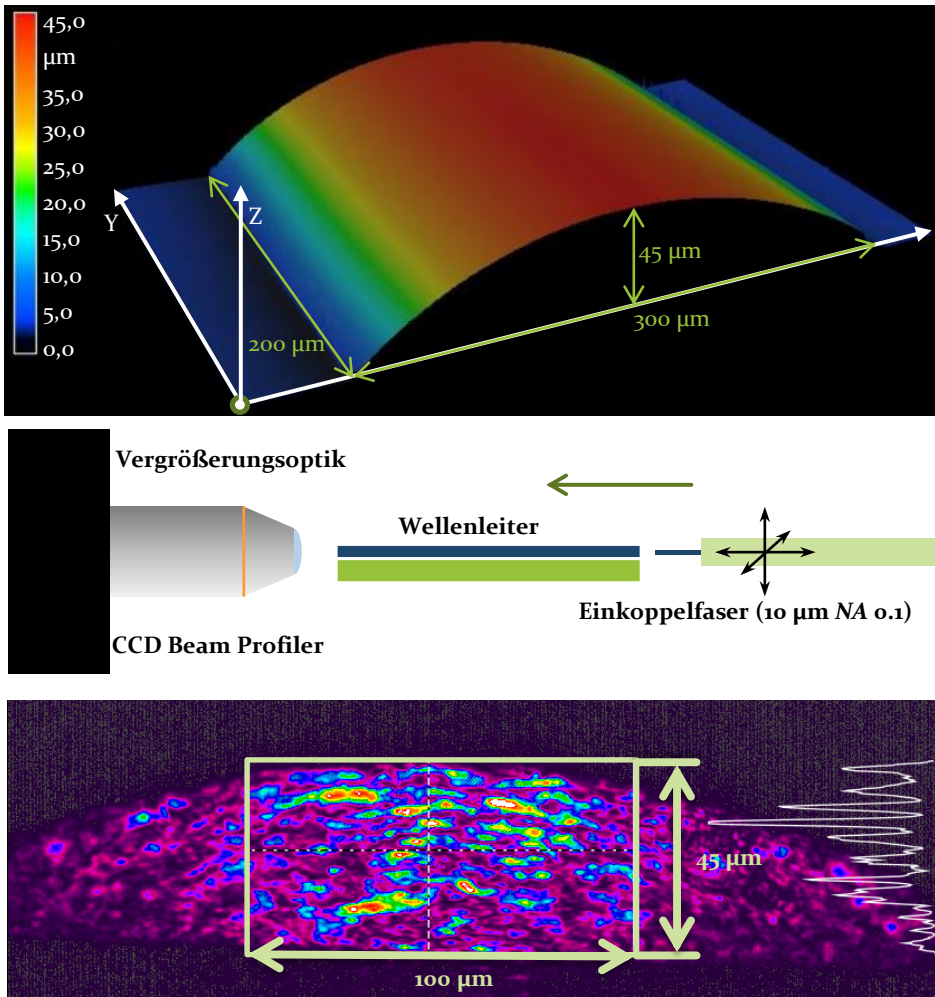


Bild 50: Analyse der Intensitätsverteilung im Lichtwellenleiter. Dreidimensionale laser-scanning-mikroskopische Darstellung eines Teilstücks des vermessenen Lichtwellenleiters (oben); schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (Mitte); Intensitätsverteilung an der Lichtwellenleiterausgansseite (unten).

Das von der verwendeten Software ausgegebene Ergebnis der in Bild 50 (unten) dargestellten Analyse zeigt, dass etwa 72 % des eingekoppelten Lichts maßgeblich in der Mitte des Wellenleiters (grünes Rechteck) verbleibt und nur geringe Anteile in die Randbereiche gestreut werden. Dies kann zusätzlich durch die im Rahmen von [P3] durchgeführten Raytracing-Simulationen gestützt werden, da hier vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Somit ist die Breite von über 300 μm verglichen mit lithographisch erstellten Lichtwellenleitern geringerer Breite (meist 50 μm bis 100 μm) zwar weiterhin ein geometrischer Nachteil, im Hinblick auf die optischen Eigenschaften jedoch keinesfalls. Eine Integration in typische Multimode-Netzwerke, bei denen Anschlusskomponenten mit Durchmessern von 50 μm bis 100 μm verwendet werden, kann somit ohne größere Verluste erfolgen. Weiterhin kann aufgezeigt werden, dass kein Licht in das verwendete PMMA-Substratmaterial auskoppelt.

Die Stirnflächenpräparation kann mit der in [84] beschriebenen Methode (mechanisches Abknicken der Folie an definierter Stelle) durchgeführt werden. Dabei ist die Qualität der gebrochenen Stirnfläche mit der einer polierten vergleichbar. Zudem ermöglicht dieser Prozessschritt die Einsparung von Arbeitszeit und Ressourcen.

Dämpfungsmessung

Bei der Dämpfungsmessung wird die in Bild 51 illustrierte Einfügemethode verwendet, bei der mit einer 10 μm Einkoppelfaser (NA 0,1) Licht definierter Wellenlänge (850 nm) in das zu untersuchende Wellenleiterteilstück eingekoppelt wird, woraufhin mit einer 400 μm Detektionsfaser (NA 0,39) das am Ausgang vorhandene Licht erfasst wird.

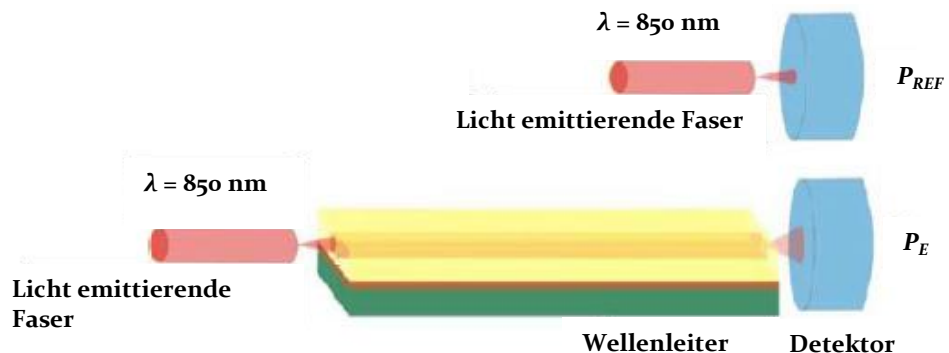


Bild 51: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Dämpfungscharakterisierung der gedruckten Lichtwellenleiter. [P8]

Als Detektor selbst kommt eine Thorlabs Ulbrichtkugel S140C zum Einsatz. Verglichen wird dabei die gesamte übertragene Leistung von 1150 μW im Verhältnis zur Leistung mit zwischengeschaltetem Wellenleiterstück. Mit dem direkten Vergleich zur Referenzmessung kann somit die Dämpfung abhängig von der Länge des Wellenleiterteilstücks ermittelt werden.

Am Beispiel durchgeführter Messungen mit $n = 33$ ergeben sich die in Tabelle 11 aufgeführten Dämpfungswerte. Hierbei wird jedem Wellenleiter eine fortlaufende Nummer (Nr.) zugeteilt. Zudem wird eine geometrische Messung des Teilstücks (Länge) durchgeführt. Anhand der am Detektor erfassten Ausgangsleistung kann schließlich die Dämpfung berechnet werden.

Tabelle 11: Ermittelte Dämpfungen abhängig von deren Länge und Ausgangsleistung.

Nr.	Länge	Ausgangsleistung	Dämpfung	Nr.	Länge	Ausgangsleistung	Dämpfung
	[mm]	[μW]	[dB/cm]		[mm]	[μW]	[dB/cm]
1	54	72	2,23	18	51	380	0,94
2	60	250	1,10	19	61	70	1,99
3	62	510	0,57	20	61	27	2,67
4	61	90	1,81	21	63	61	2,02
5	62	470	0,63	22	62	259	1,04
6	63	39	2,33	23	62	98	1,72
7	63	331	0,86	24	62	107	1,66
8	63	126	1,52	25	64	54	2,08
9	51	380	0,94	26	62	105	1,68
10	63	171	1,31	27	63	97	1,70
11	62	135	1,50	28	62	740	0,31
12	62	147	1,44	29	63	866	0,20
13	54	314	1,04	30	64	236	1,07
14	49	388	0,96	31	63	516	0,55
15	60	530	0,56	32	62	69	1,97
16	63	462	0,63	33	64	167	1,31
17	63	805	0,25				

Die Werte bewegen sich dabei zwischen 2,67 dB/cm als Maximalwert und 0,20 dB/cm als Minimalwert. Der Mittelwert beträgt 1,29 dB/cm bei einer Standardabweichung von 0,65 dB/cm. Die resultierenden, teilweise massiven Abweichungen in der übertragbaren Lichtleistung lassen sich auf die im Vorfeld bereits beschriebenen Problemstellungen (Verschmutzung,

Unregelmäßigkeiten innerhalb der Konditionierung, Massedurchflussschwankungen im AJ-Verfahren) zurückführen. Dessen ungeachtet kann hiermit aufgezeigt werden, dass die im OPTAVER-Prozess hergestellten POW für den Einsatz als Kurzstreckenübertragungsmedium verwendet werden können. Bei einer möglichen industriellen Umsetzung ist vor allem auf den Aufbau der Druckmaschinen innerhalb einer Reinraumumgebung zu achten. Zudem entfallen bei einer geschlossenen und durchgängigen Fertigungslinie notwendige Transport- und Verpackungstätigkeiten, die weitere potentielle Beschädigungsquellen der POW darstellen. Aktuell werden von der Folienkonditionierung über den Wellenleiterdruck bis hin zur optischen Charakterisierung mindestens zwei solche Distributionschritte durchgeführt.

Umweltsimulation und deren Auswirkung auf die optische Dämpfung

An fünf der ursprünglich 33 charakterisierten Proben werden in einem weiteren Schritt Klimatests durchgeführt, um deren möglichen Auswirkungen auf die optische Dämpfung zu quantifizieren. Die Proben werden nach DIN EN 61300-2-22 (Temperaturwechsel, 12 Zyklen im Temperaturbereich von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $85\text{ }^{\circ}\text{C}$) behandelt und im Anschluss optisch charakterisiert. Die Messergebnisse sind in Bild 52 graphisch dargestellt.

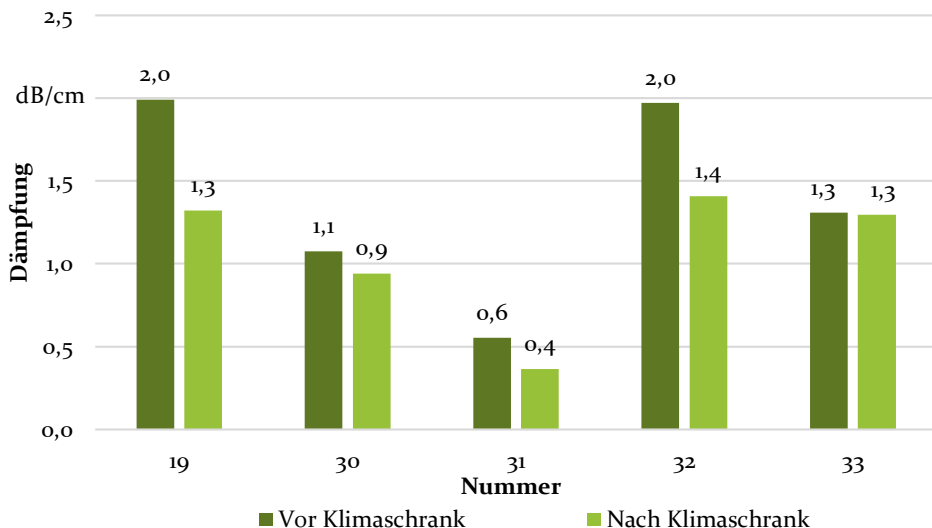


Bild 52: Graphische Darstellung der Dämpfungsveränderung durch die Umweltsimulation. [S14]

In Bild 52 sind die Dämpfungswerte der fünf ausgewählten Proben jeweils vor und nach der Lagerung im Klimaschrank dargestellt. Dabei lässt sich

ein zumindest leichter Trend hin zur Verbesserung der optischen Eigenschaften erkennen.

Bereits im Kapitel 4.7 konnte durch die Auslagerung der Proben unter Umwelteinfluss ein geringer Materialschrumpfung beobachtet werden. Die unter dem Temperatureinfluss stattfindende Nachvernetzung des Polymers unter Abbau bzw. Ausgasung von Lösungsmittel und Restluft führt somit zu einer Verbesserung der optischen Eigenschaften.

Nachrichtentechnische Charakterisierung

Um die im Aerosol-Jet-Verfahren additiv hergestellten Wellenleiter abschließend für deren Anwendung im Datentransfer oder der Telekommunikation zu qualifizieren, werden die möglichen Datenübertragungsraten bestimmt. Zur messtechnischen Erfassung wird, wie in Kapitel 2.1.3 theoretisch beschrieben, verfahren. Es erfolgt die Ermittlung des Q-Faktors durch Auswertung des am Oszilloskop aufgezeichneten Augendiagramms. Über diesen wird mit Formel (16) die *BER* approximiert. Die Untersuchung selbst erfolgt unter Verwendung der Wellenlängen 850 nm sowie 1550 nm, wobei zur Dateneinkopplung bei 1550 nm im aktuellen Versuchsaufbau lediglich eine Singlemode-Faser zur Verfügung steht. Dies kann durchaus negative Einflüsse auf die Messergebnisse haben. Die Analyse der Augendiagramme erfolgt für die Übertragung von 5 Gbit/s – womit es bereits problemlos möglich ist, Ultra High Definition (UHD-) (4096 x 2048 Bildpunkte, 4K-) Videosignale zu übertragen –, 7,5 Gbit/s und 10 Gbit/s. Für die Versuchsdurchführung als Testobjekt (Device Under Test, DUT) wird der Lichtwellenleiter Nr. 29 aus Tabelle 11, mit einer Dämpfung von 0,2 dB/cm eingesetzt. Die dabei erhaltenen Augendiagramme und Bitfehlerraten sind in Bild 53 dargestellt. Die Messung erfolgt zudem bei unterschiedlichen Leistungspegeln. Für ein optimal ausgerichtetes Setup bei -8,5 dBm und $\lambda = 850$ nm soll der Funktionsnachweis für eine reale fehlerfreie Datenübertragung ohne Fehlerkorrektur erfolgen. Um aber den Fall einer möglichen leicht fehlerhaften Ausrichtung nicht unberücksichtigt zu lassen, erfolgt die Messung zudem bei -10 dBm. Für $\lambda = 1550$ nm wird die Messung bei -27 dBm durchgeführt. Darüber hinaus wird für beide Wellenlängen eine Referenzmessung ohne Lichtwellenleiter durchgeführt, mit der die erhaltenen Ergebnisse verglichen werden können.

Aus Bild 53 geht hervor, dass die im Rahmen dieser Arbeit additiv hergestellten Lichtwellenleiter für die Datenübertragung bis 10 Gbit/s eingesetzt werden können. Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass auch eine Verbindung mit Singlemode-Fasern ohne Leistungseinbußen möglich ist. Die Augendiagramme zeigen durchweg klare, geöffnete Strukturen. Lediglich

bei -10 dBm und $\lambda = 850$ nm konnten leicht erhöhte Bitfehlerraten erfasst werden, wobei auch hier nur jedes 20.000 Bit fehlerhaft übertragen wird, wobei dies in der Praxis für die meisten Anwendungen ausreichend ist. Weiterhin kann festgehalten werden, dass die BER für $\lambda = 1550$ nm um eine 10er Potenz verringert wird.

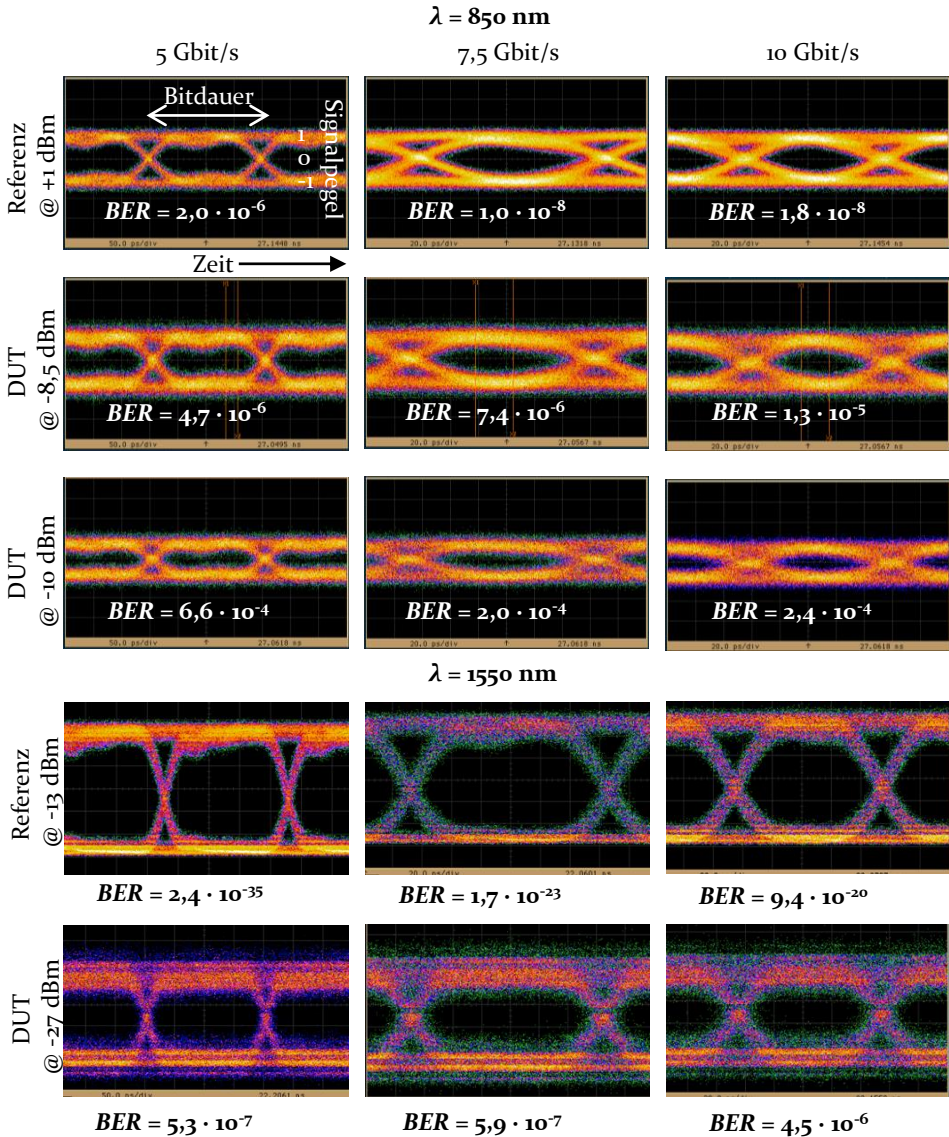


Bild 53: Darstellung der resultierenden Augendiagramme und BER für die Wellenlängen 850 nm (oben) bzw. 1550 nm (unten), bei den Datenübertragungsraten 5 Gbit/s, 7,5 Gbit/s und 10 Gbit/s sowie verschiedenen Leistungspegeln.

5 Beiträge zur Modellierung des Gesamtprozesses für eine Prädiktion der geometrischen und optischen Güte

Innerhalb des Teilprojekts 6 der Forschergruppe OPTAVER wird der Versuch unternommen, den Gesamtprozess der Lichtwellenleiterherstellung durch das in Bild 54 illustrierte Prozessmodell darzustellen. Über die in Kapitel 4 erhaltenen Versuchsergebnisse hinaus ist es hierzu notwendig den Aerosol-Jet-Prozess bestmöglich abzubilden, um eine Prädiktion des Druckresultats zu realisieren. Hierzu werden in der Folge ein Berechnungsmodell und eine simulative Abbildung der Druckdüse beschrieben. [P11]

In Bild 54 erfolgt ausgehend von tiefgehendem Prozessverständnis (5-M-Analyse) die Beschreibung des Lichtwellenleiters durch seine geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften sowie durch den charakteristischen Aufbau. Anhand dieser Kriterien ist es möglich, die optische, werkstoffliche und physikalische Qualität des Wellenleiters zu definieren. Das Ziel hierbei ist der Aufbau eines funktionierenden Regelkreises, bei dem es beispielsweise möglich ist, die Dämpfung des Lichtwellenleiters durch Änderungen an der Prozessführung, wie etwa längere UV-Härtung, nachzuregeln.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Prozess durch die in Kapitel 3.3 durchgeführte 5-M Analyse sowie der damit verbundenen Versuchsdurchführung weitestgehend beschrieben werden. Die geometrische Beschreibung (Profil, Höhe, Breite, Länge) wird durch die in Kapitel 5.1 eingeführte Berechnungsmethode ermöglicht. Unter Einhaltung der Maßnahmen zur Bekämpfung der in Kapitel 4.6 definierten Fehlerbilder, können parasitäre Effekte, wie etwa Overspray oder Defekte, vermieden werden. Anhand der detaillierten Beschreibung des Aerosol-Jet-Drucks in Kapitel 3.2 können die maschinenseitig notwendigen Spezifikationen für die Materialauswahl und die Gestaltung der Baugruppe vorgenommen werden. Die direkten Auswirkungen auf die Qualität gilt es in weiterführenden Arbeiten zu quantifizieren. Die Grundlagen hierfür konnten in Form der Evaluierung geeigneter Qualifizierungsmethoden, wie etwa der Einfügemethode zur Messung der optischen Dämpfung, geschaffen werden. In Form der vorgenommenen Umweltuntersuchungen und Scherkraftmessungen konnte zudem die Eignung der POW für die alltägliche Nutzung nachgewiesen werden.

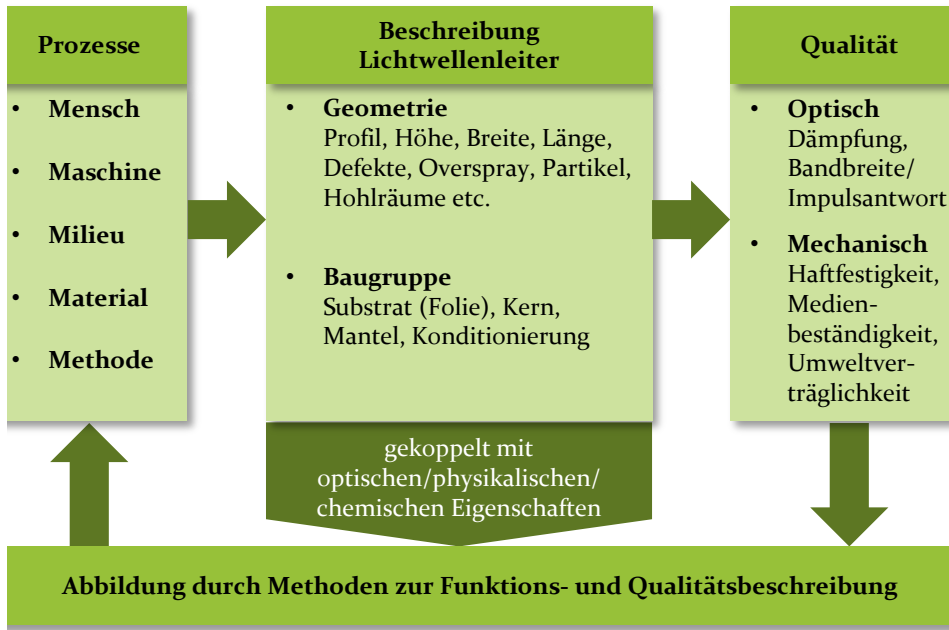


Bild 54: Darstellung des Prozessmodells zur Herstellung von POW als in sich geschlossener Regelkreis.

5.1 Berechnungsmodell Kreissegment

Wie in Bild 55 dargestellt, kann ein direkter Zusammenhang zwischen der Querschnittsfläche des gedruckten Wellenleiters und der Idealgeometrie eines Kreissegments, identifiziert werden. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird im Folgenden hergeleitet, wie, ausgehend von Leiterbahnbreite s und dem Kontaktwinkel Θ , das notwendige Materialvolumen berechnet werden kann, bevor ein Fluten der Konditionierungslinien eintritt.

Hieraus kann dann nach Messung des aktuellen Materialdurchflusses die Geschwindigkeit des Druckvorgangs abgeleitet werden. Dieser Schritt ist wichtig, um Bulging aufgrund von zu hohen Mengen an appliziertem Kernmaterial zu vermeiden. Darüber hinaus besteht somit das Potential Ressourcen zu schonen und gleichzeitig den entstehenden Kontaktwinkel zwischen konditionierter Folie und Lichtwellenleiterkern zu maximieren. Ohne das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Berechnungsmodell ist der Aufbau von Wellenleitern im OPTAVER-Verfahren nicht reproduzierbar durchführbar, weshalb diesem eine essentielle Bedeutung zukommt.

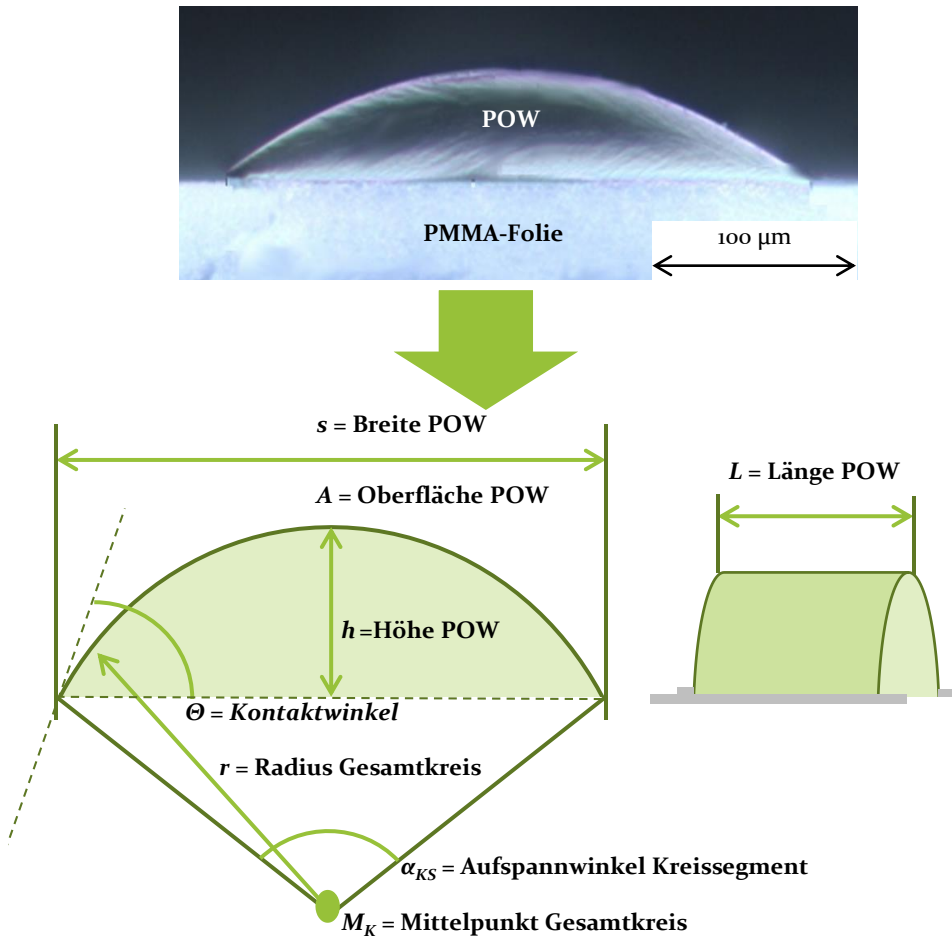


Bild 55: Ableitung des mathematischen Modells von der realen Ausprägung der POW. Lichtmikroskopische Darstellung der Wellenleiterform (oben); geometrische Beschreibung eines Kreissegments (unten). [S12]

Basis für das im Folgenden dargestellte mathematische Berechnungsmodell ist der, wie in Kapitel 3,1 dargestellt, messtechnisch ermittelte Kontaktwinkel zwischen Kern- und Konditionierungsmaterial von $\Theta = 61,4^\circ$ [P6]. Mit gegebenem Kontaktwinkel und dem Abstand zwischen den beiden Konditionierungslinien, welche durch mikroskopische Vermessung evaluiert werden sollten, lässt sich die Problemstellung geometrisch, wie in Bild 56 dargestellt, lösen. [85]

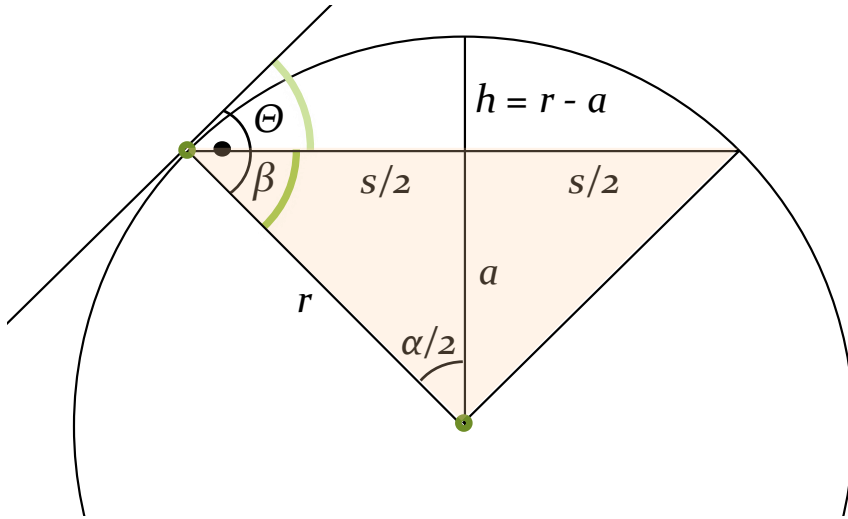


Bild 56: Geometrische Grundlagen zur Berechnung der Lichtwellenleiterhöhe in Abhängigkeit des Kontaktwinkels Θ und des Abstands zwischen den Konditionierungslinien s .

Zunächst wird β nach (21) bestimmt.

$$\beta = 90^\circ - \Theta \quad (21)$$

Die Winkelsumme im Dreieck ist 180° . Abzüglich der 90° des rechten Winkels und β ergibt sich $\alpha/2$ nach (22). Folglich ist $\alpha/2 = \Theta$.

$$\alpha/2 = 90^\circ - \beta \quad (22)$$

Hiermit kann der Radius r des Kreises über (23) berechnet werden.

$$r = \frac{0,5 \cdot s}{\cos(\beta)} \quad (23)$$

Über r und $\sin(\beta)$ kann mit Hilfe von (24) a ermittelt werden.

$$a = r \cdot \sin(\beta) \quad (24)$$

Anschließend lässt sich mit (25) die theoretisch maximale Höhe h berechnen.

$$h = r - a \quad (25)$$

Um nunmehr auf die einzustellende Druckgeschwindigkeit schließen zu können, muss, wie in Kapitel 4.1 vorgestellt, der aktuelle Materialdurchfluss bestimmt werden. Durch Multiplikation des Mittelpunktswinkels α mit

dem Kreisradius r und der Länge des POWs L kann das Volumen V für das Kreissegment bestimmt werden. Um jedoch auf das Volumen des POWs schließen zu können, muss vom vorhandenen Ergebnis noch die Fläche des Dreiecks (siehe Bild 56: rötlich hinterlegtes Dreieck) zwischen Kreismittelpunkt und s abgezogen werden.

$$V = L \cdot \left(\pi \cdot r^2 \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} - \frac{s \cdot a}{2} \right) \quad (26)$$

Die Gesamtmasse m dieses Volumens kann über (27) mit Hilfe der Dichte ρ des Kernmaterials bestimmt werden.

$$m = V \cdot \rho \quad (27)$$

Die Materialauftragsdauer t_M kann nach (28) bestimmt werden.

$$t_M = \frac{m}{q_M} \quad (28)$$

Die somit an der Maschine einzustellende Vorschubgeschwindigkeit v_V kann über die Länge des Lichtwellenleiters L und die Materialauftragsdauer nach (29) berechnet werden.

$$v_V = \frac{L}{t_M} \quad (29)$$

Am praktischen Beispiel eines im OPTAVER-Verfahren hergestellten Wellenleiters mit typischer Geometrie ($\Theta (\triangleq \alpha/2) = 61,4^\circ$ und $s = 300 \mu\text{m}$) ergeben sich für das hier dargestellte Berechnungsverfahren folgende Zahlenwerte:

- 1) $r = 170,85 \mu\text{m}$
- 2) $a = 81,78 \mu\text{m}$
- 3) $h = 89,06 \mu\text{m}$
(Aspektverhältnis Höhe zu Breite von 0,297)
- 4) $V = 1.140.818.562,87 \mu\text{m}^3$ (mit $L = 60.000 \mu\text{m}$)
- 5) $m = 1,24 \text{ mg}$
(mit $\rho = 1,09 \text{ g/cm}^3$ bei J+S 390119 und $T_{\text{Tinte}} = 40^\circ\text{C}$; siehe Bild 57)
- 6) $t_M = 62,17 \text{ s}$
(mit $q_M = 0,02 \text{ mg/s}$)
- 7) $v_V = 57,91 \text{ mm/min}$

Die resultierende Geschwindigkeit kann in einem weiteren Schritt auf die Anzahl der Lagen aufgeteilt werden. Bei zehn Lagen muss somit eine

Geschwindigkeit von 579,1 mm/min eingestellt werden. Die in Bild 57 dargestellten Messdaten werden mit einem kinematischen Viskosimeter der Marke SVM 3001 erhoben.

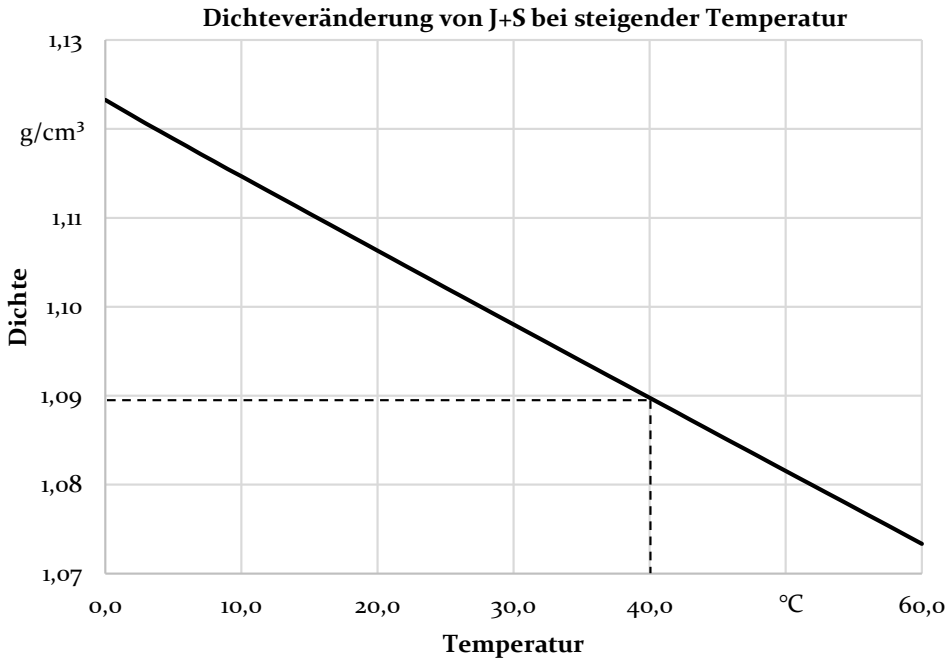


Bild 57: Graphische Darstellung der gemessenen Dichteveränderung von J+S bei steigender Temperatur.

Theorie und Praxis weichen in diesem Punkt jedoch weit voneinander ab. So können aufgrund mehrerer Störfaktoren keine Kontaktwinkel von $61,4^\circ$ erreicht werden, da es sich nicht um ideal glatte Oberflächen handelt. Hier kommt der Pinning-Effekt zum Tragen, welcher das Einstellen eines festen Kontaktwinkels aufgrund von Kanten und chemischen Inhomogenitäten (unterschiedliche Oberflächenenergien) verhindert und somit die in (30) definierte Kontaktwinkelhysterese hervorruft. Θ_{vor} bezeichnet hierbei den vorschreitenden und $\Theta_{rück}$ den rückschreitenden Kontaktwinkel. Vereinfacht ausgedrückt wandert der Kontaktwinkel also in der Praxis ständig zwischen diesen beiden Extrema hin und her. [86]

$$\Delta\theta = \theta_{vor} - \theta_{rück} \quad (30)$$

In der Oberflächenphysik werden noch weitere Effekte, Gleichungen und Theorien genutzt, um die auf rauen Oberflächen auftretenden Phänomene besser beschreibbar zu machen (Wenzel-, Cassie Baxter Gleichung, elasto-

kapillare Längenänderung etc.), auf welche jedoch hier nicht im Detail eingegangen wird [86]. Ein weiterer Störfaktor ist die Temperaturveränderung des Lacks beim Durchlauf durch das Gesamtsystem und der damit verbundenen Dichteänderung beim Auftreffen auf das jeweilige Substratmaterial. Zudem haben weder die Konditionierung noch der gedruckte Kern ideal glatte Oberflächen, weshalb auch die Berechnung anhand eines Kreissegments eine Näherung darstellt. Auch das im flüssigen Ausgangsmaterial noch vorhandene Lösemittel, welches erst später bei der Aushärtung ausgetrieben wird, muss hierbei berücksichtigt werden. Aufgrund dieser in der oben durchgeführten Rechnung nicht berücksichtigten Einflussfaktoren werden in der Praxis Kontaktwinkel von etwa 40° erreicht (siehe Bild 14). Dies entspricht einer Erniedrigung des realen Kontaktwinkels von über 30 % und sollte für die abschließende Geschwindigkeitsberechnung stets berücksichtigt werden. [86]

5.2 Simulative Abbildung des AJ-Prozesses durch Betrachtung der Durchflussverhältnisse im Inneren der Druckdüse

Die Abbildung des Druckprozesses in der Simulation vermittelt ein tiefgehendes Prozessverständnis. Im Zentrum steht dabei ein detaillierter Blick ins Innere der Druckdüse, wo sich die Fokussierung des Aerosols durch das Umhüllungsgas vollzieht. Da es sich bei der Druckdüse um ein geschlossenes System handelt und somit eine messtechnische Erfassung der Strömungsverhältnisse im Inneren nicht möglich ist, bildet die Simulation die einzige verfügbare Möglichkeit, die Realität abzubilden. Auch der Austritt des Material-Gas-Gemischs aus der Düsenspitze sowie dessen Verhalten werden simulativ abgebildet. In diesem Zusammenhang werden die wichtigsten Fragestellungen bezüglich der genauen Strömungsverhältnisse von AS und UG beantwortet:

- 1) Wie verhält sich UG, nachdem es durch einen einzigen Einlass in den Druckkopf gefördert und dort aufgeteilt wird?
- 2) Ist eine homogene Umhüllung zur Vermeidung der Berührung des tropfenbeladenen AS und damit verbunden zur Vermeidung von Verstopfung bzw. Tropfenbildung möglich?
- 3) Welche Beschleunigungen erfahren die Gasströme beim Durchgang durch die Druckdüse und welche resultierende Geschwindigkeit kann am Ausgang der Düsenspitze ermittelt werden?

Mithilfe der im Folgenden durchgeführten Simulation ist es zudem möglich, konstruktive Fehler im Gesamtsystem aufzudecken und mögliche Optimierungspotentiale zu erschließen. Für eine physikalisch sinnvolle numerische Abbildung komplexer fluid-dynamischer Vorgänge ist eine fundierte Kenntnis sowohl der strömungsmechanischen Grundgleichungen als auch der numerischen Behandlung notwendig, weshalb diese im Folgenden eingehend betrachtet werden. Zur anschaulichen Darstellung wird von der Indexnotation unter Verwendung der Einstein'schen Summenkonvention Gebrauch gemacht. [87]

5.2.1 Strömungsmechanische Grundlagen

Als Grundlage der Strömungssimulation dienen die Erhaltungsgleichungen, welche den Erhalt von Masse, Energie und Impuls beschreiben. Durch die Vernachlässigung thermischer Effekte kann die Energieerhaltung bei vielen technischen Strömungen, so auch bei den in dieser Arbeit untersuchten, unberücksichtigt bleiben, da zwischen 20 °C und 40 °C keine nennenswerten Dichte- oder Strahlungszustandsänderungen stattfinden. Die in (31) dargelegte allgemeine Massenerhaltung für kompressible Fluide besagt, dass die zeitliche Änderung der Dichte ρ mit der Summe der über ein infinitesimales Volumenelement herrschenden Massenströme im Gleichgewicht steht. [87, 88]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (31)$$

U_i steht hierbei für die Geschwindigkeit und x_i für die Raumrichtung. Als Massenstrom werden alle zu- und abfließenden Ströme bezeichnet [88, 89]. Die Impulserhaltungsgleichung (32) basiert auf dem zweiten Newtonschen Gesetz. Somit muss die Summe aus zeitlicher Änderung des Impulses in j -Richtung und dem konvektiven Transport gleich den angreifenden Volumen- und Oberflächenkräften sowie dem molekülbedingten Impulseintrag sein. [88, 89]

$$\rho \left(\frac{\partial U_j}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) = \rho g_j - \frac{\partial P}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (32)$$

Die Variable g umfasst hierbei wirkende Beschleunigungen, wie etwa die Erdbeschleunigung, P den vorherrschenden Druck im Fluid und τ_{ij} den Gesamtimpulseintrag. Der Gesamtimpulseintrag τ_{ij} ist, wie in (33) dargestellt, von der Viskosität μ des Fluids und den vorliegenden Geschwindigkeitsgradienten abhängig. [88, 89]

$$\tau_{ij} = -\mu \left[\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] + \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (33)$$

Hierbei stellt μ die dynamische Viskosität des Fluids und δ_{ij} das Kronecker-Symbol dar, sodass $\delta_{ij} = 1$ für $i = j$ und $\delta_{ij} = 0$ für $i \neq j$ gilt [88, 89].

In einer Vielzahl an technischen Strömungen sind diverse Annahmen zulässig, welche die Komplexität des zu lösenden Gleichungssystems, bestehend aus Massen- und Impulserhaltung, weiter vereinfachen, ohne nennenswerte Fehler einzubringen. Flüssigkeiten und Gase, deren Fließgeschwindigkeit weit unterhalb der Schallgeschwindigkeit des jeweiligen Mediums liegen, können als inkompressibel betrachtet werden [88]. Inkompressibilität bedeutet in diesem Fall, dass Druckänderungen zu keinen nennenswerten Dichte- und Volumenänderungen des betrachteten Fluids führen. Somit kann die Dichte als konstant betrachtet werden, wodurch sich die Massenerhaltung aus (31) zu der in (34) dargestellten Divergenzfreiheit vereinfacht. [88]

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (34)$$

Durch diese Bedingung verschwindet auch der zweite Term der rechten Seite aus (32). Für Newtonsche Fluide, deren dynamische Viskosität nicht von der Scherrate abhängt, wird die Impulsgleichung somit zu der in (35) dargestellten Form vereinfacht, wobei $\nu = \mu/\rho$ für die kinematische Viskosität steht. [88]

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = g_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i^2} \quad (35)$$

5.2.2 Schließungsproblematik der Turbulenzmodellierung

Das aufgestellte Gleichungssystem ist geschlossen, da für die vier Unbekannten P und U_i vier Gleichungen vorliegen. Durch geeignete Diskretisierung der Gleichungen und Anwendung dieser auf einem Rechengebiet mit physikalisch sinnvollen Rand- und Anfangsbedingungen kann somit eine Strömung vollständig beschrieben werden. Vollständig bedeutet jedoch, dass hierbei auch kleinskalige, turbulente Schwankungen der Strömung miterfasst werden müssen, um ein physikalisch sinnvolles Ergebnis zu erhalten. Der notwendige Aufwand an Rechnerkapazitäten steigt hierbei in

solchem Maße an, dass selbst moderne Supercomputer den vorliegenden Anforderungen nicht genügen. [90]

In vielen technisch relevanten Strömungen sind nicht die Einflüsse turbulenter Fluktuationen von Interesse, sondern die zeitgemittelten Effekte der Strömung. Die hierfür am weitesten verbreitete Herangehensweise ist die Reynolds-Mittelung. Bei dieser wird jede zeitabhängige Variable in einen zeitunabhängigen Mittelwert und einen zeitabhängigen Schwankungsanteil zerlegt. In (36) ist dieser Zusammenhang am Beispiel des Drucks dargestellt. [91]

$$P = \bar{P} + P' \quad (36)$$

Durch Einsetzen dieser Zerlegung in die Ausgangsgleichungen kann die mathematisch korrekte zeitliche Mittelung durchgeführt werden. Aus dem nichtlinearen, konvektiven Anteil der Impulsgleichung entsteht ein neuer Term, welcher in (37) dargestellt ist. [91]

$$\frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{U'_i U'_j}}{\partial x_i} = g_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial x_i^2} \quad (37)$$

Dieser neue Term beinhaltet sechs Unbekannte, für welche es keine weiteren physikalischen Gleichungen gibt. Das Gleichungssystem ist somit nicht mehr geschlossen, der unbekannte Term muss deshalb modelliert werden. Die am weitesten verbreiteten Modelle hierfür beruhen auf der Boussinesq-Approximation, nach welcher die unbekannten Geschwindigkeitsfluktuationen nach (38) über eine Modellvariable an die Geschwindigkeitsgradienten gekoppelt werden. [92]

$$\overline{U'_i U'_j} \stackrel{\text{def}}{=} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) \quad (38)$$

Aus einer Dimensionsanalyse folgt, dass die neu eingeführte Variable ν_t die Einheit einer kinematischen Viskosität haben muss, weshalb sie auch turbulente Viskosität genannt wird. Hierbei handelt es sich um keine Stoffgröße, sondern um eine rein fiktive Variable. Wie realitätsnah ein entsprechendes Turbulenzmodell reale Turbulenzcharakteristika abbildet, hängt davon ab, wie die turbulente Viskosität berechnet wird.

Hierfür und für die Berechnung des lokalen Werts für ν_t , haben sich die Zwei-Gleichungs-Modelle durchgesetzt, welche zwei zusätzliche Transportgleichungen lösen. Das in der Praxis zumeist zur Anwendung kommende Modell ist das k - ε -Modell nach Launder [93], bei welchem eine

Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie k und eine für die Dissipationsrate ε gelöst werden. Aus diesen wird in der Folge die turbulente Viskosität $\nu_t \sim k^2/\varepsilon$ berechnet. Das später von Wilcox [94] vorgestellte k - ω -Modell löst stattdessen neben k eine weitere Gleichung für die spezifische turbulente Dissipationsrate $\omega \sim \varepsilon/k$, wodurch die Vorhersage von Strömungsablösungen an der Wand deutlich verbessert wird. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Definition geeigneter Randwerte für ω entwickelte Menter [95] das k - ω -Shear Stress Transport- (SST-) Modell, welches die Vorteile beider Modelle kombiniert, indem das k - ω -Modell mit steigendem Abstand zu festen Wänden über eine Überblendungsfunktion in ein k - ε -Modell überführt wird. [93, 94, 95]

5.2.3 Modellierung des wandnahen Bereichs

Um das Strömungsverhalten innerhalb des zu modellierenden Bauteils möglichst exakt abzubilden, liegt besonderes Augenmerk auf den wandnahen Bereichen. In diesen entstehen durch die Haftbedingung an der Wand meist die höchsten Geschwindigkeitsgradienten, wodurch hohe Scherraten und hierdurch bedingt starke Fluktuationen auftreten. Die dabei entstehende Grenzschicht muss detailliert beschrieben werden, um technische Parameter wie bspw. Reibungsbeiwerte möglichst präzise bestimmen zu können. [88]

Für die Modellierung selbst sind die beiden Gleichungen (39) und (40) heranzuziehen. Hierbei erfolgt die Darstellung der Geschwindigkeit u^+ und des Wandabstands y^+ dimensionslos.

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (39)$$

Dabei steht $\bar{u}$ für die mittlere wandparallele Geschwindigkeit und u_τ für die Wandschubspannungsgeschwindigkeit.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (40)$$

In (40) bezeichnet τ_w die Wandschubspannung. Mit der wandnormalen Koordinate y und der kinematischen Viskosität ν kann nach der Berechnung der Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ durch (41) y^+ bestimmt werden.

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (41)$$

In turbulenten, wandgebundenen Strömungen stellt sich ein stets identischer Verlauf der dimensionslosen Geschwindigkeit über dem dimensionslosen Wandabstand ein [96]. Dieser Zusammenhang ist in Bild 58 graphisch dargestellt. In direkter Wandnähe bis $y^+ < 5$ ist die Strömung laminar, es dominieren die viskosen Effekte gegenüber den Trägheitseffekten in der Strömung und es gilt der Zusammenhang $u^+ \approx y^+$. Im wandfernen Bereich, ab etwa $y^+ \approx 70 \dots 100$ ist der Zusammenhang, wie in (42) dargestellt, logarithmisch. Dieser Bereich ist somit bereits turbulent, da hier Trägheit dominiert. [96]

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (42)$$

Im dazwischenliegenden Übergangsbereich nimmt der Einfluss der Trägheit konstant zu, das entstehende Strömungsprofil folgt jedoch keinem mathematisch zu definierenden Zusammenhang.

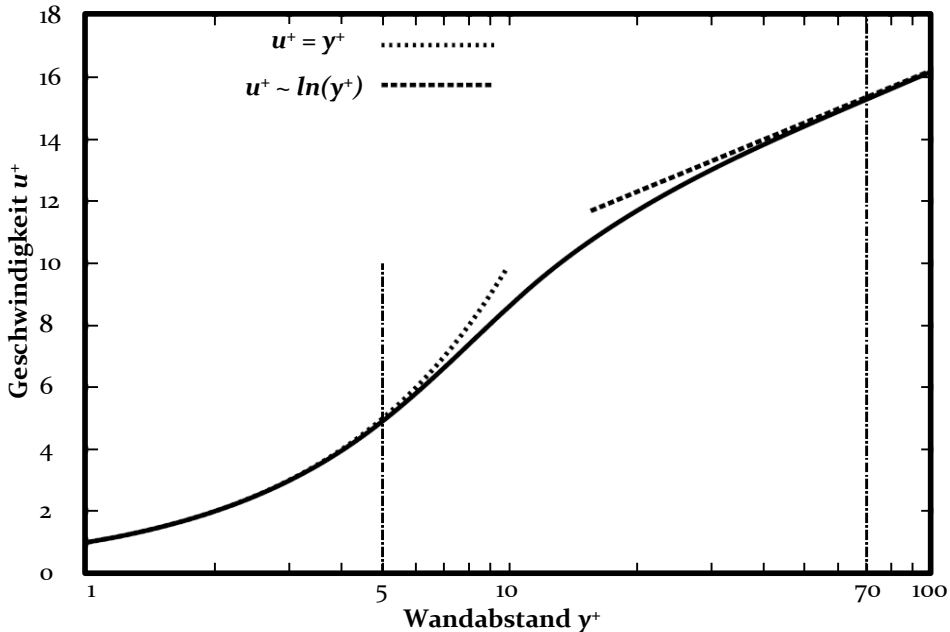


Bild 58: Graphische Darstellung des universellen Wandgesetzes. [96]

Da der in Bild 58 gezeigte Verlauf des Geschwindigkeitsprofils in turbulenten Strömungen allgemeingültig ist, kann dessen Einfluss auf das Strömungsverhalten präzise modelliert werden. Hierbei ist darauf zu achten, die erste Berechnungszelle des Gitters in den logarithmischen Bereich zu legen. Anderenfalls kann die gesamte Grenzschicht aufgelöst werden. In diesem Fall muss der erste Gitterpunkt im Bereich von $y^+ \approx 1$ liegen und es sollten sich insgesamt mindestens zehn Gitterpunkte im Bereich $y^+ < 20$ befinden. [96]

Die Reynoldszahl Re , welche das Verhältnis von Trägheitskräften zu viskosen Kräften repräsentiert und im Allgemeinen über den Zusammenhang $Re = u^* l^* / \nu$ mit der charakteristischen Geschwindigkeit u^* und der charakteristischen Länge l^* berechnet werden kann, sinkt zur Wand hin stark ab. Im Falle der numerischen Auflösung der gesamten Grenzschicht bis zur Wand wird deshalb von einer Low- Re -Modellierung gesprochen. [96]

Wandfunktionen

Durch den Einsatz dieser Funktionen soll die Auflösung der wandnahen Strömungs- und Turbulenzgleichungen umgangen werden. Die Ersparnis von Rechenaufwand, im Vergleich zum Low- Re -Turbulenzmodell, resultiert allerdings im Einbringen von Modellfehlern. Da bei der Verwendung von Wandfunktionen darauf geachtet werden muss, die erste Zelle im logarithmischen Bereich der Strömung zu positionieren und der allgemeine Zusammenhang nur für vollturbulente Strömungen gilt, stellt diese Modellierung keinen geeigneten Ansatz für die in dieser Arbeit untersuchte Strömung dar. [97]

Aufgrund des im Verhältnis zum Düsendurchmesser geringen Massenstroms ist davon auszugehen, dass es Bereiche innerhalb des Druckkopfs gibt, in welchen die Strömung nicht turbulent, sondern laminar ist. Dies wäre durch das Wandmodell nicht abzubilden, weshalb ein unverhältnismäßig großer und schwer abschätzbarer Fehler in die Berechnungen einfließen würde. [97]

Low- Re -Turbulenzmodell

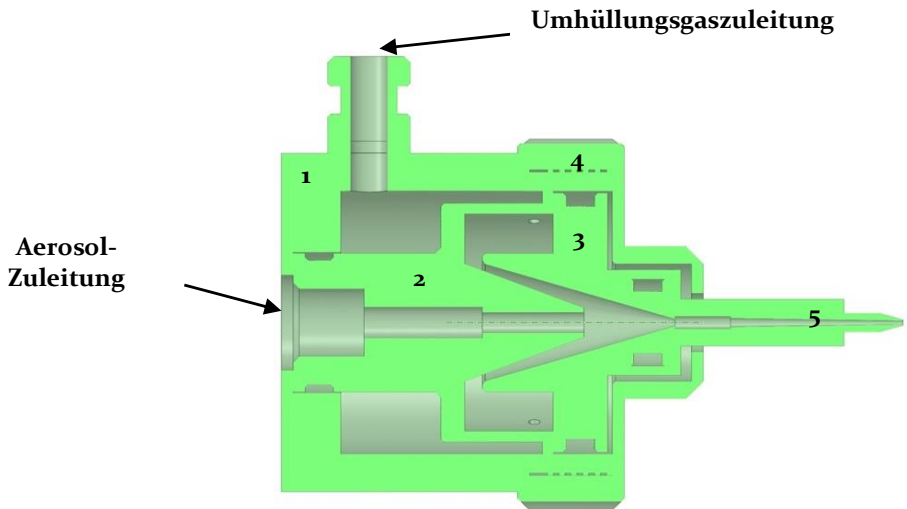
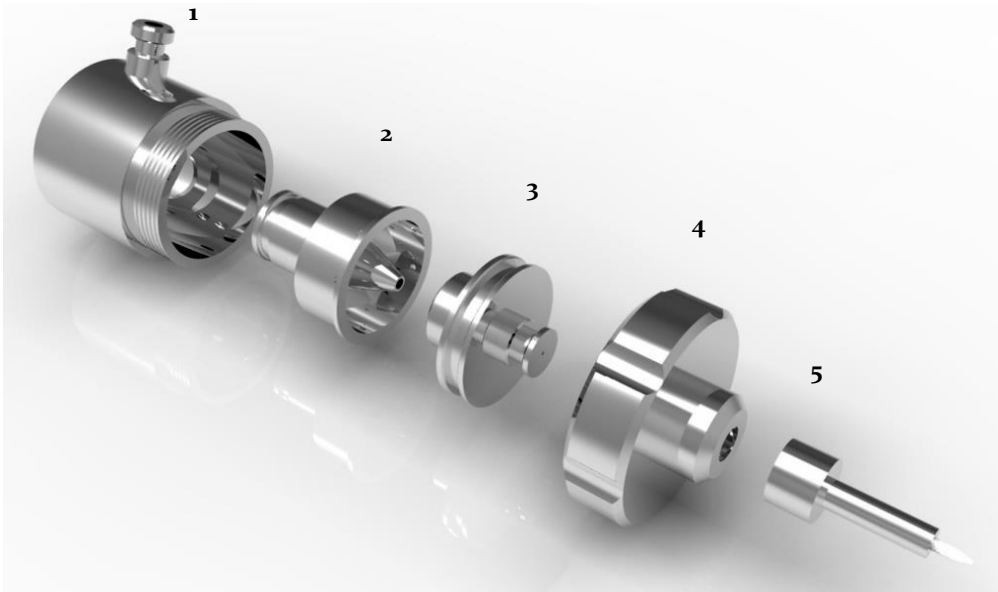
Alternativ zur Modellierung des Einflusses der wandnahen Strömung auf die Hauptströmung durch Wandmodelle, kann die Grenzschicht auch komplett aufgelöst werden. Diese als Low- Re -Modellierung bekannte Herangehensweise ist vor allem bei Strömungen empfehlenswert, welche nicht über den gesamten Betrachtungsbereich hinweg gänzlich turbulent sind. [97]

In diesen Fällen ist die in den Wandmodellen hinterlegte Annahme der turbulenten Grenzschicht nicht weiter gültig. Stattdessen kann die Strömung bis weit über $y^+ = 5$ hinaus laminar bleiben. Wo und ob ein Umschlag ins turbulente stattfindet, ist gerade bei komplexen Geometrien kaum vorherzusagen. In diesen Fällen ist es empfehlenswert, die Grenzschicht durch ein entsprechend feines Netz aufzulösen, um die physikalischen Effekte möglichst präzise abbilden zu können. Das Low- Re -Turbulenzmodell benötigt zwar zusätzliche Elemente in der Grenzschicht, das Ergebnis ist jedoch weitaus exakter, als dies bei Verwendung einer Wandfunktion der Fall ist. [97]

5.2.4 CAD-Modellierung der Düseneinheit

Grundvoraussetzung für die Durchführung der Simulation ist die Erstellung eines CAD-Modells des Grundkörpers sowie der innenliegenden Strukturen. Diese erfolgt in der Modellierungsumgebung SpaceClaim. Hierfür wird der AJ-Druckkopf in seine Systembestandteile zerlegt, laser-scanning-mikroskopisch vermessen und ein digitaler Zwilling erzeugt.

In Bild 59 sind die CAD-Modelle der AJ-Düseneinheit dargestellt. Die Aerosol- und Umhüllungsgas-Zuleitung erfolgt dabei durch die beiden Öffnungen der hinteren Abdeckung (1). Das Inlet (2) ist mit (1) über eine Pressverbindung verbunden, welche mit einem Dichtungsring abgesichert ist. Dabei verhindert (2) den frühzeitigen Kontakt der beiden Gasströme. Des Weiteren besitzt (2) acht über den gesamten Radius gleichmäßig verteilte, etwa einen Millimeter im Durchmesser große Bohrungen, welche das Umhüllungsgas möglichst homogen von außen in das Zusammenführungsmodul (3) einbringen. In (3) treffen beide Gasströme erstmalig aufeinander, wobei der AS mittig eingeleitet und von außen durch UG komprimiert und beschleunigt wird. Hierdurch soll auch eine direkte Berührung der Flüssigkeitströpfchen mit den Systemkomponenten vermieden werden, wodurch einem Verstopfen selbiger vorgebeugt wird. Die Düsenspitze (5) wird von hinten durch die untere Abdeckung (4) geführt. Es erfolgt wiederum ein Pressschluss mit Dichtungsring zwischen (3) und (5). Das Gesamtsystem wird abschließend durch den Schraubverschluss zwischen den Teilen (1) und (4) geschlossen.



- 1) Hintere Abdeckung mit Umhüllungsgas- und Aerosol-Zuleitungsöffnung
- 2) Aerosol-Fokussierungs- und Umhüllungsgasverteilungseinheit
- 3) Zusammenführungseinheit von Aerosol- und Umhüllungsgas
- 4) Vordere Abdeckung
- 5) Düsenspitze

Bild 59: CAD-Modelle der AJ-Düseneinheit. Einzelteile in Explosionsdarstellung (oben); Schnitt durch den Gesamtaufbau (unten). [S15]

5.2.5 Simulationsdurchführung

Um die eigentliche Simulation des Durchflussverhaltens realisieren zu können, sind zudem die nachfolgenden Schritte notwendig:

- 1) Extraktion des Volumenelements und Vernetzung der Düseneinheit (Meshing):

Um mit Hilfe der Meshing Software die innenliegenden Bereiche der Druckdüse vernetzen zu können, wird das Luftvolumen extrahiert. Zudem kann mit einem Schnitt durch den Umhüllungsgaseinlass die Symmetriebedingung der Düse ausgenutzt werden, um die Rechenzeit zu halbieren, ohne nennenswerte Verluste in der Genauigkeit des Ergebnisses in Kauf nehmen zu müssen. Die Auflösung des erstellten Netzes und damit einhergehend das Prädikationsvermögen der Simulation kann somit drastisch erhöht werden. Auf dieser Basis können in der Folge die in den Kapiteln 5.2.1, 5.2.2 und 5.2.3 definierten Differentialgleichungen gelöst werden.

Das Netz selbst besteht dabei aus möglichst einfachen Polygonen. In diesem Zuge besteht die Möglichkeit, das Netz an bestimmten besonders relevanten Stellen, wie etwa den Bohrungen in (2), an denen das Umhüllungsgas in (3) eingeleitet wird und dort auf den Aerosol-Strom trifft oder dem Auslass der Düsen Spitze (5), feiner auszuführen.

- 2) Einstellung der Randbedingungen („boundary conditions“)

Das Setzen der Randbedingungen erfolgt in der Software CFX-Pre. Die hier verwendeten Einstellungen sind „Inlet 1“ für den Umhüllungsgasstrom, „Inlet 2“ für den Aerosol-Strom sowie „Outlet“ für die untere Öffnung der Düsen Spitze. Die resultierenden Geschwindigkeiten für die Einlässe sind 0,085 m/s für das Umhüllungsgas bei 80 sccm Maschineneinstellung und 0,0097 m/s für den Aerosol-Strom bei 60 sccm. Der statische Relativdruck am Auslass sowie der Umgebungsdruck werden auf null Pascal gesetzt. Als Fluid wird Stickstoff eingestellt.

Aufgrund der niedrigen Reynoldszahl von 747 innerhalb der Düsen Spitze wird das SST-Modell inklusive Gamma-Theta-Modell ausgewählt [98]. Um ein qualitativ möglichst hochwertiges Ergebnis zu generieren, werden die Solvereinstellungen auf High Resolution, die Ausführung auf doppelte Präzision und das Zielresiduum auf 10^{-5} gestellt.

3) Lösung der Differentialgleichungen

Anhand der zuvor festgelegten Randbedingungen erfolgt im CFX-Solver Manager die Lösung der Differentialgleichungen. Die Software gibt dabei die Ergebnisse sowohl qualitativ anhand eines Graphen, als auch quantitativ als Zahlenwert aus.

4) Erstellung einer Netzstudie

Ein weiterer Punkt, der bei der wissenschaftlichen Betrachtung der Simulationsergebnisse nicht vernachlässigt werden darf, ist die Korrektheit. Um diese bei der hier durchgeführten Simulation abschätzen zu können, bedarf es der Erstellung einer Netzstudie (siehe Bild 60). Da das durchströmte Volumen für die Lösung des Gleichungssystems in eine finite Anzahl an Volumenelementen unterteilt wird, sind Diskretisierungsfehler unumgänglich. Da diese a priori kaum zu bestimmen sind, bietet der Vergleich der Ergebnisse identischer Simulationen auf unterschiedlich feinen Netzen die Möglichkeit, den Fehler als Funktion der Auflösung abzuschätzen. Somit soll es dem Bediener ermöglicht werden, einen Wertebereich zu definieren, ab welchem keine weitere maßgebliche Veränderung des Resultats durch eine Erhöhung der Anzahl an Netzknoten stattfindet.

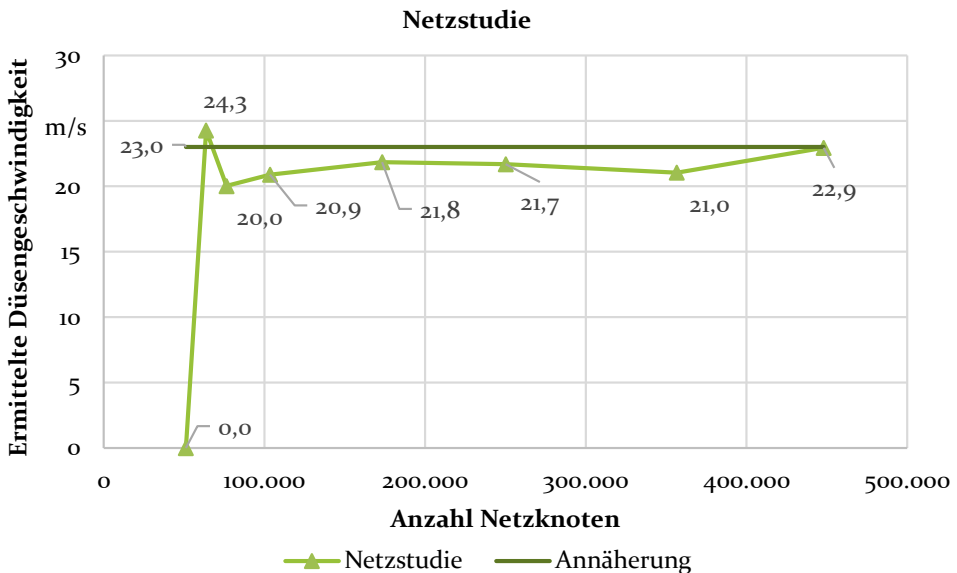


Bild 60: Graphische Darstellung der durchgeführten Netzstudie zur Bestimmung der mittleren Düsendeschwindigkeit. [S15]

In Bild 60 sind die Ergebnisse der Bestimmung der mittleren Düsen geschwindigkeit für acht verschiedene Netzparametereinstellungen mit steigender Knotenanzahl dargestellt. Unterhalb von 50.000 Netzknoten scheint die Auflösung so grob zu sein, dass überhaupt keine Strömung im betrachteten Bereich berechnet werden kann (Geschwindigkeit = 0 m/s). Dies ist mit Hinblick auf eine Geschwindigkeit von 24,3 m/s, bei geringfügiger Erhöhung der Netzknotenanzahl um nur 13.740 ein durchaus beachtliches Ergebnis, auch wenn dieses überhöht, also strömungscharakteristisch ungenügend und fehlerbehaftet ist.

Es zeigt, dass eine geringe Veränderung der Zellanzahl zu einem vollkommen unrealistischen und aus physikalischer Sicht falschen Ergebnis führen kann. Da sich die ermittelte Geschwindigkeit ab 180.000 Netzknoten mit 21,8 m/s einem Simulationsergebnis von etwa 23,0 m/s kontinuierlich annähert, stellt dies die minimal notwendige Anzahl an Netzknoten dar. Hier beträgt der eingebrachte Fehler lediglich weniger als 10 % und wird maßgeblich von Faktoren, wie dem gewählten Turbulenz- und Wandmodell bzw. eingebrachten Rundungs- und Abbruchfehlern, bestimmt. Um jedoch die Abweichungen so gering wie möglich zu halten, wird hier eine Berechnung mit einer Netzknotenanzahl von 450.000 durchgeführt.

5.2.6 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die analytische Betrachtung der Simulationsergebnisse erfolgt mit CFD (Computational Fluid Dynamics) -Post. In Bild 61 sind die Ergebnisse der Strömungssimulation dargestellt. Für die Visualisierung wurde die Domain gespiegelt (zuvor erfolgte ein Schnitt durch den UG-Einlass), um die Strömung in der gesamten Düse darzustellen. Innerhalb des Systems sind nur geringe Geschwindigkeiten bis etwa 2 m/s detektierbar. Erst beim Eingang in die Keramikdüse, mit zunehmender Reduktion des Querschnitts, wird das Prozessgas zum Auslass hin auf bis zu 22,938 m/s beschleunigt. Des Weiteren zeigt die Simulation, dass trotz der seitlichen Einbringung des Umhüllungsgases eine gleichmäßige Gasverteilung über die gesamte Düse hinweg eintritt. Auch sind keine Bereiche innerhalb der Düse, unabhängig zur Entfernung vom Umhüllungsgaseinlass, zu identifizieren, welche eine mehr oder weniger starke Beschleunigung erfahren würden.

Um einen Blick ins Innere der Düse werfen zu können, wird mithilfe der Darstellungsoption Contour eine Fläche ausgewählt, an welcher die Simulation geschnitten wird. Dieser Schnitt wurde in Bild 62 durch den Düsenauslass gelegt.

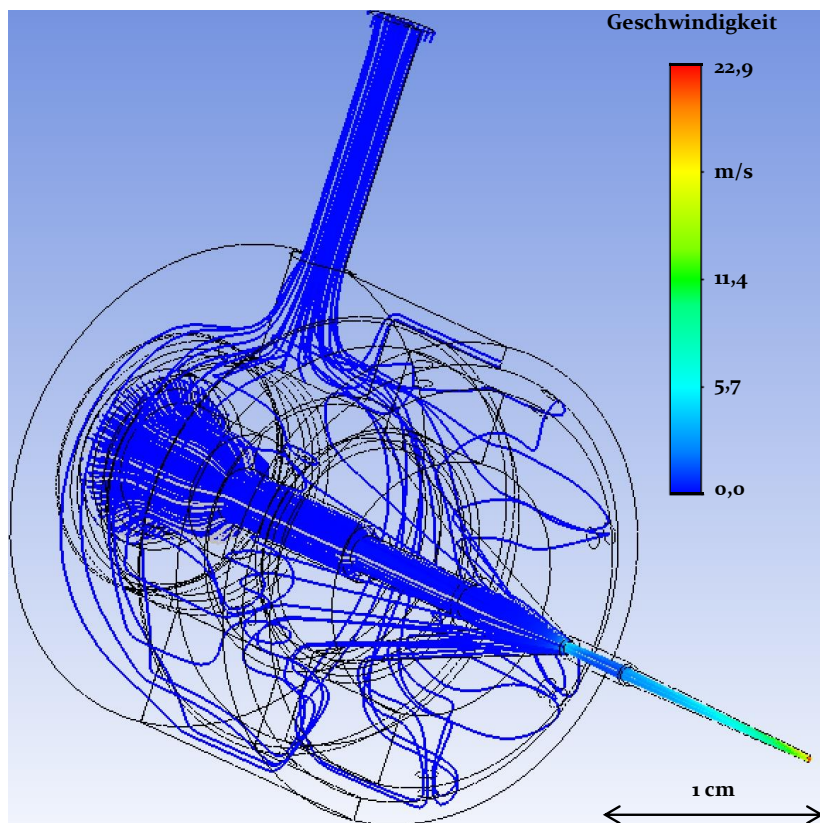


Bild 61: Darstellung der Ergebnisse der Strömungssimulation in ANSYS CFX.

Geschwindigkeit

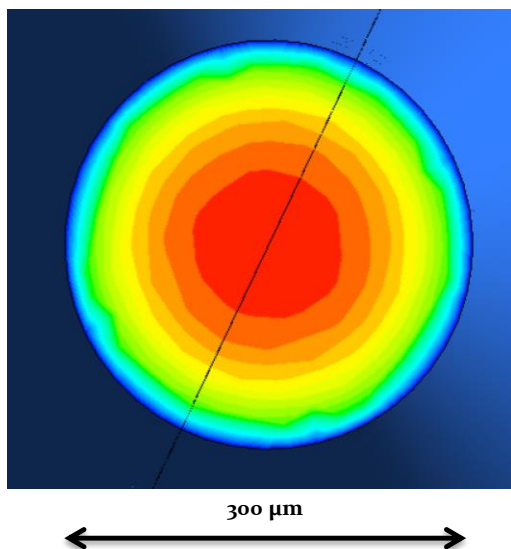
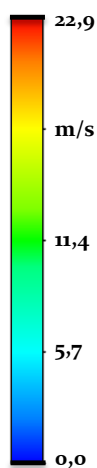


Bild 62: Detailliertere Darstellung der Geschwindigkeitsverläufe beim Düsenaustritt.

In Bild 62 lässt sich der Effekt der gleichmäßigen Aerosol-Verdichtung durch das Umhüllungsgas erkennen. Da es sich in dem hier betrachteten Fall um eine Rohrströmung handelt, ist die direkte Wandgeschwindigkeit 0 m/s (Haftbedingung). Aufgrund der Verdichtung durch UG wird eine direkte Berührung der Düsenwand mit Aerosol verhindert und es findet eine sukzessive Beschleunigung des Volumenstroms in Richtung des Zentrums auf bis zu 22,938 m/s statt. Die in der Simulation erhaltenen Ergebnisse decken sich somit mit dem in der Praxis zu beobachtenden Durchflussverhalten.

Weiterhin gilt es, die Qualität der dargestellten Simulation anhand des y^+ -Parameters zu überprüfen (siehe Bild 63). Anhand dessen lässt sich eine Aussage darüber treffen, ob die Wandgrenzschichtbereiche detailliert genug aufgelöst werden. Bei einem Wert von $y^+ \ll 1$ wird die Wandgrenzschicht exakt aufgelöst. Bei Zunahme dieses Werts verringert sich die Qualität des Modells. In Bereichen, bei denen $y^+ > 5$ ist, sollte das Netz zwangsläufig verfeinert werden, da es hier nicht mehr möglich ist, eine wissenschaftlich fundierte Aussage zu treffen. [88, 96]

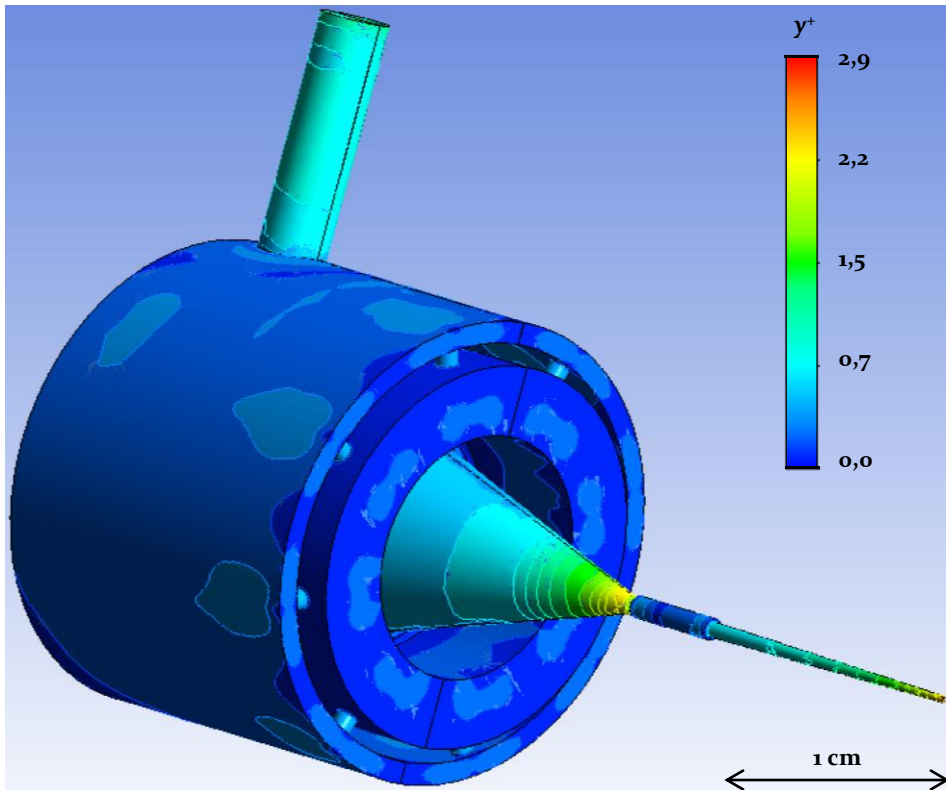


Bild 63: Darstellung der Qualität der Simulation durch die y^+ -Verteilung.

Bild 63 zeigt, dass die ermittelten Höchstwerte von 2,922 im Bereich der Düsenauslassöffnung liegen. Ebenfalls treten am Ende des kegelförmigen Bereichs (Bauteil 2 Bild 59) erhöhte Werte von bis zu 2,153 auf. An diesen beiden Stellen würde somit eine weitere Netzverfeinerung geringfügige Verbesserungen der Simulationsqualität mit sich bringen. In den übrigen Bereichen wurden Maximalwerte von 1,230 berechnet. Das Gesamtergebnis kann somit als valide deklariert werden, weshalb keine weiteren Schritte zur Netzverfeinerung vorgenommen werden müssen.

Als wichtigste Erkenntnisse können somit festgehalten werden:

- 1) Die homogene Aufteilung von *UG* und der gewünschte Effekt einer vollständigen Umhüllung von *AS* treten ein. Eine Berührung von *AS* mit der Düsenwand wird vermieden.
- 2) *AS* kann durch die Geometrie der Düse mit den hier gegebenen Randbedingungen und der zusätzlichen Kompression durch *UG* von 0,0097 m/s auf bis zu 22,938 m/s beschleunigt werden.

6 Zusammenfassung

Die weltweite Nutzung digitaler Daten wird in den kommenden Jahren weiter steigen und voraussichtlich ungeahnte Dimensionen annehmen. Den Zustand „offline“ wird es im Zuge von Industrie 4.0 und der damit verbundenen Vernetzung der Anlagenparks, dem modernen Transportwesen in der Luft, auf der Straße sowie zu Wasser und nicht zuletzt dem modernen Leben mit Smart-Home und ständiger Anbindung an das Internet via Smartphone in der nahen Zukunft wohl nicht mehr geben. Es gilt Mittel und Wege zu finden, die immer größer werdenden Datenpakete zu speichern und möglichst in Echtzeit übertragbar zu machen.

An dieser Stelle setzt die hier durchgeführte Forschungsarbeit an und präsentiert erstmalig die Möglichkeit, polymere optische Wellenleiter durch digitalen Direktdruck am Beispiel des Aerosol-Jet-Drucks auf der jeweiligen Substratoberfläche benutzerdefiniert aufzubringen. Die so erzeugten POW erreichen aktuell einen Transmissionsgrad von über 91 %, Dämpfungsraten von bis zu 0,2 dB/cm und sind in der Lage bis zu 10 Gbit/s zu übertragen, wodurch sie für die notwendige Substitution metallischer Leiter qualifiziert sind.

Anhand der Grundlagen der optischen Datenübertragung erfolgt eine Definition des Begriffs polymerer optischer Wellenleiter (POW) und dessen Abgrenzung zu gängigen Wellenleiterformen (POF, PLWL) durch das verwendete Herstellungsverfahren. Im Anschluss wird der OPTAVER-Prozess und die damit verbundene Prozesskette beschrieben. Bei der Qualifizierung des Herstellungsverfahrens konnten wichtige Grundlagen für zukünftige weiterführende Arbeiten bzw. erste industrielle Anwendungen erarbeitet werden. So können im AJ-Druck POW mit optischer Güte auf dreidimensionalen Oberflächen aufgebaut werden. Es konnten geeignete Materialien (PMMA-Folie; J+S 390119 Drucklack), Prozessparameter ($ZG = 800 \text{ sccm}$; $AB = 740 \text{ sccm}$; $UG = 80 \text{ sccm}$; $d_D = 300 \text{ }\mu\text{m}$; $T_H = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_V = 30 \text{ min}$; 10 Lagen; nachträgliches UV-Aushärten), Qualifizierungs- bzw. Charakterisierungs- (Mikroskopie; Umweltversuche; Schertests; Transmissionsmessung; Dämpfungsmessung; Intensitätsmessung; nachrichtentechnische Charakterisierung) und Modellierungsmethoden (Berechnungsmodell; CFD-Simulation) identifiziert und auf deren Eignung hin evaluiert werden.

6.1 Aktuelle Anwendungen

Die gedruckten POW können bereits heute als asymmetrische, optische Biegekoppler eingesetzt werden, welche es durch eine definierte Kraft und Krümmung erlauben, Licht von einem Modul-POW in einen Bus-POW zu übertragen (siehe Bild 64) [P12]. Die charakteristische kreissegmentförmige Geometrie der POW wirkt sich dabei positiv auf die direkte Kern-Kern-Kopplung aus, da geringe Abweichungen in der X-Y-Positionierung geringere Auswirkungen auf die resultierende Koppelrate haben, als dies bei polygonen, bspw. lithographisch hergestellten, Wellenleitern der Fall ist. Zum Aufbau optischer Netzwerke ist dieses Koppelprinzip von großer Bedeutung, da es über eine feste Kopplung hinaus möglich ist Feldbussysteme aufzubauen, welche bei Bedarf ein- und ausgekoppelt werden können. [99]

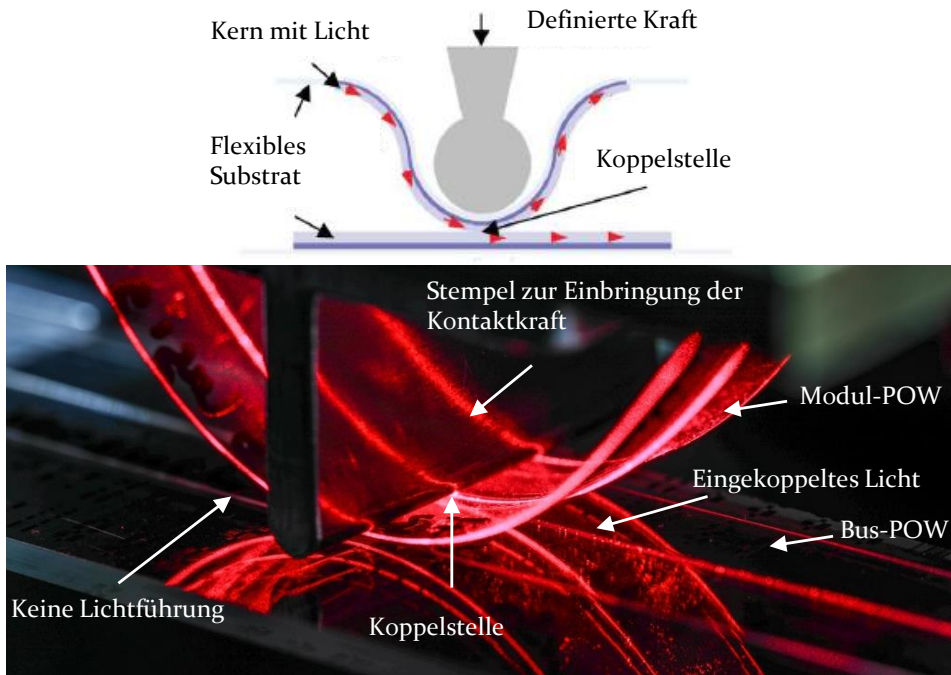


Bild 64: Asymmetrischer optischer Biegekoppler. Schematische Darstellung der Lichtübertragung von einem gebogenen in einen geraden Wellenleiter (oben); Abbildung des realen Aufbaus (unten). [P12, P13]

Weiterhin wurden die gedruckten Wellenleiter bereits erfolgreich als Übertragungsmedium von Musikdaten im MP3-Format eingesetzt. Im Zuge der nachrichtentechnischen Charakterisierung konnte zudem die Eignung der gedruckten POW zur Übertragung von Videosignalen im 4K-Format nachgewiesen werden.

6.2 Zukünftige Arbeiten und Anwendungen

In weiterführenden Arbeiten, welche auf den hier erarbeiteten Grundlagen aufbauen, gilt es diverse Herausforderungen zu begegnen. Zum Aufbringen eines geeigneten Mantelmaterials müssen Verfahren und Materialien qualifiziert werden, welche eine reproduzierbare Applikation einer durchgehenden Decklage mit definiertem Brechungsindex erlauben und weder vom kreissegmentförmigen Kern abfließen, noch eine Materialanhäufung auf selbigem bilden. Weiterhin ist das Aufbringen der Lichtwellenleiter auf 3D-Oberflächen zwar prinzipiell möglich, allerdings erfordert die komplexe Prozessführung noch tiefergehendes Verständnis bezüglich des Fließverhaltens der Werkstoffe und der Adaption des Vorschubs, abhängig von der jeweiligen Oberflächenstruktur (Radius, Steigung). Die softwareseitigen Voraussetzungen für eine durchgehende Prozesskette in dreidimensionaler Umgebung sind jedoch bereits vorhanden. Letztlich müssen auch noch weiterführende Charakterisierungsmaßnahmen etabliert werden, um es der Technologie zu ermöglichen, im industriellen Markt Einsatz zu finden, da hier die Hürden bezüglich Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit, mit teilweise nicht mehr zeitgemäßen, aber weiterhin gültigen Normen und Richtlinien, sehr hoch sind. Letzteres trifft maßgeblich auf die Luftfahrtindustrie zu, ist allerdings auch in der Automobilindustrie und anderen Branchen anzutreffen.

In zukünftigen Anwendungen sollte somit die hier vorgestellte Technologie durchaus berücksichtigt werden, da hierdurch Ressourcen, Material und Gewicht eingespart werden können und darüber hinaus die Möglichkeit besteht, eine voll funktionsfähige optische Versorgungs- und Kommunikationsnetzwerkstruktur an den jeweiligen Bedarf anzupassen. Durch einfache Änderung der Maschineneinstellungen können Länge, Breite, Höhe und Layout sowie damit verbunden die Datenübertragungskapazität manipuliert werden. Schlussendlich zeichnet sich der hier vorgestellte Lösungsansatz durch seine Umweltfreundlichkeit aus, da hier auf den Einsatz von Chemikalien, welche bei Standardverfahren zum Ätzen oder Entwickeln eingesetzt werden, verzichtet werden kann. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind im stark wachsenden Sensormarkt zu finden. Hier können POW direkt und einfach bspw. als Biege-, Dehnungs-, Drucksensoren eingesetzt werden, da eine Krafteinwirkung immer zu einer Veränderung der Intensitätsverteilung im Wellenleiter selbst führt. Letztendlich sind auch verschiedene Applikationsmöglichkeiten in der Beleuchtungstechnik denkbar. Entweder in Form eines gezielten Lichtaustritts am Wellenleiterende oder durch gezielte Einbringung von Fehlstellen an jeder beliebigen Stelle.

7 Summary

The worldwide use of digital data will continue to increase in the coming years and will probably reach undreamt dimensions. In course of Industry 4.0 and associated networking of plant parks, modern transportation in air on road and on water, and last but not least modern life with smart home and constant connection to the internet via smartphone, the status "offline" will probably no longer exist in the near future. The aim is to find ways and means to store ever larger data packets and to make them transferable in real time.

At this point the research work carried out here starts and presents for the first time the possibility of a user-defined applying of polymer optical waveguides by digital direct printing using the example of aerosol-jet-printing on the respective substrate surface. The POWs generated in this way achieve values of transmittance over 91 %, attenuation rates of up to 0.2 dB/cm and are capable of transmitting up to 10 Gbit/s, which qualifies them for the necessary substitution of metallic conductors.

Based on the fundamentals of optical data transmission, a definition of the term polymer optical waveguide (POW) and its differentiation from common waveguide forms (POF; PLWL) is given by the manufacturing process used. Subsequently, the OPTAVER-Process and the associated process chain are described. During the qualification of the manufacturing process, important basics for further work and first industrial applications could be developed. In AJ-printing, POWs with optical quality can be built up on three-dimensional surfaces, but there are still some challenges that have to be met. Suitable materials (PMMA-film; J+S printing varnish), process parameters ($ZG = 800$ sccm; $AB = 740$ sccm; $UG = 80$ sccm; $d_D = 300$ μm ; $T_H = 45$ $^{\circ}\text{C}$; $t_V = 30$ min; 10 layers; subsequent UV-curing), qualification and characterisation (microscopy; environmental tests; shear tests; transmission measurement; damping measurement; intensity measurement; telecommunications characterization) and modelling methods (calculation model; CFD simulation) could be identified and their suitability evaluated.

7.1 Current applications

The printed POWs can already be used today as asymmetric-optical-bus-couplers, which allow light to be transferred from a module-POW to a bus-POW by means of a defined force and curvature (see Bild 65) [P12]. The characteristic circular segment-shaped geometry of the POW has a positive effect on direct core-core coupling, since small deviations in the X-Y positioning have less effect on the resulting coupling rate than is the case with rectangular, e.g. lithographically produced, waveguides. This coupling principle is of great importance for the construction of optical networks, since it is possible to build up field bus systems beyond a fixed coupling, which can be coupled in and out as required. [99]

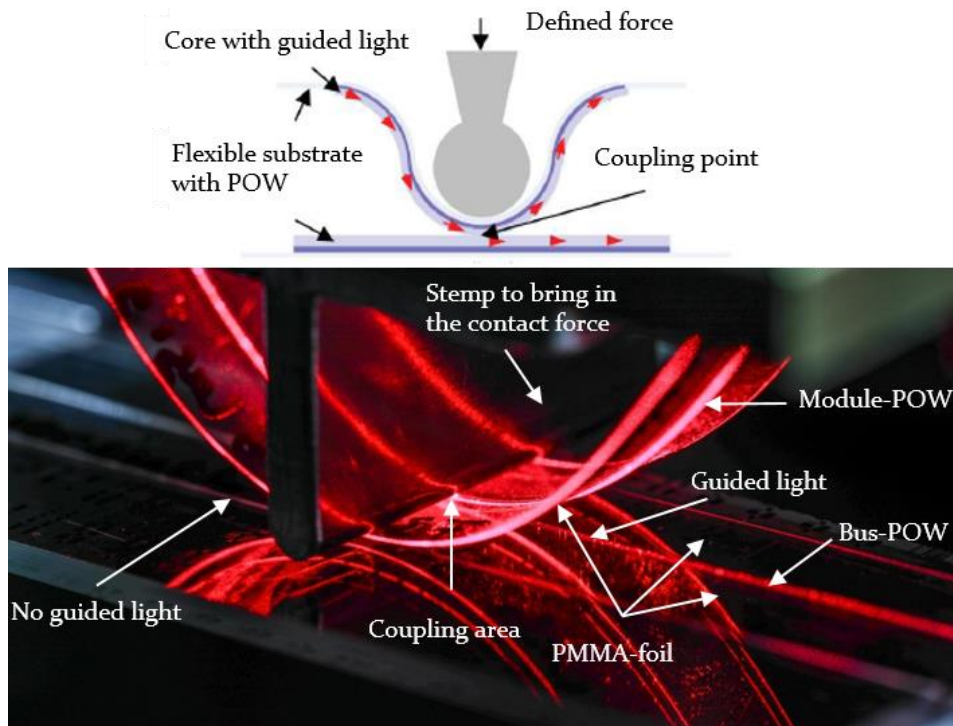


Bild 65: Asymmetric-optical-bus-coupler. Schematic representation of light transmission from a bent to a straight waveguide (top); illustration of the real structure (bottom). [P12, P13]

Furthermore, the printed waveguides have already been successfully used as a transmission medium for music data in MP3-format. In course of communication characterization, the printed POWs could also prove their suitability for the transmission of video signals in 4K-format.

7.2 Further work and future applications

In further work, which builds on the basic principles developed here, various challenges have to be met. For the application of a suitable cladding material, processes and materials have to be qualified which allow a reproducible application of a continuous top layer with a defined refractive index, which neither flows off the circular segment-shaped core nor form a material accumulation on it. Furthermore, the application of the optical fibres on 3D surfaces is possible in principle, but the complex process control requires a deeper understanding of flow behaviour of materials and adaptation of the feed, depending on the respective surface structure (radius, pitch). The required software for a continuous process chain in a three-dimensional environment is already available. Finally, further characterization methods have to be established to enable the technology to be used in industry, since the hurdles in terms of quality, safety and reliability are very high, with standards and guidelines that are no longer up to date but still valid. The latter applies mainly to the aviation industry, but is also to be found in the automotive industry and other sectors.

In future applications, the technology presented here should therefore be taken into account, as it can save resources, material and weight, and it is also possible to adapt a fully functional optical supply and communication network structure to the respective requirements. With a few adjustments of the machine settings, length, width, height and layout as well as the associated data transmission capacity can be manipulated. Finally, the solution approach presented here is characterized by its environmental friendliness, since the use of chemicals, which are used in standard processes for etching or developing, can be avoided. Further applications can be found in the rapidly growing sensor market. Here, POW can be used directly and simply, for example, as bending, strain and pressure sensors, since the impact of force always leads to a change in the intensity distribution of the waveguide itself. Finally, various application possibilities in lighting technology are also conceivable. Either by a controlled emission of light at the end of the waveguide or by selective insertion of defects at any desired position.

Literaturverzeichnis

- [1] Andelfinger, V., Hänisch, T.: Internet der Dinge: Technik, Trends und Geschäftsmodelle. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015
- [2] <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (aufgerufen am 29.05.2020)
- [3] <https://simplecore.intel.com/newsroom/wpcontent/uploads/sites/11/2016/11/automobility.png> (aufgerufen am 30.05.2020)
- [4] Ziemann, O., Krauser, J., Zamzow, P. E., Daum, W.: POF-Handbuch: Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme. Berlin Heidelberg: Springer, 2007, 2. Auflage
- [5] Brückner, V.: Elemente optischer Netze: Grundlagen und Praxis der optischen Datenübertragung. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2011, 2. Auflage
- [6] Zimmermann, W., Schmidgall, R.: Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle, Standards und Softwarearchitektur. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2014, 5. Auflage
- [7] Keller, A.: Breitbandkabel und Zugangsnetze: technische Grundlagen und Standards. Heidelberg: Springer, 2011, 2. Auflage
- [8] <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/glasfaser-ausbau-im-landkreis-nordsachsen-gestartet-567036> (aufgerufen am 03.06.2020)
- [9] Otte, D.: Roadmap iNEMI. Optoelectronics, 2015
- [10] Richter, H.: Elektronik und Datenkommunikation im Automobil. Analytical Report. Institut für Informatik, Technische Universität Clausthal, 2009
- [11] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin Heidelberg: Springer, 1986, 5. Auflage
- [12] Micro resist technology GmbH: Negative Tone Photoresists Epo-Core. Technical Datasheet, Berlin, 2012
- [13] Babel, G.: Bordnetze und Powermanagement: Thermische Modellbildung für elektrische und elektronische Bauelemente. Wiesbaden: Springer, 2019, 2. Auflage

- [14] Feldmann, K., Brand, A.: Analytical and experimental research on assembly systems for molded interconnection devices (3D-MID). In CIRP annals, Vol. 43(1), S. 15-18, 1994
- [15] Zeitler, J., Götze, B., Fischer, C., Franke, J.: Novel approach for the implementation of 3D-MID compatible routing functionalities into computer-aided design tools. In Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Vol. 1038, S. 11-17, 2014
- [16] Goth, C., Kuhn, T., Gion, G., Franke, J.: Hot Pin Pull Method–New Test Procedure for the Adhesion Measurement for 3D-MID. In Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Vol. 1038, S. 115-120, 2014
- [17] Ermantraut, E., Zimmermann, A., Müller, H., Wolf, M., Eberhardt, W., Ninz, P., Kern, F., Gadow, R.: Laser Induced Selective Metallization of 3D Ceramic Interconnect Devices. In 2018 13th International Congress Molded Interconnect Devices (MID), IEEE, S. 1-5, 2018
- [18] Franke, J.: Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID): Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendung für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Hanser, 2013, 1. Auflage
- [19] Craiovan, D.: Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern. Universität Erlangen-Nürnberg: Dissertation, 2012
- [20] Gerhard, C.: Tutorium Optik: Ein verständlicher Überblick für Physiker, Ingenieure und Techniker. Berlin Heidelberg: Springer-Spektrum, 2016, 1. Auflage
- [21] Löffler-Mang, M.: Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, 1. Auflage
- [22] Hering, E., Martin, R.: Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Grundlagen und Anwendungen. München: Hanser, 2017, 1. Auflage
- [23] Naumann, H., Schröder, G., Löffler-Mang, M.: Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik. München: Hanser, 2014, 7. Auflage
- [24] Eberlein, D.: Lichtwellenleiter-Technik. Renningen: Expert-Verlag, 2010, 8. Auflage

- [25] Zolleiß, B.: Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen. Universität Erlangen-Nürnberg: Dissertation, 2007
- [26] Kühlke, D.: Optik: Grundlagen und Anwendungen. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2011, 3. Auflage
- [27] Strobel, O.: Lichtwellenleiter-Übertragungs- und Sensortechnik. Berlin: VDE-Verlag, 2014, 3. Auflage
- [28] Schröder, H., Eberling, F., Starke, E., Himmler, A.: Heißgeprägte Polymerwellenleiter für elektrisch-optische Schaltungsträger (EOCB) – Technologie und Charakterisierung. Berlin Offenbach: VDE-Verlag, GMM-Fachbericht, 2002
- [29] Goos, F., Hänchen, H.: Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion. In Annalen der Physik, Vol. 436(7-8), S. 333-346, 1947
- [30] Daum, W., Krauser, J., Zamzow, P. E., Ziemann, O.: POF – Optische Polymerfasern für die Datenkommunikation. Berlin Heidelberg: Springer, 2001, 1. Auflage
- [31] Göcer, Ö.: Die petroskopische Anreicherung von Lichtwellenleitern. Hamburg: Diplomica Verlag, 2009, 1. Auflage
- [32] Downie, J. D.: Relationship of Q penalty to eye-closure penalty for NRZ and RZ signals with signal-dependent noise. In Journal of Lightwave Technology, Vol. 23 (6), S. 2031-2038, 2005
- [33] Werner, M.: Nachrichtentechnik: Eine Einführung für alle Studiengänge. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2017, 8. Auflage
- [34] Stiny, L.: Passive elektronische Bauelemente: Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2015, 2. Auflage
- [35] Böge, W., Pläßmann, W.: Vieweg Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2007, 4. Auflage
- [36] Gwozdek, M.: Lexikon der Videoüberwachungstechnik: Planung, Beratung, Installation. Heidelberg: Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm, 2007, 4. Auflage
- [37] Norm DIN 58140-1:2012-03: Faseroptik – Teil 1: Begriffe, Formelzeichen

- [38] Mizuno, H., Sugihara, O., Jordan, S., Okamoto, N., Ohama, M., Kaino, T.: Replicated Polymeric Optical Waveguide Devices with Large Core Connectable to Plastic Optical Fiber Using Thermo-Plastic and Thermo-Curable Resins. In *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 2, February 2006
- [39] Konopsky, V. N., Alieva, E. V.: Imaging biosensor based on planar optical waveguide. In *Optics & Laser technology*, Vol. 115, S. 171-175, July 2019
- [40] Takahashi, H., Fujita, K., Ohno, H.: Dynamic Analysis of Adsorption-Desorption Equilibrium of Sublimed Aromatic Molecules Using Polarized Optical Waveguide Spectroscopy. In *Analytical Science*, Vol. 33, April 2017
- [41] Schrüfer, E.: *Lexikon Meß- und Automatisierungstechnik*. Düsseldorf: Springer-Verlag, 1992, 1. Auflage
- [42] Graf, J.: *Entwicklung und Untersuchungen zur Herstellung verlustarmer passiver Wellenleiter und verstärkender Wellenleiter*. Universität des Saarlandes: Dissertation, 1999
- [43] Dong, L., Samson, B.: *Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016, 1. Auflage
- [44] Chappell, J., Hutt, D., Conway, P.: Controlling the Feature Sizes of an Inkjet Printed Optical Waveguide Applicable Material. 2nd International Symposium on Photonic Packaging, München, 2008
- [45] De Gans, B.-J., Duineveld, P. C., Schubert, U. S.: Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments. In *Journal of Advanced Material*, Vol. 16, No. 3, S. 203-213, 2004
- [46] Mäntysalo, M., Pekkanen, V., Kaija, K., Niittynen, J., Koskinen, S., Halonen, E., Mansikkamäki, P., Hämeenoja, O.: Capability of Inkjet Technology in Electronics Manufacturing. *Proceedings 2009 Electronic Components and Technology Conference*, 2009
- [47] Fahlbusch, T.: *Dispensieren polymerer Lichtwellenleiter*. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover: Dissertation, 2007
- [48] Yang, X., Ma, L., Immonen, M., Zhu, L., Shi, X., He, Z.: Large-size directly inscribed polymer waveguide device for card-to-card optical interconnect application. *Proc. SPIE 10924, Optical Interconnects XIX*, 1092405, March 2019

- [49] Soma, K., Ishigure, T.: Fabrication of a Graded-Index Circular-Core Polymer Parallel Optical Waveguide Using a Microdispenser for a High-Density Optical Printed Circuit Board. In IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 19, No. 2, March/April 2013
- [50] Henzi, P.: UV-induzierte Herstellung monomodiger Wellenleiter in Polymeren. Universität Karlsruhe: Dissertation, 2004
- [51] Völklein, F., Zetterer, T.: Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen Technologien Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 2006, 2. Auflage
- [52] Van Steenberge, G., Hendrickx, N., Bosman, E., Van Erps, J., Thienpont, H., Van Daele, P.: Laser ablation of parallel optical interconnect waveguides. In IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18(9), S. 1106-1108, 2006
- [53] Scheel, W.: Die Zukunft der elektronischen Baugruppe. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Mallorca, 2005
- [54] Schröder, H., Staufenhiehl, N. A., Mödinger, R., Kostelnik, J., Ebling, F., Intemann, S., Schlosser, I., Griesse, E., Kühler, T.: Elektro-optische Leiterplatten auf Basis von Dünnglaslaminaten mit integrierten optischen Wellenleitern. Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008, Fellbach, 2008
- [55] Bann, D., Taronna, S.: Die moderne Druckproduktion: Der umfassende Ratgeber für Design, Layout, Materialkunde und Einkauf im Digitaldruck, Print on Demand sowie traditionelle Druckverfahren inklusive Weiterverarbeitung. München: Stiebner Verlag, 2011, 2. Auflage
- [56] <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/> (aufgerufen am 02.06.2020)
- [57] Hedges, M., Kardos, M., King, B., Renn, M.: Aerosol-Jet Printing for 3-D Interconnects, Flexible Substrates and Embedded Passives. Proceedings of the International Wafer Level Packaging Conference, San Jose, 2006
- [58] Harten, U.: Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Berlin: Springer-Vieweg, 2017
- [59] Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer, 2009, 6. Auflage

- [60] Müller, B., Rath, W.: Formulierung von Kleb- und Dichtstoffen: Das kompetente Lehrbuch für Studium und Praxis. Hannover: Vincentz, 2015, 3. Auflage
- [61] Kopczynska, A., Ehrenstein, G. W.: Sonderdrucke: Oberflächenspannung von Kunststoffen – Messmethoden am LKT. URL: <https://www.lkt.tf.fau.de/files/2017/06/Oberflaechenspannung.pdf> (aufgerufen am 28.05.2020)
- [62] Young, T.: An Essay on the Cohesion of Fluids. In Philosophical Transactions of the Royal Society of London, The Royal Society, Vol. 95, S. 65-87, 1805
- [63] Hedges, M., Marin, A. B.: 3D Aerosol jet printing-Adding electronics functionality to RP/RM. DDMC 2012 conference, S. 14-15, March 2012
- [64] Goth, C., Putzo, S., Franke, J.: Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications. 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), S. 1211-1216, May 2011
- [65] Cheek, K. A.: Aerosol Jet® Deposition System Operator's Guide. Benutzerhandbuch, Optomec, Inc., 2013
- [66] Neville, E., D'Arezzo, K.: Aerosol Jet® AJ 300 System User Manual. Benutzerhandbuch, Optomec, Inc., 2016
- [67] Grote, K.-H., Feldbusch, J.: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, 24. Auflage
- [68] Hörber, J., Goth, C., Franke, J., Hedges, M.: Electrical Functionalization of Thermoplastic Materials by Aerosol Jet Printing. Proceedings of the 13th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), S. 813-818, 2011
- [69] King, B., Renn, M.: Aerosol Jet direct write printing for mil-aero electronic applications. In Lockheed Martin Palo Alto Colloquia, 2009
- [70] https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Materials_FAQs-WEB.pdf (aufgerufen am 26.05.2020)
- [71] Paulsen, J. A.: Process Development Tips and Tricks/Advanced Applications Laboratory. Forschungsbericht, Optomec, Inc., 2010

- [72] Kipphan, H.: Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2000, 1. Auflage
- [73] Kamiske, G. F., Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z: Wichtige Begriffe des Qualitätsmanagements und ihre Bedeutung. München: Carl Hanser Verlag, 2011, 7. Auflage
- [74] Edler, F., Soden, M., Hankammer, R.: Fehlerbaumanalyse in Theorie und Praxis: Grundlagen und Anwendungen der Methode. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015, 1. Auflage
- [75] Duineveld, P. C.: The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate. In Journal of Fluid Mechanics, 477, S. 175-200, 2003
- [76] Niewegłowski, K.: Beiträge zur Aufbau- und Verbindungstechnik für optische Kurzstreckenverbindungen. Technische Universität Dresden: Dissertation, 2011
- [77] Bierhoff, T., Sönmez, Y., Schrage, J., Himmler, A., Griesse, E., Mrozynski, G.: Influence of the cross sectional shape of board-integrated optical waveguides on the propagation characteristics. 6th IEEE-SPI Workshop, S. 47-50, May 2002
- [78] Schreiner, R.: Computer-Netzwerke: Von den Grundlagen zur Funktion und Anwendung. München: Hanser Verlag, 2012, 4. Auflage
- [79] Bobzin, K.: Oberflächentechnik für den Maschinenbau. Weinheim: Wiley-VCH, 2013, 1. Auflage
- [80] Roth-Fölsch, A., Lödel, T.: Eine Frage des Kontaktwinkels: Aktivierung von Kunststoff-Oberflächen durch UV/Ozon-Vorbehandlung. Heraeus, Hanau, June 2012
- [81] Bock, K., Müller, M., Paproth, A.: Praktikumsbeschreibung: Chipbonden (CB). IAVT Dresden, Oktober 2014. URL: https://www.avt.et.tu-dresden.de/fileadmin/dokumente/lehre/6_tdez_montagetechnologien/Chipbonden_2014_2.pdf (aufgerufen am: 02.06.2020)
- [82] Orthmann, K., Dorbath, B., Klatt, H., Richly, W., Schmidt, J.: Elektrisch leitende Klebstoffe – Anwendungen, Aufbau, Applikation, Qualität, Zuverlässigkeit. Renningen-Malmsheim: expert verlag, Bd. 472, 1995

- [83] Fischer-Hirschert, U. H. P.: Photonic Packaging Sourcebook: Fiber-Chip Coupling for Optical Components, Basic Calculations, Modules. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015, 1. Auflage
- [84] Wolfer, T., Bollgruen, P., Mager, D., Overmeyer, L., Korvink, J. G.: Printing and preparation of integrated optical waveguides for optoelectronic sensor networks. In *Mechatronics*, Vol. 34, S. 119-127, 2016
- [85] Stöcker, H.: Handbook of mathematical formulas and computational science. Springer-Verlag, 1998, 1. Auflage
- [86] Herrmann, C. M.: Experimentelle Untersuchungen zum Benetzungsverhalten fester und elastischer linearer Grabenstrukturen. Universität des Saarlandes: Dissertation, 2015
- [87] Einstein, A.: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, Vol 49, S. 770-822, 1916
- [88] Durst, F.: Grundlagen der Strömungsmechanik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, 1. Auflage
- [89] Lecheler, S.: Numerische Strömungsberechnung. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2018, 4. Auflage
- [90] Fröhlich, J.: Large Eddy Simulation turbulenter Strömungen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006, 1. Auflage
- [91] Ferziger, J. H., Perić, M.: Numerische Strömungsmechanik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 1. Auflage
- [92] Boussinesq, M. J.: Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides: dans les lite Rectilignes a grande section. Paris: Gauthier-Villards et fils, Imprimeurs-Libraires, 1897
- [93] Launder, B. E., Sharma, B. I.: Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. In *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, S. 131-138, 1974
- [94] Wilcox, D. C.: Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models. In *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 11, 1988
- [95] Menter, F. R.: Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. In *AIAA-93-2906*, 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, 1993
- [96] Karman, T. v.: Mechanical Similitude and Turbulence. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Memorandum No. 611, 1930

- [97] Schwarze, R.: CFD-Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, 1. Auflage
- [98] Langtry, R. B., Menter, F. R.: Transmission Modeling for General CFD Applications in Aeronautics. In AIAA 2005-522, 2005
- [99] Lorenz, L.: Beiträge zur effizienten Kopplung von optischen Wellenleitern in der Gerätekommunikation. Technische Universität Dresden: Dissertation, 2018

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Reitberger, T., Hoffmann, G.-A., Lorenz, L., Neermann, S., Overmeyer, L., Bock, K., Wolter, K.-J., Franke, J.: The future of short-range high-speed data transmission: printed polymer optical waveguides (POW) innovation, fabrication, and challenges. Proc. SPIE 10751, Optics and Photonics for Information Processing XII, 1075109, September 2018
- [P2] Lorenz, L., Ott, L., Nieweglowski, K., Reitberger, T., Franke, J., Bock, K.: Evaluation of the coupling performance and long-term stability of aerosol jet printed and photolithographic manufactured waveguides for asymmetric optical bus couplers. Optical Interconnects XIX, International Society for Optics and Photonics, Vol. 10924, S. 10924, March 2019
- [P3] Loosen, F., Backhaus, C., Zeitler, J., Hoffmann, G.-A., Reitberger, T., Lorenz, L., Lindlein, N., Franke, J., Overmeyer, L., Suttman, O., Wolter, K.-J., Bock, K.: Approach for the production chain of printed polymer optical waveguides—an overview. In Applied optics, Vol 56(31), S. 8607-8617, 2017
- [P4] Reitberger, T., Hoffmann, G.-A., Wolfer, T., Overmeyer, L., Franke, J.: Printing polymer optical waveguides on conditioned transparent flexible foils by using the aerosol jet technology. Proc. SPIE 9945, Printed Memory and Circuits II, 99450G, September 2016
- [P5] Hoffmann, G.-A., Wolfer, T., Reitberger, T., Franke, J., Suttman, O., Overmeyer, L.: Improving partial wetting resolution on flexible substrates for application of polymer optical waveguides. In Opt. Eng., Vol. 56(10), 103109, October 2017
- [P6] Hoffmann, G.-A., Reitberger, T., Franke, J., Overmeyer, L.: Conditioning of surface energy and spray application of optical waveguides for integrated intelligent systems. Procedia Technology, Vol. 26, S. 169-176, 2016
- [P7] Reitberger, T., Hoerber, J., Schramm, R., Sennefelder, S., Franke, J.: Aerosol Jet® printing of optical waveguides. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), S. 5-10, May 2015

- [P8] Lorenz, L., Nieweglowski, K., Wolter, K.-J., Bock, K., Hoffmann, G.-A., Overmeyer, L., Reitberger, T., Franke, J.: Additive waveguide manufacturing for optical bus couplers by aerosol jet printing using conditioned flexible substrates. 21st European Micro-electronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, S. 1-5, September, 2017
- [P9] Reitberger, T., Franke, J., Hoffmann, G.-A., Overmeyer, L., Lorenz, L., Wolter, K.-J.: Integration of polymer optical waveguides by using flexographic and aerosol jet printing. 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID), S. 1-6, September 2016
- [P10] Reitberger, T., Loosen, F., Schrauf, A., Lindlein, N., Franke, J.: Important parameters of printing polymer optical waveguides (POWs) in simulation and fabrication. Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXV, International Society for Optics and Photonics, Vol. 10098, S. 100981B, January 2017
- [P11] Franke, J., Zeitler, J., Reitberger, T.: A novel engineering process for spatial opto-mechatronic applications. In CIRP Annals, Vol. 65(1), S. 153-156, 2016
- [P12] Lorenz, L., Nieweglowski, K., Al-Husseini, Z., Neumann, N., Plettemeier, D., Wolter, K.-J., Reitberger, T., Franke, J., Bock, K.: Asymmetric optical bus coupler for interruption-free short-range connections on board and module level. In Journal of Lightwave Technology, Vol. 35(18), S. 4033-4039, 2017
- [P13] Hoffmann, G.-A., Reitberger, T., Lorenz, L., Wolter, K.-J., Franke, J., Overmeyer, L.: Combination of flexographic and aerosol jet printing for integrated polymer optical step index waveguides. Proceedings 117 DGaO-Jahrestagung, 2016

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] Spiegler, A., Reitberger, T., Franke, J.: Herstellung und Qualifizierung mehrlagiger polymerer Lichtwellenleiter auf konditionierten Foliensubstraten. Projektarbeit. Nürnberg, 2017
- [S2] Putzo, S., Goth, C., Franke, J.: Qualifizierung des Aerosol Jet®-Verfahrens zum Aufbau elektrisch leitfähiger Strukturen auf dreidimensionalen Rapid Prototyping Baugruppen. Diplomarbeit. Nürnberg, 2010
- [S3] Chiu-Krug, I.-T., Reitberger, T., Franke, J.: Technologie- und Marktrecherche zum Thema UV-härtende Polymere und optisch transparente Substratmaterialien für die Verarbeitung im Aerosol-Jet-Verfahren. Projektarbeit. Nürnberg, 2015
- [S4] Riedmüller, M., Reitberger, T., Franke, J.: Aufzeichnung des Stands der Technik im Bereich optisch transparenter Polymere für den Einsatz als Lichtwellenleiter- und Substratmaterialien im Aerosol-Jet-Verfahren. Projektarbeit. Nürnberg, 2015
- [S5] Sennefelder, S., Hörber, J., Franke, J.: Ansätze zur Herstellung optischer Bauelemente mittels Aerosol-Jet-Druck. Masterarbeit. Nürnberg, 2014
- [S6] Heinze, P., Craiovan, D., Franke, J.: Untersuchung der Prozessierbarkeit zur Erzeugung von planaren Lichtwellenleitern mittels des Aerosol-Jet-Verfahrens. Bachelorarbeit. Nürnberg, 2011
- [S7] Süttenbach, M., Reitberger, T., Franke, J.: Herstellung und Qualifizierung gedruckter polymerer optischer Leiterbahnen im Aerosol-Jet-Verfahren. Projektarbeit. Nürnberg, 2016
- [S8] Bach, L., Reitberger, T., Franke, J.: Aerosol-Jet-Druck von transparenten Polymeren auf konditionierten Foliensubstraten zur Herstellung lichtleitender Bahnen. Masterarbeit. Nürnberg, 2016
- [S9] Kuhn, T., Reitberger, T., Franke, J.: Analyse und Verifizierung des Workflows im Aerosol Jet Druck flüssiger transparenter Polymere und Durchführung weiterführender Versuchsreihen. Masterarbeit. Nürnberg, 2016

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- [S10] Nill, M., Reitberger, T., Franke, J.: Herstellung, Charakterisierung und Qualifizierung gedruckter polymerer Lichtwellenleiter für die Datenübertragung der Zukunft. Masterarbeit. Nürnberg, 2018
- [S11] Leng, T., Reitberger, T., Franke, J.: Evaluierung potenziell geeigneter Druckverfahren zur Herstellung polymerer Lichtwellenleiter auf dreidimensionalen Substraten. Masterarbeit. Nürnberg, 2018
- [S12] Schrauf, A., Reitberger, T., Franke, J.: Prozessoptimierung und Durchführung einer statistischen Versuchsplanung auf Basis durchgeführter Voruntersuchungen zum Thema Aerosol Jet Printing. Masterarbeit. Nürnberg, 2017
- [S13] Straube, E., Reitberger, T., Franke, J.: Qualifizierung von im Aerosol-Jet Verfahren hergestellter optischer polymerer Lichtwellenleiter. Bachelorarbeit. Nürnberg, 2016
- [S14] Naser, J., Reitberger, T., Franke, J.: Qualifizierung und Charakterisierung gedruckter polymerer Lichtwellenleiter für die Kurzstreckendatenübertragung. Projektarbeit. Nürnberg, 2018
- [S15] Dorn, M., Reitberger, T., Franke, J.: Ressourceneffiziente High-Speed Datenübertragung der Zukunft: Rechnergestützte Abbildung des Aerosol Jet Printings optischer Leiterbahnen. 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
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

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
Zweistrahlschweißtechnik
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 mechanischer
Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

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

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

Band 80: Sorin Niederkorn
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 Fokusslage 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
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage 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
Wissensbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in 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 Diodenlaserstrahlung
von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung
von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

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

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

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

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

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

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

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

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
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 Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

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

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

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen 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 Aluminiumplatten
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 Herstellungsverfahren
und erweiterte Qualitätssicherung
von einsetzgerechten elektronischen
Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum 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
Laserdurchstrahlungsschweißen
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 Größeneffek-
ten 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 Lösun-
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-
scher 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 Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-
ung 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 Optimie-
rung 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 Laserstrahlintern von
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-
scher 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 Lichtwellenlei-
tern
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, Prozesssimu-
lation 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 -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer 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 Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander 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 Laserstrahltiefschweißprozesses 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 Böning
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 disk-
ret 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
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe 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
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender 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 Stellan
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 Tausalprozess

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 Karosserierohrbau: 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 Gnibl
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
Intralogs 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 Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißscrimpprozesses
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

Abstract

The digitalization will continue to increase in the coming years and will probably reach undreamt dimensions. In the course of Industry 4.0 and the associated networking of plant parks, modern transportation in air on road and on water, and last but not least modern life with smart home and constant connection to the internet via smartphone, the status "offline" will probably no longer exist in the near future. Currently, ways and means have to be found to store the ever increasing data packets and to make them transferable in real time if possible.

At this point the research work carried out here starts and presents for the first time the possibility of a user-defined applying of polymer optical waveguides (POWs) by digital direct printing using the example of aerosol-jet-printing on the respective substrate surface. The POWs generated in this way achieve values of transmittance over 91 %, attenuation rates of up to 0.2 dB/cm and are capable of transmitting up to 10 Gbit/s, which qualifies them for the necessary substitution of metallic conductors.

Based on the fundamentals of optical data transmission, a definition of the term polymer optical waveguide and its differentiation from common waveguide forms is given by the manufacturing process used. Subsequently, the OPTAVER-Process and the associated process chain are described. During the qualification of the manufacturing process, important basics for future further work and first industrial applications could be developed. In AJ-printing, POWs with optical quality can be built up on three-dimensional surfaces, but there are still some challenges that have to be met. Suitable materials, process parameters, qualification and characterization and modelling methods could be identified and their suitability evaluated.

In future applications, the technology presented here should therefore be taken into account, since resources, materials and weight can be saved, and a fully functional network structure can be adapted to the respective requirements. A few adjustments to the machine settings can manipulate the length, width, height, layout and the associated data transmission capacity. Finally, the solution approach presented here is characterized by its environmental friendliness, as the use of chemicals, which are needed in standard etching or developing processes, can be dispensed with.

Die Digitalisierung wird in den kommenden Jahren weiter voranschreiten und voraussichtlich ungeahnte Dimensionen annehmen. Den Zustand „offline“ wird es im Zuge von Industrie 4.0 und der damit verbundenen Vernetzung der Anlagenparks, dem modernen Transportwesen in der Luft, auf der Straße sowie zu Wasser und nicht zuletzt dem modernen Leben mit Smart-Home und ständiger Anbindung an das Internet via Smartphone in der nahen Zukunft wohl nicht mehr geben. Aktuell gilt es Mittel und Wege zu finden, die immer Größer werdenden Datenpakete zu speichern und möglichst in Echtzeit übertragbar zu machen.

An dieser Stelle setzt die hier durchgeführte Forschungsarbeit an und präsentiert erstmalig die Möglichkeit, polymere optische Wellenleiter (POW) durch digitalen Direktdruck am Beispiel des Aerosol-Jet-Drucks auf der jeweiligen Substratoberfläche benutzerdefiniert aufzubringen. Die so erzeugten POW erreichen aktuell einen Transmissionsgrad von über 91 %, Dämpfungsraten von bis zu 0,2 dB/cm und sind in der Lage bis zu 10 GBit/s zu übertragen, welches sie für die notwendige Substitution metallischer Leiter qualifiziert.

Anhand der Grundlagen der optischen Datenübertragung erfolgt eine Definition des Begriffs polymerer optischer Wellenleiter und dessen Abgrenzung zu gängigen Wellenleiterformen durch das verwendete Herstellungsverfahren. Im Anschluss wird der OPTAVER-Prozesses und die damit verbundene Prozesskette beschrieben. Bei der Qualifizierung des Herstellungsverfahrens konnten wichtige Grundlagen für zukünftige weiterführende Arbeiten bzw. erste industrielle Anwendungen erarbeitet werden. So können im AJ-Druck POW mit optischer Güte auf dreidimensionalen Oberflächen aufgebaut werden. Es konnten geeignete Materialien, Prozessparameter, Qualifizierungs- bzw. Charakterisierungs- und Modellierungsmethoden identifiziert und auf deren Eignung hin evaluiert werden.

In zukünftigen Anwendungen sollte somit die hier vorgestellte Technologie durchaus berücksichtigt werden, da hierdurch Ressourcen, Material und Gewicht eingespart werden können und darüber hinaus die Möglichkeit besteht, eine voll funktionsfähige optische Versorgungs- und Kommunikationsnetzwerkstruktur an den jeweiligen Bedarf anzupassen. Durch geringe Änderungen der Maschineneinstellungen können Länge, Breite, Höhe und Layout sowie damit verbunden die Datenübertragungseigenschaften manipuliert werden.

