

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Additiv gefertigte Werkstücke mit  
integrierten elektrischen Schaltungen unter Nutzung des  
3D-Druckprozesses**

Dipl.-Ing. (Univ.)

**Johannes Heinrich Glasschröder**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
2. Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Die Dissertation wurde am 16.01.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.06.2018 angenommen.



## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim Lüth, dem Leiter des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Besonders hervorheben möchte ich meine ehemaligen Studenten Herrn Lukas Weis, Herrn Johannes Hassler sowie Herrn Moritz Veith, die mich unermüdlich bei meinen Arbeiten unterstützt haben. Mein ausdrücklicher Dank gilt zudem meinem ehemaligen Zimmerkollegen Herrn Dr.-Ing. Harald Krauss für die enge und immer konstruktive Zusammenarbeit, die spannenden Diskussionen sowie die stets angenehme Arbeitsatmosphäre im Büro 21. Herrn Prof. Johannes Schilp, Herrn Dr.-Ing. Harald Krauss und Herrn Dr.-Ing. Christoph Rimpau, meinem Cousin Florian Kopp sowie meinen Schwiegereltern Gabi Götz und Klaus Rechenberger danke ich für die kritische Begutachtung des Manuskripts und die wertvollen Anregungen.

In ganz besonderem Maße danke ich meiner Frau Ines Rechenberger, die mich während der gesamten Promotionszeit begleitet und mir stets Rückhalt in den unterschiedlichen Phasen des Vorhabens gegeben hat.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die mich immer in meinem Handeln unterstützt haben und mich stets ermutigt haben, meine Ziele zu verfolgen. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

Augsburg, im August 2018

*Johannes Glasschröder*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>		<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>		<b>vii</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>		<b>xi</b>
<b>1 Einleitung.....</b>		<b>1</b>
1.1 Motivation.....		1
1.2 Zielsetzung.....		5
1.3 Vorgehensweise.....		7
<b>2 Analyse und Anforderungsdefinition .....</b>		<b>11</b>
2.1 Vorgehen im Kapitel.....		11
2.2 Analyse des 3D-Druckprozesses .....		11
2.3 Materialeigenschaften des Pulverwerkstoffes .....		12
2.4 Materialeigenschaften des Binderwerkstoffes.....		16
2.5 Eigenschaften 3D-gedruckter Bauteile .....		18
2.6 Potenziale und Einschränkungen des 3D-Druckprozesses.....		21
2.6.1 Potenziale des 3D-Druckprozesses.....		21
2.6.2 Einschränkungen des 3D-Druckprozesses.....		22
2.7 Auslegung einer elektrischen Schaltung.....		23
2.8 Anforderungen aus der Analyse .....		25
2.8.1 Vorgehensweise .....		25
2.8.2 Anforderungen aus der Prozessanalyse .....		26
2.8.3 Anforderungen an die Integration von Leiterbahnen .....		27
2.8.4 Anforderungen an die Integration von Komponenten.....		29
2.9 Zusammenfassung .....		30

<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>31</b>
3.1	Vorgehen im Kapitel .....	31
3.2	Integration von elektrischen Leiterbahnen .....	31
3.2.1	Ansätze beim Fused Layer Modelling (FLM).....	31
3.2.2	Ansätze beim Selektiven Laser-Sintern (SLS-Verfahren) .....	34
3.2.3	Ansätze bei Jetting-Technologien .....	36
3.3	Integration von elektrischen Komponenten .....	38
3.3.1	Ansätze beim Selektiven Laser-Sintern .....	38
3.3.2	Ansätze bei Jetting-Technologien .....	39
3.4	Kombinierte Ansätze .....	40
3.4.1	Ansätze beim Fused Layer Modelling.....	40
3.4.2	Ansätze beim SL-Verfahren .....	41
3.4.3	Ansätze beim Selektiven Laser-Sintern .....	45
3.4.4	Ansätze bei Jetting-Technologien .....	45
3.4.5	Ansätze beim Laser-Direct-Writing-Verfahren.....	46
3.5	Zusammenfassung und Handlungsbedarf .....	47
3.5.1	Zusammenfassung .....	47
3.5.2	Abgeleiteter Handlungsbedarf.....	48
<b>4</b>	<b>Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen .....</b>	<b>51</b>
4.1	Vorgehen im Kapitel .....	51
4.2	Integration von elektrischen Leiterbahnen .....	52
4.2.1	Vorgehensweise.....	52
4.2.2	Bewertung der Materialien anhand der Anforderungen.....	53
4.2.3	Simulation und Experimente zur Materialauswahl .....	57
4.2.3.1	Experimentelle Untersuchung – leitfähige Tinte .....	60



4.2.3.2	Experimentelle Untersuchung - Leitklebstoff .....	63
4.2.3.3	Ergebnis .....	66
4.2.4	Konzept zur Erzeugung von Vertiefungen im Pulverbett .....	67
4.2.5	Prozess zur Erstellung von dreidimensionalen Leiterbahnen..	70
4.2.6	Eignung des Leitklebstoffs für die Ankontaktierung .....	73
4.2.7	Erweiterter Prozess .....	74
4.3	Integration von elektrischen Komponenten.....	75
4.3.1	Vorgehensweise .....	75
4.3.2	Auswahl der elektrischen Komponenten .....	75
4.3.3	Prozess zur Integration von elektrischen Komponenten .....	76
4.3.4	Konzept zur Handhabung von elektrischen Komponenten .....	77
4.3.5	Prozess zum Ankontaktieren an die Leiterbahn .....	78
4.3.6	Erweiterter Prozess .....	82
4.4	Prozess zur Erzeugung von elektrischen Schaltungen .....	83
4.5	Zusammenfassung .....	85
<b>5</b>	<b>Komponentenentwicklung .....</b>	<b>87</b>
5.1	Vorgehen im Kapitel.....	87
5.2	Versuchsaufbau und Prozesse .....	88
5.3	Entwicklung eines Multimaterialmoduls .....	90
5.3.1	Allgemeines .....	90
5.3.2	Anforderungsdefinition.....	92
5.3.3	Hardwaretechnische Umsetzung .....	94
5.4	Entwicklung eines Unterdruckmoduls.....	96
5.4.1	Allgemeines .....	96
5.4.2	Anforderungsdefinition.....	96

5.4.3	Hardwaretechnische Umsetzung .....	99
5.5	Integrierte Steuerung beider Module.....	100
5.6	Zusammenfassung .....	102
<b>6</b>	<b>Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften.....</b>	<b>105</b>
6.1	Vorgehen im Kapitel .....	105
6.2	Materialeigenschaften und -bewertung .....	105
6.2.1	Allgemeines .....	105
6.2.2	Verarbeitbarkeit mit dem Multimaterialmodul .....	106
6.2.3	Verhalten auf der Pulverbettoberfläche.....	107
6.2.4	Übergangswiderstand der Ankontaktierung .....	108
6.2.5	Trocknungsdauer und Schwund .....	109
6.2.6	Reaktion auf thermische Wechselzyklen .....	111
6.2.7	Reaktion auf eine elektrische Belastung .....	114
6.2.8	Bewertung des Leitklebstoffs .....	115
6.3	Eigenschaften und Bewertung des Multimaterialmoduls.....	115
6.3.1	Erzeugung zweidimensionaler elektrischer Leiterbahnen.....	116
6.3.1.1	Relevante Einflussparameter .....	116
6.3.1.2	Abmessungen der Leiterbahnen .....	119
6.3.1.3	Elektrischer Widerstand .....	121
6.3.2	Erzeugung dreidimensionaler elektrischer Leiterbahnen.....	122
6.3.2.1	Relevante Einflussparameter .....	122
6.3.2.2	Abmessung der Leiterbahnen.....	125
6.3.2.3	Elektrischer Widerstand .....	126
6.3.2.4	Übergangswiderstand .....	128
6.3.3	Bewertung der Versuchsdurchführung.....	130

6.3.3.1	Technische Probleme.....	130
6.3.3.2	Erzeugung zweidimensionaler Leiterbahnen .....	131
6.3.3.3	Erzeugung dreidimensionaler Leiterbahnen.....	131
6.3.3.4	Schlussfolgerung .....	132
6.4	Eigenschaften und Bewertung des Unterdruckmoduls.....	132
6.4.1	Erzeugung von Vertiefungen.....	133
6.4.1.1	Erzeugung von Kavitäten .....	134
6.4.1.2	Erzeugung von Kanälen.....	137
6.4.2	Handhabung von elektrischen Komponenten.....	142
6.4.3	Bewertung der Versuchsdurchführung .....	144
6.4.3.1	Erzeugung von Kavitäten .....	144
6.4.3.2	Erzeugung von Kanälen.....	145
6.4.3.3	Schlussfolgerung .....	146
6.5	Bewertung des Gesamtsystems .....	146
6.6	Zusammenfassung .....	151
<b>7</b>	<b>Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....</b>	<b>153</b>
7.1	Vorgehen im Kapitel.....	153
7.2	Methodenbeschreibung und -anwendung.....	153
7.2.1	Technologieanalyse-Phase.....	153
7.2.2	Applikationsanalyse-Phase .....	155
7.2.3	Potenzialermittlungs-Phase.....	157
7.3	Applikationsbeispiel .....	163
7.4	Wirtschaftliche Bewertung .....	164
7.5	Umsetzung am Beispiel eines Demonstrators .....	167
7.6	Zusammenfassung .....	168

<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung</b> .....	<b>169</b>
8.1	Zusammenfassung .....	169
8.2	Ausblick.....	171
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>173</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>195</b>
10.1	Grundlagen der elektrisch leitfähigen Materialien.....	195
10.2	Simulation des 3D-Druckprozesses.....	204
10.2.1	Allgemeines .....	204
10.2.2	Grundlagen der Strömungssimulation (CFD-Simulation) .....	205
10.2.3	Erzeugung einer Pulverschüttung.....	206
10.2.4	Vernetzungsstrategie .....	208
10.2.5	Modellierung der Mehrphasenströmung .....	210
10.2.6	Simulation beim Aufbringen mehrerer Flüssigkeiten .....	215
10.3	Vollfaktorieller Versuchsplan der Leiterbahnerzeugung (vgl. Abschnitt 6.3.1.1).....	217
10.4	Versuchsplan und Auswertung der Kanalbreite und –tiefe (vgl. Abschnitt 6.4.1.2).....	218
10.5	Ermittlung des minimalen Betriebsdrucks (vgl. Abschnitt 6.4.2)....	219
10.6	Funktionsbaum des elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks (vgl. Abschnitt 7.2.1).....	220
10.7	Bewertungskriterien mit Abstufungen (vgl. Abschnitt 7.2.3).....	221
10.8	Applikationen mit den jeweiligen Bewertungen (vgl. Abschnitt 7.2.2 und 7.2.3).....	222
10.9	Daten und Annahmen für den Herstellungskostenvergleich (vgl. Abschnitt 7.4).....	234
<b>11</b>	<b>Studienarbeiten</b> .....	<b>237</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
1K-	Ein-Komponenten-
2K-	Zwei-Komponenten-
ABS	<b>A</b> crylnitril- <b>B</b> utadien- <b>S</b> tyrol
ADDIMID	<b>A</b> dditives <b>M</b> olded <b>I</b> nterconnect <b>D</b> evice (spritzgegossener Schaltungsträger mit Additiven)
AJP	<b>A</b> erosol <b>J</b> et <b>P</b> rinting (Aerosol-Jet-Drucken)
ANSYS	<b>A</b> nalysis <b>S</b> ystem (Finite-Elemente-Software der Firma Ansys Inc.)
APDL	<b>A</b> nsys <b>P</b> arametric <b>D</b> esign <b>L</b> anguage
AV	<b>A</b> rbeitsvorbereitung
B	<b>B</b> edingung
BPO	<b>B</b> enzoylperoxid
CB	<b>C</b> arbon <b>B</b> lack (industriell erzeugter Ruß)
CCC	<b>C</b> onductive <b>C</b> arbon <b>C</b> ement (mit Kohlenstoff angereicherter Klebstoff)
CFD	<b>C</b> omputational <b>F</b> luid <b>D</b> ynamics (numerische Strömungsmechanik)
CFL	<b>C</b> ourant- <b>F</b> riedrichs- <b>L</b> ewy
CFX	<b>C</b> omputational <b>F</b> luid Dynamics( <b>X</b> )
CLFDM	<b>C</b> urved- <b>L</b> ayer <b>F</b> used <b>D</b> eposition <b>M</b> odelling (Strangablegeverfahren mit gekrümmten Lagen)
CSF	<b>C</b> ontinuum <b>S</b> urface <b>F</b> orce (kontinuierliche Oberflächenkraft)
CT	<b>C</b> omputertomographie
CVD	<b>C</b> hemical <b>V</b> apour <b>D</b> eposition (chem. Gasphasenabscheidung)

## Abkürzungsverzeichnis

---

DMS	<b>D</b> ehnungsmessstreifen
DNS	<b>D</b> irekte <b>N</b> umerische <b>S</b> imulation
DP	<b>D</b> ispenser
EIA	<b>E</b> lectronic <b>I</b> ndustries <b>A</b> lliance (Unternehmerverband)
EDX	<b>E</b> nergy <b>D</b> ispersive <b>X</b> -Ray Spectroscopy (energiedispersive Röntgenspektroskopie)
eSLA	<b>E</b> MBEDDING <b>S</b> tereolithography (Stereolithografie mit der Erweiterung zum Einbetten von Komponenten)
EWB	<b>E</b> ntwicklungsbedarf
FE	<b>F</b> inite <b>E</b> lemente
FLM	<b>F</b> used <b>L</b> ayer <b>M</b> odelling (Strangablegeverfahren)
FVM	<b>F</b> inite- <b>V</b> olumen- <b>M</b> ethode
GK	<b>G</b> ewichtskraft
HOE	<b>H</b> olographic <b>O</b> ptical <b>E</b> lements (Holographisch-Optische Elemente)
IAO	<b>I</b> nstitut für <b>A</b> rbeitswissenschaften und <b>O</b> rganisation (Fraunhofer-Institut)
ICEM	<b>I</b> ntegrated <b>C</b> omputer <b>E</b> ngineering and <b>M</b> anufacturing (computerintegrierte Konstruktion und Fertigung)
iwb	<b>I</b> nstitut für <b>W</b> erkzeugmaschinen und <b>B</b> etriebswissenschaften
LBM	<b>L</b> aser <b>B</b> eam <b>M</b> elting (Laser-Strahlschmelzen)
LCVD	<b>L</b> aser <b>C</b> hemical <b>V</b> apour <b>D</b> eposition (chemisches Abscheidungsverfahren mithilfe eines Laserstrahls)
LED	<b>L</b> ight- <b>E</b> mitting <b>D</b> iode (Leuchtdiode)
LDPE	<b>L</b> ow- <b>d</b> ensity <b>p</b> olyethylene (Polyethylen mit geringer Dichte)
LDS	<b>L</b> aser <b>D</b> irect <b>S</b> tructuring (Laser-Direkt-Strukturierung)
LDW	<b>L</b> aser <b>D</b> irect- <b>W</b> riting (direktes Laserschreiben)
Ltd.	<b>L</b> imited <b>C</b> ompany (haftungsbeschränktes Unternehmen)

MID	<b>M</b> olded <b>I</b> nterconnect <b>D</b> evice (spritzgegossene Schaltungs-träger)
MMA	<b>M</b> ethyl <b>m</b> ethacrylat (Methacrylsäuremethylester)
MOD	<b>M</b> etal- <b>O</b> rganic <b>D</b> eposition (metallorganische Abscheidung)
MSS	<b>M</b> aschinenstundensatz
NACE	<b>N</b> omenclature <b>G</b> énérale des <b>A</b> ctivités <b>E</b> conomiques dans les <b>C</b> ommunautés <b>E</b> uropéennes (statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft)
NC	<b>N</b> umeric <b>C</b> ontrol (numerische Steuerung)
NP	<b>N</b> anoparticle (Nanoteilchen)
NSG	<b>N</b> avier- <b>S</b> tokes- <b>G</b> leichung
PA12	<b>P</b> olyamid <b>12</b>
PCL	<b>P</b> olycaprolacton
PMMA	<b>P</b> olymethyl <b>m</b> ethacrylat (Acrylglas)
PVD	<b>P</b> hysical <b>V</b> apour <b>D</b> eposition (physikalische Gasphasenab-scheidung)
RANS	<b>R</b> eynolds- <b>A</b> veraged- <b>N</b> avier- <b>S</b> tokes (Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichung)
REV	<b>R</b> epresentative <b>E</b> lementary <b>V</b> olume (repräsentatives Volumenelement)
RFG	<b>R</b> aumfüllungsgrad
SEM	<b>S</b> canning <b>E</b> lectron <b>M</b> icroscope (Rasterelektronenmikroskop)
SL	<b>S</b> tereolithografie
SLS	<b>S</b> elective <b>L</b> aser <b>S</b> intering (Selektives Laser-Sintern)
SMD	<b>S</b> urface- <b>M</b> ount <b>D</b> evice (oberflächenmontiertes Bauelement)
SMT	<b>S</b> urface- <b>M</b> ounting- <b>T</b> echnologie (Oberflächenmontage)
THT	<b>T</b> hrough- <b>H</b> ole- <b>T</b> echnologie (Durchsteckmontage)





## Verzeichnis der Formelzeichen

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$A$	$mm^2$	<i>Fläche</i>
$A_h$	$mm^2$	<i>Querschnittsfläche der horizontalen Leiterbahn</i>
$A_{Leiter}$	$mm^2$	<i>Querschnittsfläche der Leiterbahn</i>
$A_{Nadel,innen}$	$mm^2$	<i>Innenfläche der Nadel</i>
$A_P$	$m^2$	<i>Gesamtoberfläche der Pulverpartikel</i>
$A_v$	$mm^2$	<i>Querschnittsfläche der vertikalen Leiterbahn</i>
$D$	$mm^2$	<i>Durchmesser</i>
$F_1, F_2$	$N$	<i>Festhaltekraft für Lastfall 1 bzw. 2</i>
$F_G$	$N$	<i>Kräfte, die beim Greifen auftreten</i>
$F_{GK}$	$N$	<i>Gewichtskraft der eingelegten Komponente</i>
$Fr$	-	<i>Froude-Zahl</i>
$F_S$	$N$	<i>Schubkraft des Motors</i>
$I$	$A$	<i>Stromstärke</i>
$M_P$	$kg$	<i>Gesamtmasse der Pulverpartikel</i>
$P$	$W$	<i>Leistung</i>
$Q$	$mm^3/s$	<i>Volumenstrom</i>
$R$	$\Omega$	<i>elektrischer Widerstand</i>
$Re$	-	<i>Reynolds-Zahl</i>
$R_B$	$\Omega$	<i>elektrischer Widerstand des elektr. Bauteils</i>
$R_E$	$\Omega$	<i>Engewiderstand</i>
$R_F$	$\Omega$	<i>Fremdschichtwiderstand</i>
$R_L$	$\Omega$	<i>elektrischer Widerstand der Leiterbahn</i>
$R_{SMD}$	$\Omega$	<i>Widerstand des SMDs</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$R_{Ueber}$	$\Omega$	Übergangswiderstand
$R_{Vor}$	$\Omega$	Vorwiderstand
$S, S_z, S_{xy}$	-	Sicherheitsfaktor in z- bzw. xy-Richtung
$S_m$	$m^2/kg$	massebezogene spezifische Oberfläche
$S_{m, max}$	$m^2/kg$	max. massebezogene spezifische Oberfläche
$T_G$	$^{\circ}C$	Glasübergangstemperatur
$T_{Raum}$	$^{\circ}C$	Raumtemperatur
$U$	$V$	elektrische Spannung
$U_0$	$V$	Versorgungsspannung der Schaltung
$U_{LED}$	$V$	LED-Spannung
$V$	$mm^3$	Volumen
$VF_T, VF_K, VF_B, VF_L$	-	Volumenanteil Tinte (T), Klebstoff (K), Binder (B) oder Luft (L)
$X$	$\mu m$	Abstand

### Kleine lateinische Buchstaben

$\Delta p$	$bar$	Druckdifferenz
$\Delta t$	$ms$	Zeitschrittwert
$\Delta x$	$\mu m$	Dimension einer Gitterzelle
$a_{i, max}$	$m/s^2$	maximale Beschleunigung in Richtung i
$b_{Lippe}$	$mm$	Breite des Lippenadapters
$c_v$	%	Feststoffvolumenanteil
$d_P$	$\mu m$	Pulverkorndurchmesser
$d_{50}$	$\mu m$	mittlerer Pulverkorndurchmesser
$d_{90}$	$\mu m$	90. Perzentile des Partikeldurchmessers
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$h_v$	$mm$	Höhe des vertikalen Kanals

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$i_{max}$	$mm^3/s$	<i>maximaler Volumenstrom</i>
$i_{norm}$	$mm^3/s$	<i>Normvolumenstrom</i>
$l$	$mm$	<i>Länge</i>
$l_h$	$m$	<i>horizontale Länge der Leiterbahn</i>
$l_{Leiter}$	$m$	<i>Länge des Leiters</i>
$l_{Nadel}$	$m$	<i>Länge der Nadel</i>
$l_v$	$m$	<i>vertikale Länge der Leiterbahn</i>
$m$	$kg$	<i>Masse</i>
$m_{K1}, m_{K2}$	$mg$	<i>Masse der Komponente 1 bzw. 2 des 2K-Leitklebstoffs</i>
$\dot{m}_{Luft}$	$g/s$	<i>Luftmassenstrom</i>
$\dot{m}_{Pulver,max}$	$g/s$	<i>maximaler Pulvermassenstrom</i>
$p$	$bar$	<i>Druck</i>
$p_\infty$	$bar$	<i>Umgebungsdruck</i>
$r_1, r_2$	$mm$	<i>Radius der elektrischen Leiterbahn</i>
$r_{Kolben,innen}$	$mm$	<i>Innenradius des Kolbens</i>
$r_{Nadel,innen}$	$mm$	<i>Innenradius der Nadel</i>
$r_{Nadel,außen}$	$mm$	<i>Außenradius der Nadel</i>
$r_{Kugel}$	$mm$	<i>Kugelradius</i>
$s_a$	$mm$	<i>Abstand des SMD zum Boden der Kavität</i>
$s_p$	$mm$	<i>Abstand der parallelen Leiterbahnen</i>
$t$	$s$	<i>Zeit</i>
$t_{Eintauch}$	$mm$	<i>Eintauchtiefe</i>
$t_{Aussparung}$	$mm$	<i>Tiefe der Aussparung</i>
$v\%$	$\%$	<i>prozentuales Vakuum</i>
$v$	$m/s$	<i>Geschwindigkeit</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$v_{max}$	$m/s$	<i>maximale Verfahrgeschwindigkeit</i>
$v_K$	$m/s$	<i>Kolbengeschwindigkeit</i>
$v_V$	$m/s$	<i>Verfahrgeschwindigkeit des Moduls</i>
$y^+$	-	<i>Wandkenngröße in der Strömungssimulation</i>
$x, y, z$	-	<i>kartesische Koordinatenrichtungen</i>

### Griechische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\rho$	$\Omega mm^2/m$	<i>spezifischer Widerstand</i>
$\rho_h$	$\Omega mm^2/m$	<i>spez. Widerstand der horizontalen Leiterbahn</i>
$\rho_{Klebstoff}$	$g/cm^3$	<i>Dichte des Leitklebstoffs</i>
$\rho_{Luft}$	$kg/m^3$	<i>Luftdichte</i>
$\rho_{Pulver}$	$kg/m^3$	<i>Dichte der Pulverpartikel</i>
$\rho_v$	$\Omega mm^2/m$	<i>spez. Widerstand der vertikalen Leiterbahn</i>
$\eta$	$Pa s$	<i>dynamische Viskosität</i>
$\varepsilon$	-	<i>Porosität der Pulverschüttung</i>
$\mu$	-	<i>Reibbeiwert</i>
$\pi$	-	<i>Kreiszahl</i>
$\Theta$	$^\circ$	<i>Kontaktwinkel</i>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

*„Jeder Kunde kann sein Auto in einer beliebigen Farbe lackiert bekommen, solange die Farbe, die er will, schwarz ist.“ (Henry Ford)*

Die Produktion hat in den letzten 150 Jahren einen Wandel vollzogen. Wurde früher die Einführung des Förderbandes und damit das Zeitalter der Massenproduktion als zweite Industrielle Revolution gefeiert, ist die heutige Produktionstechnik geprägt durch Themen wie Digitalisierung und Wandlungsfähigkeit, um schnell auf kundenindividuelle Wünsche sowie neue Marktanforderungen reagieren zu können. Hinzu kommt, dass aufgrund der zunehmenden Globalisierung und des damit verbundenen Anstiegs des Wettbewerbsdrucks es für Unternehmen immer wichtiger wird, eine marktführende Position einzunehmen und neue, innovative Produkte frühestmöglich auf den Markt zu bringen (KALOGERAKIS 2010, ABELE & REINHART 2011).

Dem gegenüber steht der wachsende Aufwand für die Entwicklung innovativer Produkte. Neben der Zunahme an Komplexität hinsichtlich technischer Innovationen und der designtechnischen Ausprägungen erhöhen sich die Anforderungen durch politische Themen wie Umweltverträglichkeit und Ressourcenschonung (ELSNER 2009). Die für die Entwicklung oft benötigten Prototypen stellen dabei eine Engstelle im Entwicklungsprozess dar, da hierfür oft aufwändig Modelle und Werkzeugformen gefertigt werden müssen. Ein Prototyp beschreibt ein Hilfsmittel, um die menschliche Innovationskraft bei der Entwicklung zu unterstützen, als Diskussionsgrundlage für das oft interdisziplinäre Team zu dienen, endgültige Entscheidungen zu fördern und für einen fehlerarmen Produktionsablauf zu sorgen (DREHER 2005). Prototypen spielen daher eine entscheidende Rolle und können über den Zeitpunkt der Markteinführung bzw. sogar über Erfolg oder auch Misserfolg einer Entwicklung entscheiden.

Eine Möglichkeit, die Fertigung von Prototypen oder auch kundenindividuellen Produkten zu beschleunigen, ist durch die Technologie der additiven Fertigung gegeben. Additive Fertigung (VDI 3405 2014) ist ein Oberbegriff für eine Fertigungstechnologie, bei der geometrische Körper element- oder schichtweise aufgebaut werden.

# 1 Einleitung

---

Als Fertigungsverfahren werden allgemein Verfahren bezeichnet, welche die Herstellung von geometrisch bestimmten, festen Körpern zum Ziel haben. Eine Einteilung der verschiedenen Verfahren erfolgt nach DIN 8580 (2003), wobei die Verfahren der Hauptgruppen 1 bis 5 formbestimmende Verfahren sowie Beschichtungsverfahren sind und Verfahren der Gruppe 6 auf eine Beeinflussung der Stoffeigenschaften abzielen. Jede Hauptgruppe umfasst wiederum weitere Gruppen und Untergruppen. Eine Eingliederung der additiven Fertigungsverfahren in die DIN 8580 (2003) wurde noch nicht vorgenommen, ist aber derzeit in Bearbeitung. Aufgrund der formbestimmenden Eigenschaft, ausgehend von einem formlosen Ausgangswerkstoff, liegt eine Einordnung in die Hauptgruppe der urformenden Verfahren nahe (GEBHARDT 2013).

Eine schematische Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren ist nach GEBHARDT (2013) beispielsweise über den Aggregatzustand des Ausgangswerkstoffes möglich. Eine weitere Unterteilung erfolgt zunächst über die Ausgangsform des Materials und anschließend über den Mechanismus der Schichtbildung. Tabelle 1-1 gibt einen Überblick über die Einteilung der additiven Fertigungsverfahren.

*Tabelle 1-1: Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren (GEBHARDT 2013)*

Aggregatzustand	fest			flüssig		gasförmig	
Ausgangsmaterial	Draht	Pulver		Folie/Platte	Paste/Flüssigkeit	Aerosol	Gas
Verfestigungsmechanismus	Aufschmelzen und Erstarren		Verkleben durch Binder	Ausschneiden und Fügen	Polymerisieren	Abscheiden	Chemische Reaktion
Verfahren	Extrusion	Sintern und Schmelzen	3D-Druck	Schicht-Laminat	Polymerisation/Stereolithografie	Aerosol-Drucken	LCVD

Die in den 1980er Jahren entwickelten additiven Fertigungsverfahren stellen im Vergleich zu anderen Fertigungstechnologien eine recht junge Technologie dar. Aufgrund der verschiedenen parallelen Weiterentwicklungen dieser Technologie in unterschiedlichen Ländern wuchs neben der Anzahl unterschiedlicher Verfahrensvarianten auch die Anzahl der Synonyme für diese Fertigungsverfahren. So werden Begriffe wie *Rapid Prototyping*, *Solid Freeform Fabrication* und *3D-Druck* oft als übergreifende Bezeichnungen für das Fertigungsverfahren verwendet, teilweise in fragwürdiger oder unzutreffender Weise. Speziell der letztgenannte Begriff, *3D-Druck* bzw. engl. *3D-Printing*, setzt sich in englischsprachigen Ländern als geläufiger Ausdruck für diese Technologien durch, während im deutschsprachigen Raum damit ein bestimmtes additives Verfahren, das *3D-Drucken* (Pulververfestigung mit Binder, vgl. VDI 3405 2014), bezeichnet wird.

Die hier vorliegende Arbeit folgt der 2014 veröffentlichten Norm VDI 3405 (2014) und nutzt für den Fertigungsprozess die Bezeichnung additive Fertigung sowie

nach DIN 8580 (2003) die Bezeichnung *Werkstück* für das Endprodukt des Verfahrens. Werkstücke, die zum Zweck einer Voruntersuchung bzw. Prüfung erzeugt wurden, werden als *Probekörper* bezeichnet. Objekte, die sich noch im Druckprozess befinden, werden in dieser Arbeit als *Bauteile* bezeichnet.

Durch die kontinuierliche Verbesserung der Technologie handelt es sich bei den additiven Fertigungsverfahren nicht länger nur um Verfahren für die Erstellung von Prototypen, sondern um Fertigungsverfahren, mit denen es möglich ist, kleine und mittelgroße Serien eines Produktes in kurzer Zeit wirtschaftlich herzustellen (PRESSER 2012). Dabei ist speziell die Flexibilität des Verfahrens, die dadurch erreichbare Formgebungsfreiheit sowie die Durchgängigkeit der Datenkette ein entscheidender Vorteil gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren (ZAEH 2006), wodurch die Fertigungszeit (Durchlaufzeit) auf ein Achtel bis ein Zehntel verkürzt werden kann (NEDELCO 2011).

Das Potenzial dieser Technologie wird in der produzierenden Wirtschaft bereits erkannt. In den Wirtschaftssektoren, die sich mit Dental- und Medizinprodukten beschäftigen, wird dieses Verfahren bereits jahrelang erfolgreich eingesetzt. Weitere Industriezweige, wie die Luft- und Raumfahrttechnik, befassen sich erst seit kurzem mit der Implementierung einzelner Verfahren in die bestehende Produktionsstruktur. Im kunststoffverarbeitenden Sektor wächst zunehmend die Forderung nach serienidentischen Prototypen sowie funktionalen Kleinserien (ELSNER 2009). Zukünftige wichtige Geschäftsbereiche sind nach GAUSEMEIER ET AL. (2012) im Automobilbau und in der Elektrotechnik zu sehen. Speziell die Integration von Sensoren und Aktoren in Werkstücken inklusive der Verdrahtung spielt eine immer wichtigere Rolle. Diese Kombination zu Bauteilen mit elektrischen Funktionen öffnet den Zugang zu einer Produktgeneration mit einem noch nicht dagewesenen Ausmaß an Funktionsintegration (BAUMERS ET AL. 2014).

Der Ausdruck *Funktionsintegration* ist ein Begriff aus der Konstruktionslehre (BREUNINGER 2013) und beschreibt das Ziel, möglichst viele technische Funktionen mit wenigen oder nur in einem Werkstück umzusetzen (ZIEBART 2012). Derartige funktionsintegrierte Produkte werden als besonders elegante Lösung empfunden und sind zudem oft kleiner, leichter und kostengünstiger als die ursprüngliche Variante. Speziell bei den additiven Fertigungsverfahren kann die Funktionsintegration vergleichsweise einfach umgesetzt werden, da nahezu alle Verfahren aufgrund des schichtweisen Aufbaus die Möglichkeit bieten, auf jeden Bereich des Werkstücks temporär zugreifen zu können (KUMAR ET AL. 2001, GIBSON ET AL. 2010). Es gibt unterschiedliche Arten der Funktionsintegration, die sich durch ihre physikalische Wirkungsweise unterscheiden.

- **Mechanische Funktionsintegration**

Die Mechanik befasst sich mit der Beschreibung und Vorherbestimmung der Bewegungen von Körpern sowie der Wirkung und Ursache der involvierten Kräfte (GROSS ET AL. 2012). Übertragen auf additiv gefertigte Werkstücke bedeutet die mechanische Funktionsintegration, dass die Bewegung eines Körpers relativ zu einem System oder mehreren Körpern zueinander vereinfacht oder umgesetzt wird. Mechanische Funktionsintegration kann auch die Veränderung bzw. Verbesserung der Wirkung einer Kraft oder des Kraftflusses bedeuten. Daher werden auch Ansätze im Bereich Leichtbau und Bionik, ein Kunstwort, zusammengesetzt aus den Begriffen Biologie und Technik (BREUNINGER 2013), unter dieser Kategorie zusammengefasst. Beispiele mechanischer Funktionsintegration zeigen REINHART ET AL. (2012) und TEUFELHART & REINHART (2012) auf.

- **Thermodynamische Funktionsintegration**

Thermodynamik kann als allgemeine Energielehre definiert werden, in der mithilfe des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik die Verknüpfung unterschiedlicher Energieformen und mithilfe des zweiten Hauptsatzes die Bedingungen für die Umwandlung der verschiedenen Energieformen beschrieben werden (BAEHR & KABELAC 2012). Thermodynamische Funktionsintegration umfasst demnach alle Möglichkeiten, unterschiedliche Formen der Energie mithilfe eines additiv gefertigten Werkstücks umzuwandeln bzw. mit der Umgebung oder einem anderen Bauteil auszutauschen.

- **Elektrische Funktionsintegration**

Die Elektrotechnik befasst sich grundsätzlich mit der technischen Anwendung magnetischer und elektrischer Phänomene (MOELLER ET AL. 1996), wobei Letztgenannte ihre Ursache in der elektrischen Ladung bzw. deren Transport (elektrischer Strom) haben (HERING 2012). Werkstücke mit elektrischen Funktionen ermöglichen daher den Transport von elektrischen Ladungen. Durch die zusätzliche Integration von elektrischen aktiven und passiven Komponenten können elektrische Schaltungen realisiert werden.

Neben diesen drei definierten Hauptfeldern gibt es weitere Möglichkeiten der Funktionsintegration, die nicht explizit einer Kategorie zugeordnet werden können, sondern Mischformen darstellen.

Die Motivation für die vorliegende Arbeit ergibt sich aus der heutigen Forderung nach hochgradig funktionsintegrierten Bauteilen, um die Dauer der Erstellung von



funktionalen Prototypen bzw. Kleinserien zu minimieren und den Bedürfnissen der Kunden nach individuellen komplexen Werkstücken mit kurzen Lieferzeiten nachzukommen. Eine wichtige Zukunftstechnologie ist dabei der Mix unterschiedlicher Materialien (ABELE & REINHART 2011), um damit z. B. auch einfache elektrische Funktionen in ein additiv gefertigtes Werkstück zu integrieren. Eine additive Verfahrensgruppe zur wirtschaftlichen Fertigung von Prototypen und Kleinteilen aus den unterschiedlichsten Materialien (Keramiken, Metalle, Kunststoffe etc. (PFEIFER 2006)) stellt die Binder-Jetting-Technologie dar, zu der z. B. das Verfahren *3D-Drucken* gehört. Eine detaillierte Darstellung des additiven Aufbauprozesses sowie der Potenziale und Einschränkungen dieser Technologie findet sich in den Abschnitten 2.2 und 2.6. Für die folgende Zielsetzung liegt der Betrachtungsfokus auf dem additiven Fertigungsverfahren *3D-Drucken*, bei dem pulverförmiges Material mithilfe eines Binders verfestigt wird.

### 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die funktionale Erweiterung des pulverbettbasierten 3D-Druckprozesses für die Erzeugung von einfachen elektrischen Schaltungen in einem 3D-gedruckten Werkstück. Es ist dabei allerdings nicht das Ziel dieser Arbeit, eine Konkurrenztechnologie zur konventionellen Leiterplattenherstellung zu entwickeln.

Die Zielsetzung lässt sich grundsätzlich in zwei Teilbereiche gliedern: Zum einen in die *Integration von elektrischen Leiterbahnen* durch die Handhabung und Verarbeitung eines leitfähigen Materials und zum anderen in die *Integration und Ankontaktierung von elektrischen Komponenten*. Für beide Bereiche gilt es, basierend auf den gesetzten Anforderungen und den Rahmenbedingungen, zusätzliche Prozesse zu entwickeln, eine 3D-Druckanlage technisch zu erweitern und die Eigenschaften der Erweiterungen durch Versuche zu ermitteln.

#### **Integration von elektrischen Leiterbahnen**

Ziel dieses Teilbereichs ist die Integration elektrischer Leiterbahnen in einem 3D-gedruckten Werkstück. Eine Leiterbahn wird als eine elektrisch leitende Verbindung definiert. Anstatt bestehende Leiterplatten in einem dafür vorgesehenen Bereich zu platzieren, soll das volle Potenzial des Schichtbauverfahrens genutzt und es sollen sowohl zweidimensionale (in einer Schicht) als auch dreidimensionale (schichtübergreifende) Leiterbahnen während des additiven Aufbauprozesses erzeugt werden (vgl. Abbildung 1-1). Dies ermöglicht die flexible Erstellung von elektrischen Leiterbahnen und dadurch deren Anpassung an die Geometrie des Werkstücks. Aufgrund der schichtbasierten Bauweise müssen Subprozesse zur

## 1 Einleitung

---

Umsetzung der Zielsetzung entwickelt werden. Das Ergebnis sollen kompakte, zwei- und dreidimensionale Leiterbahnnetzwerke sein, die in einem Werkstück integriert sind.

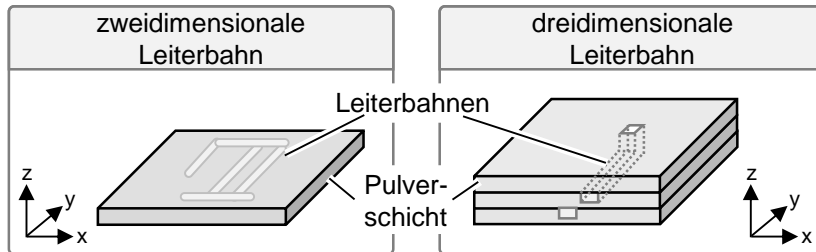


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung zweidimensionaler und dreidimensionaler Leiterbahnen

### Integration und Ankontaktierung von elektrischen Komponenten

Es gibt zwei Möglichkeiten zur Erreichung dieser Zielsetzung. Der erste Ansatz beinhaltet die Integration von bestehenden elektrischen Komponenten. Ein weiterer Ansatz sieht deren direkte Erstellung durch die sequenzielle Verarbeitung unterschiedlicher Materialien während des Bauprozesses vor. Da die Eigenschaften derart erzeugter Komponenten noch nicht denen der industriell hergestellten Produkte entsprechen, wird zunächst die Integration von bestehenden elektrischen Komponenten verfolgt. Ziel dieses Teilbereichs ist daher die Integration von elektrischen Komponenten während des additiven Aufbauprozesses und deren Verbindung mit Leiterbahnen zur Erzeugung von einfachen elektrischen Schaltungen. Dazu soll ein Prozess zur Handhabung sowie zur Ankontaktierung von elektrischen Komponenten beschrieben werden. Die Komponenten sollen dabei nicht nur auf der Oberfläche, sondern auch im Werkstück platziert werden können.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse beider Teilbereiche sowie deren Realisierung sollen den Anwendungsbereich der additiven Fertigungstechnik erweitern und so neue Möglichkeiten hinsichtlich der Gestaltung und Funktionalisierung von Werkstücken eröffnen. Eine Erweiterung der additiven Fertigungstechnologien mit Technologien aus der Elektronikproduktion kann eine Vielzahl an Vorteilen eröffnen.

Die dadurch erlangte Designfreiheit bietet das Potenzial, durch komplexe, der Form angepasste Schaltungen ihr Volumen zur Implementierung im Werkstück zu reduzieren und somit das Produkt an die Anforderungen aus der Anwendung anzupassen (LOPES ET AL. 2014). Zudem ist eine vollständig in das Werkstück integrierte Schaltung vor äußeren Einflüssen geschützt (GUTIERREZ ET AL. 2011), was

beispielsweise bei Implantaten eine wichtige Rolle spielt. Durch das Einarbeiten von leitenden Strukturen in ein Kunststoffbauteil entfallen zudem isolierende Schichten, wie sie bei Kabeln und Leiterplatten üblich sind, was sich zusätzlich positiv auf die Werkstückmasse auswirkt. Weiterhin kann nach ANSORGE ET AL. (2010) die Anzahl der für die Erstellung der elektrischen Schaltung notwendigen Prozessschritte von typischerweise 20 Einzelschritten für die Erstellung von konventionellen zweilagigen Leiterplatten auf fünf Arbeitsschritte reduziert werden. Ein weiterer bedeutender Vorteil des erweiterten Druckprozesses liegt in der Möglichkeit, Funktionen bereits bei der Bauteilerstellung zu generieren, wodurch z. B. aufwändige, oft manuelle Montageschritte in einem nachgelagerten Prozess entfallen (NEDELCO 2011). Neben der verbesserten Umweltfreundlichkeit aufgrund des Wegfalls chemischer Prozessschritte (LOPES ET AL. 2012) sowie der Fertigung des Produktes in einer Anlage ohne Umspann- bzw. Transportvorgänge können zudem Herstellungskosten eingespart werden.

### 1.3 Vorgehensweise

Zur Erreichung der beschriebenen Zielsetzung ist die Arbeit nach folgendem, in Abbildung 1-2 dargestellten Schema strukturiert.

Die Arbeit untergliedert sich in acht Kapitel, wobei im ersten Kapitel die Motivation sowie die Zielsetzung erläutert wurden. Für eine bessere Bewertbarkeit des aktuellen Stands der Forschung und Technik sowie der in dieser Arbeit erreichten Ziele werden zunächst im Kapitel 2 der aktuelle 3D-Druckprozess (Abschnitt 2.2) mit den eingesetzten Materialien (Abschnitt 2.3 und 2.4) sowie die dadurch erzielbaren Werkstückeigenschaften (Abschnitt 2.5) analysiert. Anschließend werden die Potenziale und Einschränkungen dieses Verfahrens aufgezeigt (Abschnitt 2.6). Zur Konkretisierung der Ziele wird darüber hinaus eine einfache elektrische Schaltung ausgelegt (Abschnitt 2.7). Zusammen mit den Erkenntnissen aus der Analyse werden in Abschnitt 2.8 die Anforderungen definiert.

Zur Berücksichtigung bereits bestehender Ansätze zeigt Kapitel 3 Aktivitäten gemäß dem derzeitigen Stand der Forschung und Technik. Der Fokus liegt dabei auf Arbeiten, die in Verbindung mit einem additiven Kunststoffverfahren umgesetzt wurden. Unterschieden wird in Ansätze, die nur einen der Teilbereiche betrachten, also entweder die *Integration von Leiterbahnen* (Abschnitt 3.2) oder die *Integration von elektrischen Komponenten* (Abschnitt 3.3), sowie in Ansätze, die bereits beide Bereiche realisiert haben (Abschnitt 3.4). Arbeiten im letztgenannten

## 1 Einleitung

---

Abschnitt werden anhand der definierten Anforderungen bewertet und somit werden bestehende Defizite aufgezeigt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird der notwendige Handlungsbedarf zur Zielerreichung ermittelt.

Im darauf folgenden Kapitel 4 werden aufbauend auf dem bestehenden 3D-Druckprozess Subprozesse erarbeitet, die sowohl die *Integration von elektrischen Leiterbahnen* (Abschnitt 4.2) wie auch die *Integration und Ankontaktierung von elektrischen Komponenten* (Abschnitt 4.3) ermöglichen. Neben der Auswahl eines leitfähigen Materials (Abschnitt 4.2.2) gilt es, neue Prozesse für die Erweiterung des 3D-Druckprozesses zu erarbeiten. Unter anderem gehören dazu Prozesse zur Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen (Abschnitt 4.2.5), zur Integration der Komponenten in ein Pulverbett (Abschnitt 4.3.3) sowie zu deren Verbindung mit einer bestehenden Leiterbahn (Abschnitt 4.3.5). Für die Handhabung der Komponenten wird basierend auf den definierten Anforderungen ein Handhabungskonzept entwickelt (Abschnitt 4.3.4). Die Umsetzbarkeit beider Teilbereiche wird anhand von Voruntersuchungen bewiesen. Der Prozess wird entsprechend erweitert (Abschnitt 4.2.7 und Abschnitt 4.3.6). Der zukünftige Gesamtprozess zur Erzeugung von Werkstücken mit integrierten elektrischen Schaltungen wird in Abschnitt 4.4 dargestellt.

Zur Umsetzung der Erweiterung gilt es in Kapitel 5, neue Module für die Verarbeitung eines leitfähigen Materials (Abschnitt 5.3) sowie zur Erzeugung von Vertiefungen und zum Transport der elektrischen Komponenten (Abschnitt 5.4) zu entwickeln. Ein *Modul* wird definiert als eine in sich geschlossene, technische Erweiterung der Anlage, die für die Durchführung von definierten Aufgaben eingesetzt werden kann. Für deren Entwicklung werden zunächst der 3D-Druckprozess sowie der jeweilige erweiterte Subprozess analysiert (Abschnitt 5.3.1 bzw. 5.4.1). Daraus werden technische Anforderungen an die Erweiterungen definiert (Abschnitt 5.3.2 bzw. 5.4.2). Die hardwaretechnischen Umsetzungen werden in den Abschnitten 5.3.3 bzw. 5.4.3, die softwareseitige Implementierung in Abschnitt 5.5 dargestellt.

Die durch die Prozesserweiterung erreichbaren Eigenschaften werden in Kapitel 6 analysiert. Zunächst werden die Materialeigenschaften bei einem Einsatz während des 3D-Druckprozesses untersucht. Betrachtet wird neben der Verarbeitbarkeit (Abschnitt 6.2.2) des Werkstoffs auch seine Reaktion auf verschiedene Belastungen. Dazu gehören der Trocknungsprozess (Abschnitt 6.2.5), thermische Wechselzyklen (Abschnitt 6.2.6) sowie eine elektrische Belastung (Abschnitt 6.2.7). Die Untersuchungen wurden jeweils mit und ohne elektrische Komponente durchgeführt, um mögliche Einflüsse der Belastungen auf die elektrischen Leiterbahnen und auf die Kontaktierungsstellen zu identifizieren. Nach der Spezifizierung des

Materials werden die technischen Eigenschaften beider Module untersucht. Dafür werden zunächst die relevanten Prozessparameter für die entsprechende Aufgabe und anschließend über eine Versuchsreihe deren Einfluss auf die Zielkenngröße ermittelt. Die Module werden anhand der Erkenntnisse aus den Versuchsreihen einzeln bewertet, bevor in Abschnitt 6.5 die Gesamtzielerreichung anhand der in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen untersucht wird.

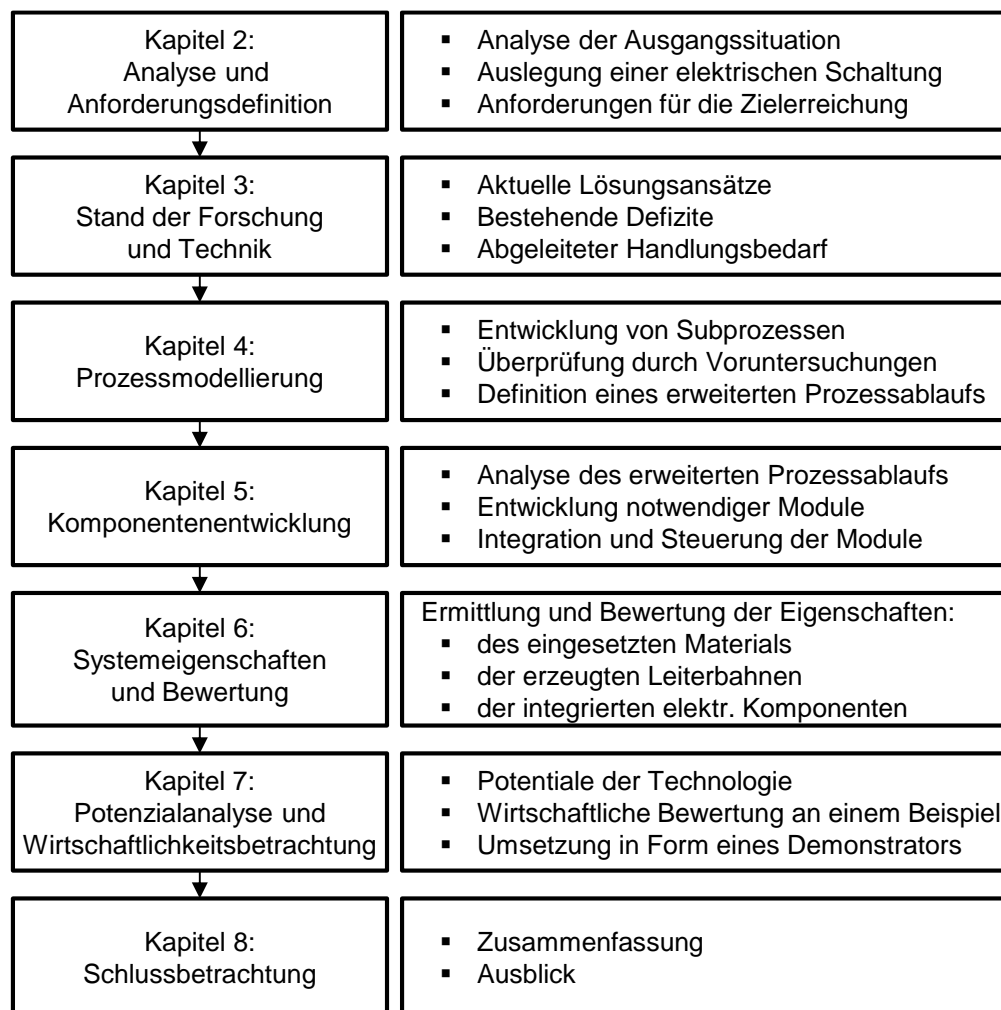


Abbildung 1-2: Vorgehensweise im Rahmen der vorliegenden Arbeit

In Kapitel 7 wird das Potenzial des neuen Prozesses analysiert. Dafür werden mithilfe einer ausgewählten Methode unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten untersucht (vgl. Abschnitt 7.2), bevor anhand eines ausgewählten Werkstücks die vorgeschlagene Form der Wirtschaftlichkeitsbewertung beschrieben wird (vgl. Abschnitt 7.4). Ein Demonstrator belegt die Umsetzbarkeit des erweiterten Druckprozesses (vgl. Abschnitt 7.5).

## **1 Einleitung**

---

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse zusammengefasst und die Arbeit wird mit einem Ausblick auf weitere Forschungs- und Entwicklungsthemen abgeschlossen.

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

### 2.1 Vorgehen im Kapitel

Zur Vermeidung von umfangreichen Konzeptanpassungen zu einem späteren Zeitpunkt der Entwicklung ist es notwendig, ein adäquates Verständnis des Gesamtprozesses durch eine detaillierte Analyse der vorliegenden Systeme (Prozesse und Materialien) sicherzustellen. Basierend darauf können Anforderungen an die zu entwickelnden Teilsysteme definiert werden, was eine Eignung des Konzepts für den Anwendungsfall sicherstellt.

Im Folgenden werden zunächst der 3D-Druckprozess (vgl. Abschnitt 2.2), die dabei eingesetzten Materialien (vgl. Abschnitt 2.3 und 2.4) sowie die Eigenschaften der dadurch erzeugten Werkstücke (vgl. Abschnitt 2.5) mit deren Potenzialen (vgl. Abschnitt 2.6.1) und Einschränkungen (vgl. Abschnitt 2.6.2) beleuchtet. Anschließend werden die notwendigen Kenngrößen der zu erzeugenden elektrischen Schaltung definiert (vgl. Abschnitt 2.7), bevor im Abschnitt 2.8 die für die Zielerfüllung erforderlichen Anforderungen definiert werden.

### 2.2 Analyse des 3D-Druckprozesses

Die Beschreibung der einzelnen Prozessschritte wird durch eine schematische Illustration (vgl. Abbildung 2-1) unterstützt. Der Hauptprozess beim Verfahren *3D-Drucken* besteht aus den sich schichtweise wiederholenden Arbeitsschritten *Pulver auftragen*, *Drucken* und *Bauplatzform absenken* (EDERER 2008) und ist bis auf den Druckprozess bei den meisten additiven Verfahren identisch.

Das bereitgestellte Pulvermaterial wird mithilfe einer Klinge bzw. einer gegenläufig rotierenden Walze aufgetragen. Ziel ist die Nivellierung des Pulvers zur Erzeugung einer ebenen Pulverschicht mit einer Schichthöhe von üblicherweise 80 µm bis 150 µm. Bei dem Prozessschritt *Drucken* wird das erzeugte Pulverbett mithilfe eines Inkjet-Druckkopfes selektiv mit einer Flüssigkeit (Binder) benetzt (ZÄH ET AL. 2011), anschließend wird die Bauplatzform um eine Schichtstärke abgesenkt. Die einzelnen Prozessschritte werden so oft durchgeführt, bis jede Schicht des Objekts bearbeitet wurde. Die Verfestigung des Pulverwerkstoffes erfolgt nach einer Startreaktion durch eine radikalische Polymerisation des Monomers Methacrylsäuremethylester (MMA), das als Flüssigkeit dem Prozess zugeführt wird (KELLNER 2013).

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

Nach einer prozesstypischen Aushärtezeit kann das Objekt entpackt und von dem restlichen Pulver befreit werden (EDERER 2007). Eine vorzeitige Entnahme führt zu einer Schädigung des Werkstücks, nämlich dann, wenn der chemische Verfestigungsprozess noch nicht abgeschlossen ist. Weiterhin führt eine Erhöhung der Umgebungstemperatur zu einer Beschleunigung des chemischen Verfestigungsprozesses bzw. zu einem Verdampfen des Binders, wodurch die folgenden Schichten nicht mehr adäquat an die vorherigen angebonden werden können.

Der erzeugte Körper weist, bedingt durch den Verfestigungsmechanismus, eine sehr hohe Porosität und eine geringe Festigkeit auf und wird aus diesem Grund *Grünling* genannt (PATIRUPANUSARA ET AL. 2008). Abhängig von dem Einsatzzweck des Werkstücks kann das Objekt in einem Nachfolgeprozess mit zusätzlichem Material (z. B. Epoxidharz, Wachs oder Klebstoff) infiltriert werden. Dazu wird der Körper in eine entsprechende Flüssigkeit eingetaucht und nahezu vollständig damit infiltriert (BREUNINGER 2013). Nach einem erneuten Aushärteschritt ist der Herstellungsprozess beendet. Weitere Bearbeitungsschritte zur Erreichung der endgültigen Form sind möglich.

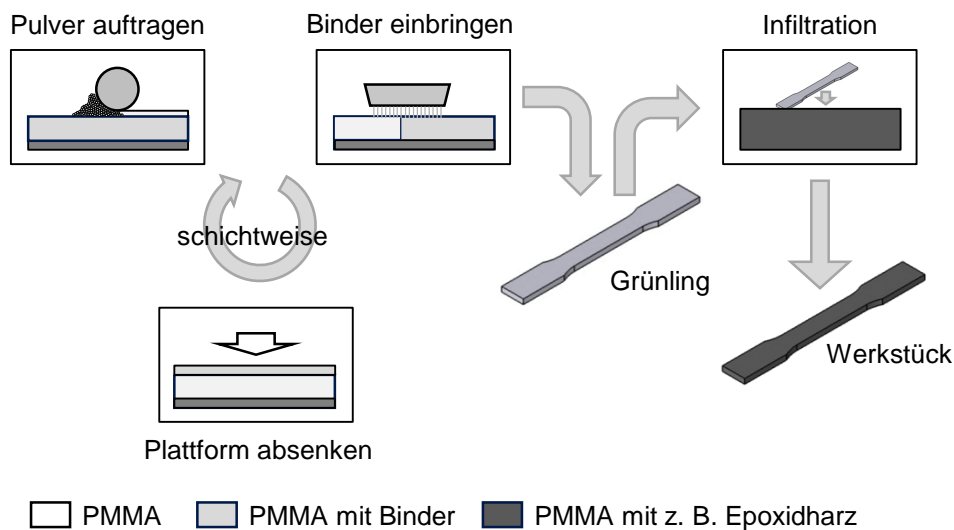


Abbildung 2-1: Prozess beim pulverbettbasierten 3D-Drucken

### 2.3 Materialeigenschaften des Pulverwerkstoffes

Das in dieser Arbeit verwendete Pulver wurde von der Firma *voxeljet AG* bezogen und hat die Verkaufsbezeichnung PolyPor-Pulver Typ A. Dabei handelt es sich um Polymethylmethacrylat-Pulver mit einem Radikalbildner BPO (Benzoylperoxid)



## 2.3 Materialeigenschaften des Pulverwerkstoffes

---

sowie weiteren Additiven, die die Eigenschaften von Polymeren gezielt beeinflussen (ROOS & MAILE 2011). Seit den 1930er und 1940er Jahren wird der Ausgangswerkstoff Polymethylmethacrylat (PMMA) auf großtechnischen Anlagen (DOMININGHAUS ET AL. 2005) industriell hergestellt (PRESSER 2012). Dabei handelt es sich um einen amorphen Kunststoff, der aus dem Monomer MMA erzeugt wird (KAISER 2011). Das Material, auch als Plexiglas® bekannt, kann durch alle bekannten Verfahren der radikalischen Polymerisation (Masse-, Emulsions- und Suspensionspolymerisation) gewonnen werden (DOMININGHAUS ET AL. 2012).

Die radikalische Polymerisation wird in drei typische Phasen unterteilt, in die Startreaktion, das Kettenwachstum und den Kettenabbruch, für den es drei Möglichkeiten gibt:

- **Disproportionierung:** Ein Radikal geht eine Bindung mit einem Elektron samt Wasserstoffatom ein. Dieses stammt von einem weiteren Radikal, das nun zwei ungepaarte Elektronen besitzt, die sich anschließend vereinen und eine Doppelbindung ausbilden.
- **Rekombination:** Zwei Enden einer Kette mit je einem freien Elektron treffen zufällig aufeinander und vereinen sich.
- **Inhibition:** Ein Inhibitor (z. B. Sauerstoff) reagiert mit einem reaktiven Kettenende. Das so entstehende freie Radikal ist weniger reaktionsfähig als das reaktive Kettenende, wodurch von einem Kettenabbruch gesprochen werden kann (KAISER 2011).

Der Pulverwerkstoff für den 3D-Druckprozess ist ein brennbares, aber nicht leicht entflammbares Pulver, das im richtigen Mischungsverhältnis mit Luft eine explosive Staubwolke formen kann. Seine Dichte liegt zwischen  $1,1 \text{ g/cm}^3$  und  $1,18 \text{ g/cm}^3$ , der Schmelzpunkt in einem Bereich zwischen  $150 \text{ °C}$  und  $230 \text{ °C}$  (VOXELJET AG 2008A).

Die Pulverkörner weisen eine sphärische Form auf, wobei die Oberfläche als nahezu ideal glatt angenommen werden kann. Eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer losen Pulverschüttung ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

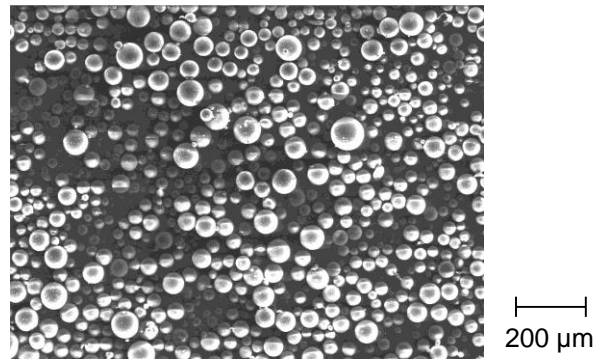


Abbildung 2-2: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Pulverwerkstoffs PolyPor-Pulver Typ A bei einer Beschleunigungsspannung von 7 kV (Aufnahme: Kompetenzzentrum Mechatronik der Hochschule Augsburg)

Der Durchmesser der PMMA-Körner variiert und wird vom Hersteller in einem Bereich zwischen 10 µm und 200 µm angegeben, wobei auch Pulverkörner mit geringerem bzw. größerem Durchmesser in einer Charge enthalten sein können. Abbildung 2-3 stellt die mithilfe der Laserbeugungsspektroskopie ermittelte Korngrößenverteilung anhand einer Beispielprobe dar.

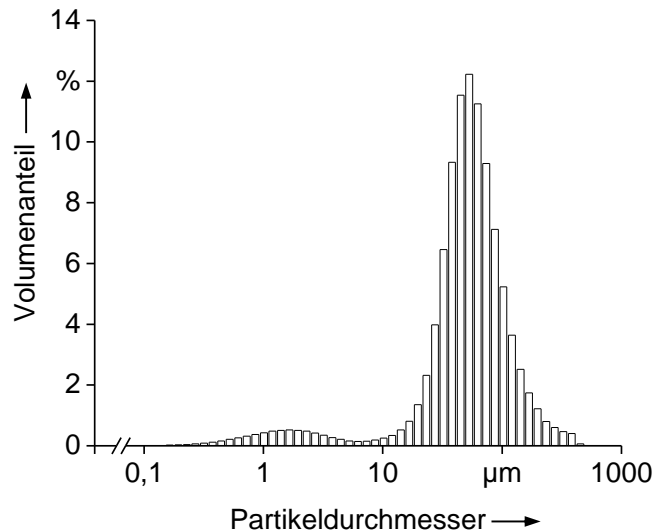


Abbildung 2-3: Korngrößenverteilung einer Beispielprobe des PMMA-Pulvermaterials (GLASSCHROEDER ET AL. 2014)

Der mittlere Korngrößendurchmesser der Beispielprobe wurde mit  $d_{50} = 49 \mu\text{m}$  berechnet. Das Ergebnis der Pulveranalyse zeigt auch Pulverkörner mit einem Durchmesser von über 200 µm, was aufgrund einer Schichtdicke von 150 µm zu Problemen bei der Schichterzeugung führen kann. Diese Anteile gilt es vorab über

## 2.3 Materialeigenschaften des Pulverwerkstoffes

einen Siebprozess auszusondern, um spätere Baufehler zu vermeiden. Weiterhin enthält das Pulvermaterial eine Vielzahl an Partikeln mit einem Durchmesser  $d_P < 10 \mu\text{m}$ , deren Anteil am Gesamtvolumen zwar gering ist, aber die massebezogene spezifische Oberfläche (STIESS 2009)

$$S_m = \frac{A_P}{M_P} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

mit

$S_m$ : massebezogene spezifische Oberfläche

$A_P$ : Gesamtoberfläche der Pulverpartikel

$M_P$ : Gesamtmasse der Pulverpartikel

signifikant steigen lässt. Dieser Faktor ist für das Verhalten der Binderflüssigkeit nach dem Auftragen und somit für die aufzutragende Bindermenge ausschlaggebend (BUDDING & VANEKER 2013). Eine Darstellung des Oberflächenanteils in Abhängigkeit der Partikeldurchmesser zeigt Abbildung 2-4.

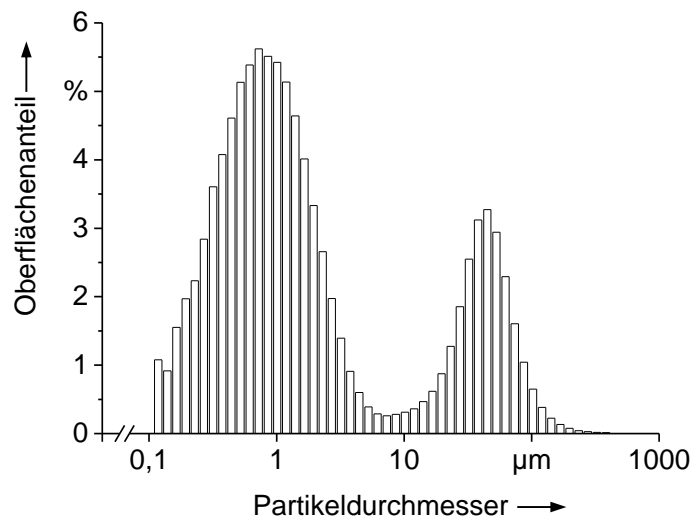


Abbildung 2-4: Verteilung der spezifischen Oberfläche der Beispielprobe aus Abbildung 2-3

Bei der Erzeugung einer Pulverschicht mithilfe des Beschichters stellt sich in Abhängigkeit der Rand- und Umgebungsbedingungen sowie der oben beschriebenen Pulvereigenschaften eine spezifische Schüttung ein. Eine weitere wichtige Pulvereigenschaft ist die erzielbare Porosität einer Pulverschüttung  $\varepsilon$  (STIESS 2009):

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen der Luft}}{\text{Gesamtvolumen aus Pulver und Luft}} \quad (\text{Gl. 2-2})$$

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

Der Feststoffvolumenanteil  $c_v$  beschreibt im Gegensatz dazu den prozentualen Volumenanteil der Pulverkörner am Gesamtvolumen und kann aus dem Porositätswert abgeleitet werden:

$$c_v = 1 - \varepsilon \quad (\text{Gl. 2-3})$$

Der Feststoffvolumenanteil ist bei einer Pulverschüttung aufgrund der Pulverform begrenzt und liegt bei gleich großen Durchmessern der Körner unter Darstellung der dichtesten Kugelpackung bei einem maximalen theoretischen Wert von 74 % (BLICHFELDT 1929). Durch die vorherrschende Verteilung der Partikeldurchmesser ist es prinzipiell möglich, dichtere Packungen zu erzeugen. Jedoch herrschen zwischen den trockenen Pulverpartikeln physikalische Wechselwirkungen, beispielsweise van-der-Waals-Kräfte und elektrostatische Kräfte, die speziell ein Anhaften der Kugeln im Mikrometerbereich an größere Partikel bewirken und somit einen geringeren Raumfüllungsgrad zur Folge haben (SCHULZE 2009, STIESS 2009). Ein realistischer Wert für den Raumfüllungsgrad bei dem hier eingesetzten Pulversystem liegt etwa bei 64 %, kann aber je nach Beschaffenheit des Pulvers stark variieren.

### 2.4 Materialeigenschaften des Binderwerkstoffes

Der für den Druckprozess verwendete Binder wurde ebenfalls von der Firma *voxeljet AG* bezogen und hat die Verkaufsbezeichnung PolyPor-Binder Typ A. Dabei handelt es sich um ein Monomergemisch mit 50 % bis 75 % Styrol und 25 % bis 50 % an 2-Hydroxyethylmethacrylat (VOXELJET AG 2008B). Der Binder hat den Siedepunkt bei 145 °C, die Zündtemperatur liegt bei 480 °C (VOXELJET AG 2008B). Werte für die Viskosität und den Kontaktwinkel lagen nicht vor und wurden daher eigenständig erhoben.

Die Viskosität beschreibt die Kraftwirkung zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit und damit deren Zähigkeit bzw. innere Reibung (GLOBISCH 2011). Unterschieden wird zwischen der dynamischen und der kinematischen Viskosität, wobei letztere die dynamische Viskosität im Verhältnis zur Dichte der Flüssigkeit beschreibt und z. B. durch einen Auslaufbecher bestimmt werden kann (MEZGER 2010).

Die dynamische Viskosität des Binders wurde mit einem Rotations-Oszillationsrheometer HAAKE MARS III der Firma *Thermo Fisher Scientific Inc.* ermittelt und betrug 2,82 mPas. Die dazugehörige Messkurve zeigt die folgende Abbildung 2-5. Der Graph beinhaltet zwei Kurven, eine für die Messwerte bei der Beschleunigung des Messsystems und die zweite (gestrichelte Linie) für die Messwerte bei

der kontinuierlichen Reduzierung der Winkelgeschwindigkeit auf den Ausgangswert.

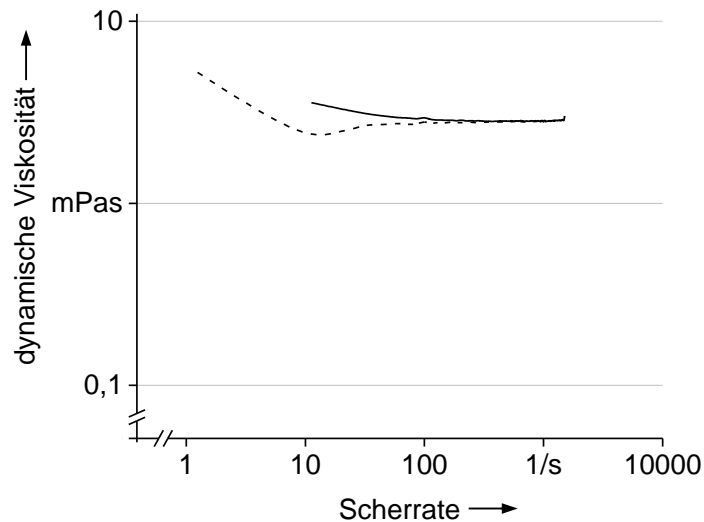


Abbildung 2-5: Dynamische Viskosität des verwendeten Binders PolyPor-Binder Typ A bei Raumtemperatur

In einer weiteren Untersuchung wurde die Abhängigkeit der Viskosität von Temperaturänderungen analysiert. Dabei konnte eine fluidtypische Abnahme der dynamischen Viskosität bei steigender Temperatur ermittelt werden (BOHL & ELMENDORF 2014), was die Verarbeitbarkeit der Flüssigkeit beim 3D-Druckprozess verbessert.

Neben der Viskosität ist ein weiterer wichtiger Parameter von Flüssigkeiten der Kontaktwinkel, der sich bei der Benetzung einer festen Oberfläche mit einer Flüssigkeit in einer gasförmigen Umgebung einstellt (BOHL & ELMENDORF 2014). Er hängt i.d.R. vom Werkstoff und der Rauheit der zu benetzenden Oberfläche ab. Zwischen den unterschiedlichen Phasen treten stoffabhängige Oberflächenspannungen auf, die bei Einstellung eines Kräftegleichgewichts den Kontaktwinkel ausbilden. Zu dessen Bestimmung wird die zu charakterisierende Flüssigkeit auf eine feste Oberfläche des Grundmaterials aufgetragen und der sich dabei ausbildende Winkel anhand von optischen Methoden bestimmt. Wie PALZER ET AL. (2001) in experimentellen Untersuchungen aufzeigen konnten, existiert ein Zusammenhang zwischen der Rauheit einer Feststoffoberfläche und dem ermittelten statischen Kontaktwinkel. Dabei wirken nach RYE ET AL. (1996) in den feinen Unebenheiten Kapillarkräfte, die zu einem niedrigeren Kontaktwinkel als bei ebenen

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

Flächen führen. Um eindeutige Aussagen zu erhalten, sollten daher die Untersuchungen auf der gleichen Oberfläche wie im eigentlichen Prozess vorgenommen werden.

Da das Grundmaterial, auf das der Binder aufgetragen wird, pulverförmig ist und dies zu einem für den Druckprozess notwendigen Einsickern der Flüssigkeit in die Pulverschüttung führt, ist die Bestimmung des statischen Grenzwinkels auf dieser Oberfläche nicht möglich. Die Ermittlung des Kontaktwinkels erfolgte daher durch den Auftrag des Binders auf eine PMMA-Platte (Plexiglasplatte), da diese die nahezu ideal glatten Oberflächeneigenschaften eines Pulverkorns in skalierter Form nachstellt.

Die Messungen wurden mit dem Gerät DSA 100 der Firma *Krüss GmbH* durchgeführt, die aufgetragene Flüssigkeitsmenge betrug dabei 2  $\mu\text{l}$ . Der Versuch wurde fünfmal durchgeführt, wobei jeweils der Winkel  $\theta$  am linken und am rechten Rand des Tropfens gemessen wurde.

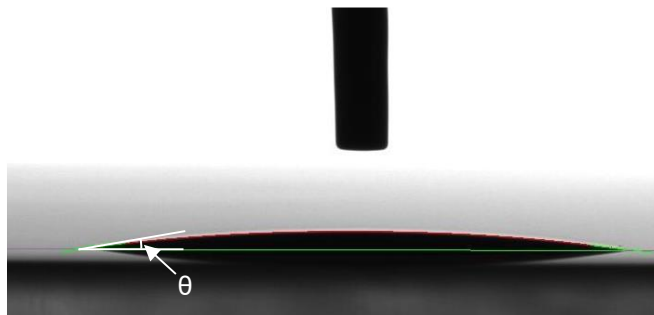


Abbildung 2-6: Kontaktwinkel zwischen Binder und Plexiglas in Luftatmosphäre

Der Binder bildete, gemittelt über die Messungen, einen flachen Grenzwinkel von  $6,6^\circ$  aus, was auf einen stark benetzenden Charakter der Flüssigkeit hinweist (BOHL & ELMENDORF 2014).

## 2.5 Eigenschaften 3D-gedruckter Bauteile

### Gestalt und Design

PMMA-Werkstücke aus Vollmaterial haben sehr gute optische Eigenschaften ohne Trübung und Eigenfarbe mit einer Lichtdurchlässigkeit im sichtbaren Wellenlängenbereich (380 nm bis 780 nm) von ca. 92 %. 3D-gedruckte Werkstücke aus PMMA erscheinen nach dem Aushärten grünlich, ohne die blaue Färbung des Binders durch den Hersteller wären die Komponenten weiß. Eine Transparenz kann aufgrund der hohen Porosität nicht erzielt werden. Erst nach der Infiltration

des Epoxidharzes in das Werkstück erscheint das Werkstück nahezu transparent, jedoch mit einer farblichen Veränderung.

Ein großer Vorteil der additiven Fertigungsverfahren ist die hohe Gestaltungsfreiheit bei der Konstruktion der Werkstücke, begründet durch den schichtweisen Aufbau. Beim 3D-Druckprozess sind jedoch, aufgrund des lokalen Auftrags einer Flüssigkeit auf ein Pulverbett, die Möglichkeiten im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren eingeschränkt. POLZIN ET AL. (2013) zeigen in ihrer Veröffentlichung anhand eines Demonstrators die geometrischen Grenzen des Verfahrens; so können z. B. Aussparungen lediglich mit einer Mindestbreite von 1 mm erzeugt werden. Der prozessbedingte Schwund sowie weitere geometrische Verzugsfehler wurden beispielsweise von SCHMUTZLER ET AL. (2016) untersucht.

### **Mechanische Eigenschaften**

Eine für das Einsatzfeld des Werkstücks maßgebliche Eigenschaft ist die mechanische Festigkeit. Diese ist material- und prozessabhängig und muss für einen industriellen Einsatz der Technologie reproduzierbar sein. Die dabei am häufigsten ermittelte Kennzahl ist die Zugfestigkeit, die der maximalen Zugspannung, mit der das Bauteil einachsiger belastet werden kann, entspricht DIN EN ISO 527-1 (2012).

PMMA als Vollmaterial ist ein spröder Werkstoff mit einer hohen Steifigkeit und Härte (BERGMANN 2008). Die mechanischen Eigenschaften 3D-gedruckter Werkstücke weichen davon ab. Aufgrund des additiven Herstellungsprozesses liegt zunächst eine lose Pulverschüttung vor, die durch Auftragen eines Binders punktuell verbunden wird (PATIRUPANUSARA ET AL. 2007). Die dadurch erreichbare mechanische Zugfestigkeit ist abhängig von der aufgetragenen Bindermenge. Den Einfluss des Binderanteils auf die Porosität des Grünlings untersuchten PATIRUPANUSARA ET AL. (2007). Je mehr Binder aufgetragen wird, desto geringer ist die Porosität, da der Binder nach der Polymerisation die Zwischenräume füllt.

Eine Sättigung des Grünlings, z. B. mit Epoxidharz, führt zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit. Exemplarische Werte für ein Bauteil mit einem Massenanteil an Binder von 15 Prozent zeigt Abbildung 2-7.

Eine Erhöhung der Bindermenge ist nach PATIRUPANUSARA ET AL. (2007) für einen nachfolgenden Infiltrationsschritt nachteilig, da die verzweigten Strukturen ein vollständiges Eindringen des Infiltrationsmaterials in das Bauteil behindern und somit mehrere mit Luft gefüllte Hohlräume bestehen bleiben.

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

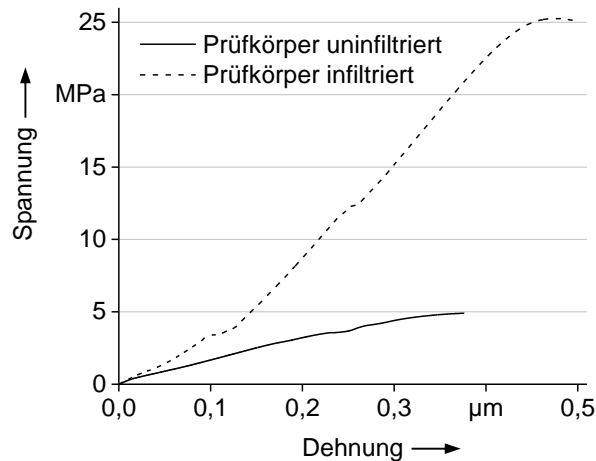


Abbildung 2-7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Probekörpers Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 (2012) aus PMMA mit einem Binderanteil von 15 Massenprozent im infiltrierten (Infiltrat = Epoxidharz HT 2) und im uninfiltrierten Zustand

### Thermische Eigenschaften

PMMA weist lediglich eine geringe Veränderung der mechanischen Eigenschaften in einem Temperaturbereich von  $-40\text{ °C}$  bis  $75\text{ °C}$  (KAISER 2011) auf. Die Glasübergangstemperatur von PMMA, eine Temperatur, bei der das Material vom Feststoff (energieelastischen Bereich) in einen weich- oder zähelastischen Zustand (entropieelastischer Bereich) (DOMININGHAUS ET AL. 2005) übergeht, liegt bei  $T_G \approx 105\text{ °C}$  (BERGMANN 2008, KAISER 2011). Eine kurzzeitige Temperaturbeanspruchung des Materials bis  $100\text{ °C}$  ist nach KAISER (2011) zulässig.

Angaben aus der Literatur zur spezifischen Wärmekapazität sind wenig aussagekräftig, da diese für das Vollmaterial gültig sind und *Grünlinge* eine hohe Porosität aufweisen. Da die Temperaturerhöhung aufgrund der chemischen exothermen Reaktion zwischen dem Binder und dem Pulver vernachlässigbar gering und der Wert für die Aufgabenstellung irrelevant ist, wurde dieser Wert nicht näher untersucht.

### Elektrische Eigenschaften

PMMA hat, abhängig von dem Feuchtigkeitsgehalt, gute elektrische Isolationseigenschaften. Als Pulver neigt das Material zu hohen elektrostatischen Aufladungen (KAISER 2011).



## 2.6 Potenziale und Einschränkungen des 3D-Druckprozesses

### 2.6.1 Potenziale des 3D-Druckprozesses

Die Technologie des 3D-Druckens ermöglicht neben der Erzeugung von verlorenen Formen für den Feinguss und der Erstellung von Gusskernen aus Sand (BERNARD ET AL. 2003) die Fertigung von Anschauungs- und Funktionsmodellen (POLZIN ET AL. 2013). BRABAZON ET AL. (2010) beispielsweise nutzen das Verfahren zur Herstellung von Gussformen aus Calciumsulfat-Pulver. Nach dem Gießprozess konnte eine Maßgenauigkeit der gegossenen Bauteile von  $\pm 0,22$  mm erreicht werden. EDERER (2008) weist darauf hin, dass durch zukünftige Entwicklungen die Möglichkeit besteht, dass eine Steigerung der Auflösung erreicht und damit die Maßgenauigkeit der Bauteile erhöht werden kann. Ein Vorteil des 3D-Druckverfahrens gegenüber anderen additiven Fertigungstechnologien liegt in der hohen Fertigungsgeschwindigkeit (PFEIFER 2006, EDERER 2007). Weiterhin weist das Verfahren eine hohe Flexibilität auf, da spezifische Bearbeitungswerkzeuge oder Umbaumaßnahmen der Fertigungsanlage wegfallen (HAGUE ET AL. 2004, ZAEH ET AL. 2007, CHIMENTO ET AL. 2011, MEHLER-BICHER & STEIGER 2012), wodurch Rüst- und Nebenzeit gering gehalten werden. Dies erlaubt geringe Herstellungszeiten sowie die Fertigung unterschiedlichster Werkstücke (RUFFO ET AL. 2006, ZAEH ET AL. 2007) in einem Bauauftrag und damit eine schnelle und flexible Reaktion auf Kundenanfragen (GIBSON ET AL. 2010). Die Form der Bauteile kann dabei nahezu beliebig komplex sein (BAK 2003, ZAEH ET AL. 2007, GIBSON ET AL. 2010, NEDELCO 2011, MEHLER-BICHER & STEIGER 2012). Die geometrischen Grenzen des 3D-Druckprozesses stellen POLZIN ET AL. (2013) dar.

Bei dem Verfahren *3D-Drucken* entfällt zudem, im Gegensatz zu FLM- oder LBM-Verfahren, der Nachbearbeitungsschritt der Supportentfernung, da das Pulverbett selbst die tragende Struktur für das Bauteil bildet (PHAM & GAULT 1998, EDERER 2007, BREUNINGER 2013). Da zudem keine kostenintensive Strahlquelle wie bei SLS- oder SL-Verfahren (ZAEH 2006) notwendig ist, handelt es sich bei dem Verfahren um ein sehr kostengünstiges Verfahren (EDERER 2007, NEDELCO 2011, BREUNINGER 2013) mit einfachen Maschinenkonzepten (PFEIFER 2006). Dieser Vorteil wird zusätzlich durch die im Vergleich zu anderen additiven Technologien geringen Material- (PFEIFER 2006) und Verbrauchskosten (Strom, Druckluft etc.) sowie die gute Skalierbarkeit des Prozesses verstärkt. So besitzt die größte auf dem europäischen Markt vorhandene 3D-Druckanlage ein Baufeld von  $4 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$  (VOXELJET AG 2015). Die derzeit weltweit größte Anlage wurde in China entwickelt und hat eine Länge von 12 Metern (BOGUE 2014). Durch die Verwendung mehrerer Druckköpfe kann die Prozesszeit verringert werden. Ein

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

weiterer innovativer Ansatz zur Senkung der Fertigungszeiten wird durch einen kontinuierlichen Drucker (*voxeljet VXC800*) realisiert, der durch ein Schrägstellen des Pulverbettes ein synchrones Bauen und Auspacken der Werkstücke ermöglicht (GÜNTHER ET AL. 2014). Basierend auf diesen Vorteilen wird das Verfahren zunehmend für die Erzeugung von Konzeptbauteilen und Funktionsmodellen verwendet (POLZIN ET AL. 2013). Aufgrund der großen Materialvielfalt, die das Verfahren zu verarbeiten erlaubt (Keramiken, Metalle, Kunststoffe, etc.) (PFEIFER 2006), findet diese Technologie in vielen Anwendungsbereichen Einsatz.

### 2.6.2 Einschränkungen des 3D-Druckprozesses

Bei der Vielzahl an Potenzialen weist das Verfahren des *3D-Druckens* allerdings auch prozessspezifische Einschränkungen auf. Neben den verfahrensüblichen Nachbearbeitungsschritten der additiven Fertigung von Kunststoffbauteilen (z. B. Entfernung von Restmaterial, Verringerung der Oberflächenrauheit etc.) erfordern die entpackten Werkstücke zusätzlich eine thermische Nachbehandlung in einem Ofen, um die Reste des Binders zu entfernen. Falls zudem die mechanischen Eigenschaften der Werkstücke (Dichte, Härte, Zugfestigkeit etc.) verbessert werden müssen, bedingt dies einen zusätzlichen nachgelagerten Infiltrationsprozess. Die letztgenannten Prozessschritte führen dazu, dass die bestehenden Poren gefüllt bzw. versiegelt werden (CHIMENTO ET AL. 2011) und so ein dichtes Werkstück erzeugt werden kann. Zusammen mit der benötigten Reaktionsdauer des Binders mit dem Pulver und der dadurch notwendigen 24-stündigen Verweildauer im Pulverbett erhöht dies die Fertigungszeit und mindert damit die Produktivität des Verfahrens.

Ferner stellt die geringe Festigkeit der aus PMMA-Pulver erzeugten Werkstücke eine Einschränkung des Verfahrens dar. Die in Abbildung 2-7 visualisierten Ergebnisse veranschaulichen unter anderem die Festigkeit des Materials, zum einen im uninfiltrierte und zum anderen im infiltrierte Zustand. Die Erhöhung der Festigkeit, z. B. durch eine Erhöhung der Bindermenge, geht meistens mit einer Verringerung der Formgenauigkeit der Bauteile einher (POLZIN ET AL. 2013), was den Nachbearbeitungsaufwand erhöht. Grundsätzlich stellt die Geometrieun- genauigkeit einen Nachteil des Verfahrens *3D-Drucken* dar: Lokal aufgebrachter Binder sickert undefiniert in die Hohlräume der Pulverschüttung. Ein horizontaler Fluss des Binders kann nicht unterbunden werden, wodurch Pulverpartikel im Randbereich des eigentlichen Werkstücks ebenfalls benetzt werden und so dort anhaften. Neben einer geringen Oberflächenqualität (BREUNINGER 2013) führt dies zu Ungenauigkeiten der Bauteilform (PRESSER 2012) und dadurch zu einer

Einschränkung der Funktionsintegration. Pulverkörner in Zwischenräumen können nur mit einer mechanischen Nachbearbeitung bzw. mit Druckluft effizient entfernt werden (BAI & WILLIAMS 2014), Abweichungen der Soll-Geometrie von der Ist-Geometrie können nicht unterbunden werden. Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Maßhaltigkeit und der Festigkeit werden bei POLZIN ET AL. (2013) dargestellt.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der Abhängigkeit des Reaktionsprozesses von der Umgebungstemperatur. Erhöhte Temperaturen führen zu einer Beschleunigung der Radikalbildung und somit zu einem Abbruch des Verfestigungsprozesses (DOMININGHAUS ET AL. 2005). Eine hinreichende Verbindung zwischen den einzelnen Schichten kann dadurch nicht mehr gewährleistet werden. Der gleiche Effekt wird durch eine Unterbrechung des Aufbauprozesses zwischen zwei Schichten erzielt. Durch den längeren Kontakt des Pulver-Binder-Gemisches mit der Atmosphäre kann es durch den bereits beschriebenen Effekt der Sauerstoffinhibition (vgl. Abschnitt 2.3) zu einer Abbruchreaktion kommen.

## 2.7 Auslegung einer elektrischen Schaltung

Der Begriff der elektrischen Schaltung ist ein gängiger Ausdruck aus der Praxis und kann mit der technischen Bezeichnung *elektrisches Netzwerk* gleichgesetzt werden (MOELLER ET AL. 2008). Ein elektrisches Netzwerk beschreibt dabei die Verbindung mehrerer elektrischer n-Pole, wobei der einfachste Vertreter der n-Pole der Grundzweipol ist und zum Beispiel ein elektrischer Widerstand sein kann. Dabei kann der Zusammenhang zwischen dem Eingang und dem Ausgang durch eine sogenannte Strom-Spannungs-Charakteristik  $I = f(U)$  eindeutig beschrieben werden (PREGLA 2009), die für das Zweipolverhalten und somit für die elektrische Komponente kennzeichnend ist. Ein elektrisches Netzwerk kann im einfachsten Fall aus zwei Zweipolen (z. B. Batterie und Glühlampe) bestehen (MOELLER ET AL. 2008). Hinsichtlich der Komplexität des Netzwerkes und somit der Anzahl der verbauten n-Pole sind keine Grenzen gesetzt. Ein elektrisches Netzwerk wird mit einem Schaltplan beschrieben. Dieser spezifiziert die in der Schaltung enthaltenen elektrischen Bauelemente und beschreibt deren Verknüpfungen (REISCH 2007). Somit besteht eine einfache elektrische Schaltung aus einer Spannungsquelle und mindestens einem elektrischen Bauelement, wobei diese mit elektrischen Leiterbahnen verbunden sind.

Aufgrund fehlender Vorerfahrungen im Bereich *Integration von elektrischen Schaltungen in 3D-gedruckte Werkstücke* werden die zu erreichenden Kenngrößen

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

einer elektrischen Schaltung zunächst anhand eines einfachen Beispiels, der Verschaltung einer Leuchtdiode mit den entsprechenden elektrischen Verbindungen, festgelegt.

Unter Berücksichtigung des späteren Einsatzbereichs der Werkstücke mit elektrischen Funktionen wird von einer Schaltung für Kleinspannungen mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 5 Watt ausgegangen. Bei einer Spannung von 12 V berechnet sich daraus eine maximale Stromstärke von 420 mA.

Die Leistung zum Betrieb einer Diode ist bauteilabhängig und errechnet sich am Beispiel einer weißen Diode mit einer Stromstärke von 20 mA bei einer max. Spannung von 3,2 V nach Gleichung 2-4:

$$P = U \cdot I = 3,2 \text{ V} \cdot 0,02 \text{ A} = 0,064 \text{ W} \quad (\text{Gl. 2-4})$$

mit

- $P$ : Leistung
- $U$ : Spannung
- $I$ : Stromstärke

Zum sicheren Betrieb der LED wird ein Vorwiderstand benötigt, an dem die überschüssige Spannung in der Schaltung abfällt. Er lässt sich am Beispiel einer Versorgungsspannung von 12 V durch Gleichung 2-5 berechnen:

$$R_{Vor} = \frac{U_0 - U_{LED}}{I} = \frac{12\text{V} - 3,2\text{V}}{0,02\text{A}} = 440 \Omega \quad (\text{Gl. 2-5})$$

mit

- $R_{Vor}$ : Vorwiderstand
- $U_0$ : Versorgungsspannung der Schaltung
- $U_{LED}$ : LED-Spannung

Der Vorwiderstand kann entweder über die Integration eines elektrischen Bauelements oder über den elektrischen Widerstand der Leiterbahn und deren Übergangswiderstand zur LED erzeugt werden. Sollte der elektrische Widerstand der Leiterbahn als Vorwiderstand nicht ausreichend sein, können beide Ansätze kombiniert und zusätzlich elektrische Widerstände in die Schaltung integriert werden. Der Vorwiderstand berechnet sich dementsprechend wie folgt:

$$R_{Vor} = R_L + R_B + R_{Ueber} \quad (\text{Gl. 2-6})$$

mit

- $R_L$ : elektrischer Widerstand der Leiterbahn  
 $R_B$ : Widerstand des elektrischen Bauelements  
 $R_{Ueber}$ : Übergangswiderstand

Der für das leitfähige Material maximale spezifische Widerstand lässt sich durch Gleichung 2-7 berechnen:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (Gl. 2-7)$$

Bei dem spezifischen Widerstand handelt es sich um eine temperaturabhängige Materialkonstante, die für die Berechnung des elektrischen Widerstandes bei homogenen Materialien eingesetzt wird. Durch Unregelmäßigkeiten, wie z. B. Materialeinschlüsse oder Fehlstellen, kann dieser Wert jedoch variieren.

Die Anforderungen hinsichtlich der Abmessungen der zu erzeugenden Leiterbahnen werden zunächst durch einen Standarddraht mit einem Durchmesser von 0,5 mm (Querschnittsfläche = 0,196 mm<sup>2</sup>) definiert. Bei einer angenommenen Drahtlänge von 300 mm berechnet sich daraus mithilfe der Gleichung 2-7 ein erforderlicher spezifischer Widerstand von 287,5 Ωmm<sup>2</sup>/m (Vergleichswert für Kupfer: 0,0171 Ωmm<sup>2</sup>/m). Da die Einbringung zusätzlicher elektrischer Komponenten jederzeit möglich ist, wird dieser Wert als der zulässige Maximalwert definiert.

## 2.8 Anforderungen aus der Analyse

### 2.8.1 Vorgehensweise

Basierend auf den in Abschnitt 2.2 bis 2.7 durchgeführten Analysen und Eigenschaftsdefinitionen werden im Folgenden die für die Zielerreichung notwendigen Anforderungen definiert. Sie sind gekennzeichnet durch ein Merkmal, das das Bezugsobjekt beschreibt, und eine Ausprägung, die bei quantitativen Anforderungen einen Sollwert bzw. bei nicht-quantitativen Anforderungen einen verbalen Ausdruck darstellt (PONN & LINDEMANN 2011).

Die im Folgenden definierten Anforderungen werden unterteilt in allgemeine Anforderungen, die sich aus der Zielstellung und der Analyse des 3D-Druckprozesses oder auch aus den Eigenschaften der erzeugten Bauteile ergeben (Abschnitt 2.8.2), sowie spezifische Anforderungen an den Prozessschritt der *Integration von Leiterbahnen* (Abschnitt 2.8.3) bzw. spezifische Anforderungen an den Prozessschritt der *Integration von elektrischen Komponenten* (Abschnitt 2.8.4).

### 2.8.2 Anforderungen aus der Prozessanalyse

Die in diesem Abschnitt definierten Anforderungen wurden aus der Zielsetzung (Abschnitt 1.2) und der Analyse des 3D-Druckprozesses (Abschnitt 2.2 bis 2.6) ermittelt. Folgende allgemeine Anforderungen (A1-9) an die Prozesserweiterung werden definiert:

- A1. Die zu erzeugenden elektrischen Schaltungen müssen sich in einem Werkstück befinden. Der erweiterte Prozess muss daher die Möglichkeit eines Eingriffs in jede Schicht des Aufbauprozesses vorsehen.
- A2. Elektrische Komponenten sowie das zusätzlich eingebrachte Material müssen sich ohne eine Beeinträchtigung der weiteren Prozessschritte integrieren lassen.
- A3. Zusätzliche Prozessschritte müssen für das Verfahren *3D-Drucken* geeignet sein. Eine definierte Erzeugung z. B. von Leiterbahnen muss gewährleistet sein.
- A4. Die Anzahl der technischen Module soll so gering wie möglich gehalten werden, um den Aufwand für die Erweiterung zu minimieren.
- A5. Sicheres Arbeiten an dem Versuchsstand muss trotz Anpassungen gewährleistet sein.

Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Bauteilqualität muss eine Beeinflussung des Herstellungsprozesses durch die zusätzlichen Arbeitsschritte unterbunden werden bzw. es dürfen diese keinen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften der Bauteile haben (siehe Anforderung A2). Umgekehrt soll der additive Aufbauprozess auch die eingebrachten Strukturen nicht beeinflussen. Daraus lassen sich folgende weitere Anforderungen spezifizieren:

- A6. Die zusätzlichen Prozessschritte (*Leiterbahnerzeugung* sowie *Integration von elektrischen Komponenten*) müssen in einer Anlage durchführbar sein, da eine Entnahme der gedruckten Bauteile während des Aufbauprozesses aufgrund der Formlabilität nicht möglich ist. Erweiterungen müssen sich demnach in den vorhandenen Bauraum einfügen lassen.
- A7. Die Prozesstemperatur im Bauraum ist konstant zu halten, da eine Temperaturveränderung in der Regel zu einer Beeinflussung des chemischen Verfestigungsprozesses und folglich zu einer Beeinflussung der Materialeigenschaften führt.
- A8. Eine mechanische Beeinflussung der gedruckten Struktur durch zusätzliche Prozessschritte ist zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten, da aufgrund des chemischen Verfestigungsprozesses das Bauteil laut Herstellerangabe erst nach 24 Stunden vollständig ausgehärtet ist.

- A9. Das fertige Werkstück sollte trotz zusätzlicher Bearbeitungsschritte nahezu gleichbleibende Eigenschaften wie ein Werkstück ohne elektrische Strukturen aufweisen.

### 2.8.3 Anforderungen an die Integration von Leiterbahnen

Als entscheidende Qualitätskriterien für die Leiterbahnen werden deren geometrische Abmessungen (Breite und Höhe) sowie der erzielbare elektrische Widerstand definiert.

HERING (2012) beschreibt den elektrischen Widerstand als ein Maß für die Hemmung des Ladungsträgertransportes durch einen elektrischen Zweipol. Für einen ohmschen Zweipol gilt die erstmals von OHM (1827) beschriebene Gleichung 2-8:

$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{Gl. 2-8})$$

Der Kehrwert des elektrischen Widerstandes (Einheit:  $\Omega$ ) ist der elektrische Leitwert (Einheit: S). Er gibt an, wie gut ein Körper den Strom leitet (MOELLER ET AL. 1996, OSE 2008) und hängt von dessen Abmessungen sowie von dessen elektrischer Leitfähigkeit ab. Diese wiederum wird unter anderem von der Konzentration und der Beweglichkeit der freien Ladungsträger und somit von den Eigenschaften des Materials bestimmt (IVERS-TIFFÉE & MÜNCH 2007, OSE 2008).

Der Wert des elektrischen Widerstandes bzw. die Leitfähigkeit bleibt konstant, solange die physikalische Beschaffenheit des Leiters nicht geändert wird (PREGLA 2009). Eine Änderung z. B. der Temperatur des Leiters führt zu einer Beeinflussung des spezifischen Widerstandes des Materials (IVERS-TIFFÉE & MÜNCH 2007, OSE 2008).

Zur Messung des Widerstandes eines Leiters kann die 2-Draht- und die 4-Draht-Widerstandsmessung verwendet werden (MUEHL 2014). Bei der Verwendung von Messspitzen werden durch Kontakt- und Leitungswiderstände an der Stromzuleitung Spannungsabfälle erzeugt, die den berechneten Widerstandswert bei der 2-Draht-Messmethode verfälschen. Kontaktwiderstände werden durch die wirksame Kontaktfläche zwischen Messspitze und Leiterbahn und den damit verbundenen Engwiderstand  $R_E$  sowie durch einen Fremdschichtwiderstand  $R_F$  erzeugt (VINARICKY 2012). Besteht zwischen der Messspitze und der Kontaktfläche ein Übergangsstoff, z. B. eine Oxidschicht, tritt neben dem Kontaktwiderstand zusätzlich ein Übergangswiderstand auf, der die Messung ebenfalls beeinflusst.

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

Durch die Anwendung der 4-Draht-Messmethode wird der Strom über zwei Leiter in die Leiterbahn eingespeist. Unter Verwendung des Ohm'schen Gesetzes kann aus dem gemessenen Spannungsabfall zwischen den mittleren beiden Leitern (Abstand  $X$ ) der Widerstand berechnet werden. Messfehler durch Übergangswiderstände zwischen den Messspitzen und der Oberfläche werden dadurch weitestgehend vermieden (MUEHL 2014). Dies ermöglicht eine präzisere Messung des elektrischen Widerstands als bei der 2-Draht-Messmethode. Abbildung 2-8 stellt den Aufbau einer 4-Draht-Widerstandsmessung dar.

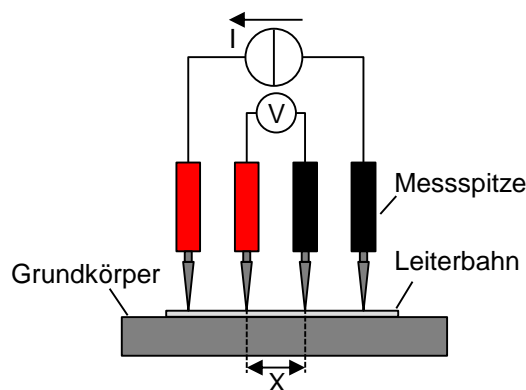


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung einer 4-Draht-Widerstandsmessung an einer Leiterbahn über den Abstand  $X$

Der eingespeiste Strom darf dabei nicht zu hoch sein, da durch den vorherrschenden Widerstand die elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird und so den Widerstandswert beeinflussen kann.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der rechnerischen Abschätzung (Abschnitt 2.7) ergeben sich spezifische Anforderungen, die im Folgenden mit L (Leiterbahn) bezeichnet werden:

- L1. Der erreichbare spezifische Widerstand der Leiterbahnen soll maximal  $287,5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  betragen (siehe Abschnitt 2.7).
- L2. Die geometrischen Abmessungen (Breite und Höhe) der leitenden Struktur sollen so gering wie möglich sein, die Querschnittsfläche der horizontalen Leiterbahn soll jedoch maximal  $0,196 \text{ mm}^2$  betragen.
- L3. Die Leiterbahnen sollen so flexibel wie möglich erzeugt werden können, um die Designfreiheit des Werkstücks nicht einzuschränken.
- L4. Die Erzeugung von zwei- wie auch dreidimensionalen Leiterbahnen (vgl. Abbildung 1-1) muss möglich sein.
- L5. Ein Ankontaktieren von elektrischen Komponenten an die Leiterbahn muss möglich sein.



### 2.8.4 Anforderungen an die Integration von Komponenten

Zur Integration von elektrischen Komponenten bedarf es neben der Ankontaktierung der elektrischen Komponenten an die horizontalen Leiterbahnen auch deren Handhabung während des additiven Aufbauprozesses.

Ein Handhabungsprozess gliedert sich nach WOLF & STEINMANN (2004) in drei Phasen: das Greifen eines Objektes, die Bewegung zum definierten Ort und das Ablegen an der entsprechenden Position. Die VDI 2860 (2004) erweitert das Modell durch zusätzliche Schritte zur Sicherung der Objekte und durch Kontrollmaßnahmen, die für komplexe Bewegungen im Raum unter Berücksichtigung von sechs verschiedenen Freiheitsgraden notwendig sind. Für weitere Informationen bezüglich der Grundlagen zur Handhabung sei hier auf WOLF & STEINMANN (2004) und HESSE (2011) verwiesen.

Die Komplexität der Handhabung und der Anbindung wird maßgeblich durch die Art der eingesetzten elektrischen Komponenten bestimmt. Hier wird grundsätzlich zwischen drei relevanten Bauarten unterschieden (FRANKE 1998, SCHEEL 1997), den bedrahteten THT-Komponenten, den oberflächenmontierten Komponenten (Surface-Mount Devices = SMDs) sowie den Nacktchips (Bare Dies). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den beiden erstgenannten, da diese am weitesten verbreitet sind. Elektrische Komponenten, die bei der Through-Hole-Technologie (THT) eingesetzt werden, werden in dafür vorgesehene Bohrungen in der Leiterplatte gesteckt und von der Unterseite mithilfe von Weichlötverfahren, wie z. B. Wellenlöten, an die Leiterbahnen ankontaktiert (WORMUTH & ZAPF 2001). Diese Technik hat den Vorteil, dass die Platinen höheren Belastungen (z. B. Vibrationen) standhalten und somit in hochbelasteten Einsatzfeldern Anwendung finden können. Als nachteilig erweisen sich der höhere Aufwand in der Vorbereitung der Komponenten und für die Bestückung der Platinen sowie der im Vergleich zur SMD-Technologie hohe Platzbedarf für die elektrischen Schaltungen (WORMUTH & ZAPF 2001).

Aufgrund der Forderungen der Konsumenten nach immer kleineren und leistungsfähigeren elektronischen Produkten sowie der Notwendigkeit für die Unternehmen, die Produktionskosten durch wirtschaftlichere Fertigungsprozesse zu reduzieren, hat sich die Surface-Mounting-Technologie (SMT) industriell schnell verbreitet, bei der die elektrischen Komponenten auf der Oberfläche der Platinen positioniert und dort mit den Leiterbahnen verbunden werden. Neben dem Vorteil der sehr kompakten Platinen verfügt diese Technologie über einen hohen Automatisierungsgrad (GROTE & FELDHUSEN 2011). Das Ablegen der Komponenten sowie die Anbindung an die Leiterbahnen sind im Vergleich zur THT aufgrund der

## 2 Analyse und Anforderungsdefinition

---

regelmäßigen Form der Komponenten vereinfacht. Von Nachteil ist die Anfälligkeit der Platinen gegen thermische und mechanische Beanspruchungen sowie der schlechte Zugang zu den Lötstellen (WORMUTH & ZAPF 2001).

Die unter Berücksichtigung der Zielsetzung abgeleiteten spezifischen Anforderungen für den Bereich der Integration von Komponenten werden im Folgenden mit K (Komponenten) bezeichnet. Es handelt sich dabei um folgende:

- K1. Unterschiedliche elektrische Komponenten sollten verarbeitbar sein, das System muss daher flexibel für die Handhabung von unterschiedlichen elektrischen Bauelementen ausgelegt werden.
- K2. Eine Ankontaktierung an die Leiterbahn muss prozesssicher gewährleistet werden können. Ein Lösen der Verbindungsstellen sowie eine Überbrückung der Komponenten gilt es zu vermeiden.
- K3. Der Übergangswiderstand von der Leiterbahn auf die Komponenten sollte so gering wie möglich sein.

### 2.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst der 3D-Druckprozess, die Eigenschaften der eingesetzten Ausgangswerkstoffe sowie die dadurch erzielbaren Werkstückeigenschaften analysiert und die sich daraus ergebenden Potenziale und Einschränkungen in einer industriellen Anwendung aufgezeigt. Dies schafft ein grundlegendes Verständnis über den 3D-Druckprozess und dient als Basis für die spätere Entwicklung der Konzepte und Prozesse. Ferner wurden anhand einer theoretischen Auslegung einer einfachen elektrischen Schaltung Anforderungen hinsichtlich des elektrischen Widerstands sowie der geometrischen Abmessungen der Leiterbahn definiert.

Zusammen mit der Prozessanalyse und den in Abschnitt 1.2 festgelegten Zielen wurden die für die Zielerreichung notwendigen Anforderungen an den erweiterten 3D-Druckprozess, an die *Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen* sowie an den Prozessschritt der *Integration von elektrischen Komponenten* formuliert. Diese dienen sowohl als Entscheidungsgrundlage für die zu entwickelnden Konzepte und Prozesse als auch als Grundlage zur Überprüfung der Zielerreichung.

# 3 Stand der Forschung und Technik

## 3.1 Vorgehen im Kapitel

Im vorliegenden Kapitel werden veröffentlichte Arbeiten zur *Integration von elektrischen Schaltungen* in additiv gefertigte Werkstücke dargestellt. Trotz der Fokussierung der Arbeit auf das Verfahren *3D-Drucken* werden Ansätze aus anderen kunststoffbasierten additiven Fertigungsverfahren berücksichtigt, um einen umfassenden Überblick zu geben. Die Gliederung in diesem Kapitel orientiert sich an den in Abschnitt 2.7 definierten Elementen einer elektrischen Schaltung. Beginnend mit dem derzeitigen Stand der Forschung und Technik hinsichtlich der *Integration von elektrischen Leiterbahnen* (vgl. Abschnitt 3.2) folgt eine Darstellung von Ansätzen zur *Integration von bestehenden Objekten* in additiv gefertigte Werkstücke (vgl. Abschnitt 3.3) sowie von Ansätzen, die eine Kombination aus beiden Themenfeldern bilden (vgl. Abschnitt 3.4). Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit findet eine zusätzliche Unterteilung entsprechend den eingesetzten additiven Fertigungsverfahren statt. Die Ansätze, die beide Themenschwerpunkte vereinen, werden abschließend anhand der in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen bewertet. Basierend auf dem Ergebnis wird der notwendige Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit aufgezeigt (vgl. Abschnitt 3.5).

## 3.2 Integration von elektrischen Leiterbahnen

Im Folgenden werden die Arbeiten zur *Integration von elektrischen Leiterbahnen* gemäß dem aktuellen Stand der Forschung und Technik präsentiert. Weitere Ansätze in Verbindung mit einer *Integration von elektrischen Komponenten* werden in Abschnitt 3.4 dargestellt.

### 3.2.1 Ansätze beim Fused Layer Modelling (FLM)

Die meisten Ansätze zur Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen sind bei dem FLM-Verfahren zu finden. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrensablaufs kann beispielsweise ZAEH (2006) und GEBHARDT (2013) entnommen werden. Die im Vergleich zu den erzeugten Leiterbahnen großen Abmessungen der Kunststofffilamente bewirken eine ungleichmäßige Bauteiloberfläche und stellen damit ein Hindernis für die Erzeugung von filigranen Leiterbahnen dar. Untersuchungen hinsichtlich der Qualität (Leitfähigkeit, Durchmesser, Länge etc.) der erzeugten elektrischen Leiterbahnen auf einem FLM-gedruckten Werkstück wurden von PEREZ & WILLIAMS (2013) durchgeführt. Sie ergaben, dass es bei einem Auftrag

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

des leitfähigen Materials auf der Bauteiloberfläche zu einem Füllen der Täler zwischen den Filamenten kommt. Eine zu geringe aufgetragene Materialmenge kann dabei zu Unterbrechungen der elektrischen Leiterbahn führen. Ein Ansatz zur Vermeidung dieses Effekts ist nach PEREZ & WILLIAMS das Füllen der Unebenheiten mit einem dielektrischen Material vor der Leiterbahnerzeugung.

Einen alternativen Ansatz zeigen VOGELER ET AL. (2013). Ziel war die Aufbringung einer Nano-Silbertinte (Cabot CSD-32®) auf einen Probekörper mithilfe des Aerosol-Jet®-Printing-Verfahrens (AJP-Verfahren). Den Schwierigkeiten aufgrund der erhöhten Oberflächenrauheit und den damit verbundenen Unterbrechungen der Leiterbahnen wurde durch eine Vorbehandlung der Oberflächen mit einem Schleifpapier begegnet. Die gedruckten Leiterbahnen wurden nach der Erzeugung bei 80 °C 1,5 h lang in einem Ofen gesintert. Höhere Temperaturen zur Beschleunigung des Trocknungsprozesses konnten aufgrund mangelnder Temperaturbeständigkeit des ABS-Grundmaterials nicht umgesetzt werden. Durch das Aufbringen von 15 nebeneinander liegenden Spuren wurde in den Versuchen eine Leiterbahn mit einem Widerstand von 11,24  $\Omega$  bei einer Messlänge von 10 mm erzeugt.

Wie die Ansätze verdeutlichen, erfordert die Verarbeitung von Lacken, Suspensionen und Tinten auf einem mithilfe des FLM-Verfahren hergestellten Probekörper zusätzliche Arbeitsschritte zur Verringerung der Oberflächenrauheit. Aus diesem Grund konzentrieren sich andere Forschungsinstitute auf die Verarbeitung von höherviskosen Materialien mit dem Nachteil einer Vergrößerung der Abmessungen der Leiterbahn. Den Verfahren gemeinsam ist, dass die Materialien unterhalb der aktuellen Schicht eingebracht werden müssen, um einen Kontakt zwischen der erzeugten Leiterbahn und dem Extruderkopf zu verhindern. Dazu können z. B. bereits in der Konstruktionsphase Kanäle vorgesehen werden, die später mit dem leitfähigen Material gefüllt werden. Die Verarbeitung der höherviskosen Materialien kann z. B. mithilfe eines Direct-Write-Verfahrens erfolgen. Dieser Begriff ist ein Sammelbegriff für unterschiedliche Systeme zur Herstellung von elektrischen Leiterbahnen unter Einsatz eines computergesteuerten Achsentischs, der mit einem Abgabesystem bestückt ist, z. B. einer Auftragsdüse oder einem Dispenser (LEWIS & GRATSON 2004). Bei Dispensern handelt es sich um manuelle, halb- oder vollautomatische Ausgabevorrichtungen, zum Beispiel für Flüssigkeiten.

Eine Kombination der Abgabesysteme mit additiven Fertigungsverfahren und damit die Möglichkeit zur Integration von elektrischen Komponenten wurde im Schutzrecht PALMER ET AL. (2008) patentiert. MOSES ET AL. (2009) verwendeten für die Erzeugung elektrischer Leiterbahnen ein modifiziertes System, basierend auf einem *FLM-Drucker (RepRap)*, bestehend aus einer beheizbaren Kupferdüse, einem beheizbaren Vorratsbehälter sowie einem Spritzensystem mit Pumpe, die

über einen Elektromotor betrieben wird. Durch die Bewegung des Kolbens in der Spritze wird ein Überdruck erzeugt, der durch ein Schlauchsystem auf den beheizten Vorratsbehälter geleitet wird. Das sich darin befindende geschmolzene Metall wird aufgrund des Drucks durch die Düse verdrängt und auf das Kunststoffbauteil abgegeben.

Die Haupthindernisse für eine industrielle Nutzung des Verfahrens liegen nach ESPALIN ET AL. (2014) in den zu hohen Widerstandswerten sowie in den, mit Blick auf den Bauraum, zu großen geometrischen Abmessungen der über Direct-Write-Verfahren erzeugten Leiterbahnen, wodurch die Eigenschaften der elektrischen Schaltungen stark von denen kommerzieller Leiterplatten abweichen. Daher gibt es Bestrebungen, anstatt viskoser leitfähiger Materialien Festkörper einzusetzen. LEIGH ET AL. (2012) präsentieren dazu einen Ansatz, bei dem einem Kunststoff (Polycaprolacton) 15 Massenprozent leitfähiger amorpher Kohlenstoff (Carbon Black) als Füllstoff zugegeben wurden. Die Schmelztemperatur des so erzeugten Mischmaterials *Carbomorph* liegt bei ca. 260 °C, wodurch das Material mithilfe des Extruders der FLM-Anlage mit einem Düsendurchmesser von 1,5 mm im Prozess sequenziell zu dem ABS-Material verarbeitet werden kann. Die mit diesem Material erzielte Leitfähigkeit in einem Strang lag bei  $0,09 \pm 0,01 \Omega\text{m}^{-1}$  und bei  $0,12 \pm 0,01 \Omega\text{m}^{-1}$  zwischen zwei Strängen (lagenübergreifend).

AGUILERA ET AL. (2013) untersuchten ebenfalls die Integration von leitfähigen Festkörpern in ein Kunststoffbauteil mit dem Ziel, einen funktionsfähigen Elektromotor herzustellen. Dabei nutzte das Team ein an der Universität in El Paso (Texas) entwickeltes und patentiertes Verfahren, mit dem Kupferdrähte in einen thermoplastischen Kunststoff eingebettet werden können. Mithilfe eines Ultraschallschweißprozesses bzw. einer Beaufschlagung des Drahtes mit Strom wird dieser nach dem Ablegen auf dem Kunststoffbauteil erwärmt, wodurch das Kunststoffmaterial schmilzt und Raum für den Draht freigibt. Die weiteren Komponenten für den Elektromotor (Permanentmagnete, elektrische Magnete, Kugellager, Kontrolleinheit) wurden während einer Unterbrechung des Aufbauprozesses manuell in die dafür vorgesehenen Vertiefungen eingelegt.

Neben den bisher erläuterten Ansätzen für die Erzeugung von zweidimensionalen Leiterbahnen gibt es auch Bestrebungen, diese schichtübergreifend zu generieren. Dazu werden bereits in der Konstruktionsphase Verbindungskanäle zwischen den unterschiedlichen Schichten des Bauteils (engl. *Vias*) vorgesehen, die während des Prozesses mit einem leitfähigen Material gefüllt werden. Ein Ansatz unter Verwendung eines leitfähigen Feststoffes wird in MIRELES ET AL. (2012) beschrieben.

Mit einem modifizierten Extruder der Firma *Stratasys Ltd.* besteht die Möglichkeit, leitfähige Feststoffe sowohl in einer Schicht wie auch schichtübergreifend zu verarbeiten. Durch den Einsatz von *Vias* sind dreidimensionale Strukturen jedoch lediglich senkrecht zur Bauplattform herstellbar. Einen Ansatz zur Erzeugung von freien dreidimensionalen Strukturen zeigen DIEGEL ET AL. (2011). Sie entwickelten dazu das *Curved-Layer-Fused-Deposition-Modelling-Verfahren* (CLFDM), eine Erweiterung des Standard-FLM-Verfahrens. Dieses ermöglicht, Materialstränge aus Kunststoff nicht nur lagenweise, sondern auch lagenübergreifend abzulegen. Dafür werden zunächst mit einem Extruder Stützelemente aufgebaut, auf denen mit einem weiteren Extruder das eigentliche Material dreidimensional abgelegt wird. DIEGEL ET AL. weisen darauf hin, dass in einem aktuellen Projekt ein dritter Extruder implementiert wird, mit dem die Abgabe von Polymeren, die mit Kohlenstoffnanoröhrchen oder anderen leitfähigen Materialien gefüllt sind, möglich wäre. Dies würde die Erzeugung von komplexen dreidimensionalen Leiterbahnen erlauben; Ergebnisse dazu wurden jedoch noch nicht veröffentlicht.

#### 3.2.2 Ansätze beim Selektiven Laser-Sintern (SLS-Verfahren)

Die dem aktuellen Stand der Forschung und Technik entsprechenden Konzepte für die Integration von elektrischen Leiterbahnen während des Selektiven Laser-Sinterns lassen sich grundsätzlich in zwei Ansätze unterteilen.

Wie beim FLM-Verfahren besteht auch beim SLS-Verfahren die Möglichkeit, Direct-Write-Technologien in die Anlage zu implementieren und damit elektrische Leiterbahnen zu erzeugen. FOLGAR ET AL. (2013) untersuchten zunächst die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Direct-Write-Verfahren mit dem SLS-Verfahren. Das leitfähige Material wurde unter anderem durch das Aerosol-Jet-Verfahren, ein Dispensersystem, sowie mithilfe eines MicroPen®-Systems der Firma *MicroPen Technologies Corporation* verarbeitet. Zur Analyse der Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit wurden in einem Versuch Leiterbahnen bei unterschiedlichen Pulverzuständen aufgebracht: auf loses Pulver, auf kurz zuvor versintertes Pulver sowie auf ein abgekühltes Werkstück. Der elektrische Widerstand wurde mit einem Vielfachmessgerät (Multimeter) gemessen. Eine Leitfähigkeit bei nicht versintertem Pulver konnte nicht ermittelt werden. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Abgabe des leitfähigen Materials mithilfe eines MicroPen®-Systems nach dem Sinterprozess einer Schicht erzielt. Das in die SLS-Anlage integrierte System zur Abgabe des leitfähigen Materials führte jedoch zu Temperaturschwankungen während des additiven Aufbauprozesses, wodurch im Bauteil gehäuft poröse Strukturen an tür-

nahen Bereichen entstanden. Sowohl zweidimensionale ( $0,2 \Omega$  elektrischer Widerstand) als auch dreidimensionale Leiterbahnen ( $0,3 \Omega$  bis  $6,4 \Omega$  elektrischer Widerstand) konnten erzeugt werden.

Ähnliche Untersuchungen zur Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit führten bereits TING ET AL. (2001) durch. Bei den Versuchen wurde eine leitfähige Suspension (Conductive Carbon Cement = CCC) mithilfe eines berührungslosen Dispensersystems auf einen Probekörper aufgebracht. Zusätzlich wurden die Einflüsse der Verfahrgeschwindigkeit des Abgabemoduls sowie des Mischungsverhältnisses (CCC/Lösungsmittel) auf den elektrischen Leitwert untersucht. Eine Verbesserung konnte vor allem durch die Erhöhung der abgegebenen Materialmenge erreicht werden. Dies ist durch die Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit, durch eine Erhöhung der Abgabegeschwindigkeit des Dispensersystems und durch die Verringerung der Porosität des Bauteils zur Unterbindung des Einsickerns der Suspension in das Pulverbett möglich. Eine Integration des externen Versuchsaufbaus in die SLS-Anlage zur Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen während des Aufbauprozesses wurde nicht vorgenommen.

HOU & TYRER (2013) legten den Fokus auf den Sinterprozess des leitfähigen Materials. Sie entwickelten zunächst ein eigenes Anlagensystem, das im weitesten Sinn dem Konzept einer kommerziellen SLS-Anlage entspricht. Ein Kunststoffpulver, in diesem Fall ein Polyethylen (Low Density Polyethylene = LDPE) mit einem mittleren Korndurchmesser von ca.  $12 \mu\text{m}$  bis  $22 \mu\text{m}$ , wird von einer Heizung vorgewärmt und anschließend mithilfe eines  $\text{CO}_2$ -Lasers ( $2,3 \text{ W}$  Leistung) gesintert. Der Unterschied zum bekannten SLS-Verfahren liegt in der Energieverteilung im Laserstrahlfokus. Diese entspricht keiner klassischen Gauß-Verteilung, sondern kann mithilfe holographischer optischer Elemente (Holographic Optical Elements = HOE) in der Optik nahezu beliebig geformt werden. Als leitfähiges Material zur Erstellung von elektrischen Leiterbahnen wurde eine Silberpaste mit einem Feststoffanteil von 58 % verwendet. Für erste Untersuchungen brachten HOU & TYRER mithilfe einer Schablone manuell ein Leiterbahnnetz auf ein additiv gefertigtes Bauteil auf und sinterten dieses anschließend mit dem  $\text{CO}_2$ -Laserstrahl. Die am besten geeignete Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls für den Sinterprozess der Leiterbahnen sowie die richtige Einstellung der Energieverteilung durch die HOE wurden zuvor experimentell ermittelt. Eine vollständige Integration der Leiterbahn in das Werkstück erfolgte durch die Erzeugung einer weiteren Kunststoffschicht (Deckschicht).

Der zweite grundlegende Ansatz verfolgt die Modifikation des Ausgangsmaterials mit leitfähigen Additiven.

So kombinierten z. B. ATHREYA ET AL. (2009) den Werkstoff Nylon 12 mit einem leitfähigen Füllstoff (Carbon Black) und verarbeiteten dieses Mischmaterial mithilfe einer SLS-Anlage. Die damit erzielten mechanischen Eigenschaften sind vergleichbar mit denen eines über das Verfahren Spritzgießen hergestellten Werkstücks. Die spezifische Widerstand der Probekörper betrug  $3,16 \cdot 10^6 \pm 1,51 \cdot 10^5 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ .

#### 3.2.3 Ansätze bei Jetting-Technologien

Es existiert eine Vielzahl an Ansätzen zur Erzeugung von Leiterbahnen unter Einsatz von Drucktechniken (z. B. Digitaldruck, Tintenstrahldruck) auf verschiedenen Oberflächen, in die das leitfähige Material nicht eindringen kann. Ein sequenzielles Bedrucken derselben Position mit unterschiedlichen Materialien ermöglicht die Erzeugung von Dünnschichtkomponenten (Leiterbahnen oder elektrische Komponenten), womit das Verfahren als eine Art 3D-Druckverfahren angesehen werden kann. Da dies nach VDI 3405 nicht als additives Fertigungsverfahren definiert ist, soll hier lediglich auf ein Beispiel näher eingegangen werden.

LIU ET AL. (2014) verwendete einen Fujifilm-Dimatrix-Drucker DMP-2831, der sowohl ein Isolationsmaterial (SunTronic EMD6415) als auch ein leitfähiges Material (SunTronic EMD5714) verarbeiten kann. Die isolierende Schicht wird direkt nach dem Druckprozess mithilfe einer UV-Lampe ausgehärtet. Die Silbertinte mit einem Massenanteil an Silber-Nanopartikeln von 40 % wurde nach dem Auftrag im Ofen bei 150 °C 30 Minuten lang gesintert. Untersucht wurde von LIU ET AL. der Einfluss des Tropfenabstandes auf den Leiterbahnwiderstand bzw. auf die Oberflächenrauheit der Isolationsschicht. So konnte erst ab einem Überlappanteil der Tropfen von 50 % eine durchgängige Leiterbahn erzeugt werden. Einen erheblichen Einfluss auf den elektrischen Widerstand zeigte die Oberflächenrauheit der isolierenden Schicht.

PEREZ & WILLIAMS (2014) verwendeten bei ihren Untersuchungen ein System, das auf der Poly-Jet-Technologie basiert. Sie erweiterten den Versuchsstand mit einem zusätzlichen x-y-Achsensystem sowie einem daran montierten druckluftbetriebenen Spritzendispenser. Zur Erzeugung elektrischer Leiterbahnen wurde als leitfähiges Material die Silbertinte *DuPont 5021* verwendet. Unter Variation der Hauptparameter des Spritzendispensers (Nadelgröße, Höhe des Überdrucks, Bewegungsgeschwindigkeit des Systems (BENBOW ET AL. 1987)) sowie des Grundmaterials wurden deren Auswirkungen auf die geometrischen Abmessungen der erzeugten Leiterbahnen sowie auf die Haftfestigkeit des Materials auf den Substraten analysiert. Aufgrund der geringen Glasübergangstemperatur des Grund-



### 3.2 Integration von elektrischen Leiterbahnen

---

materials wurden zudem unterschiedliche Sintermethoden und deren Einfluss auf die Abmessungen der leitenden Strukturen untersucht. Leiterbahnen mit einer minimalen Breite von 720  $\mu\text{m}$  bei einer Standardabweichung von 69  $\mu\text{m}$  und einer Höhe von ca. 36  $\mu\text{m}$  konnten erzeugt werden.

Wird der Druckkopf nicht zur Abgabe des Grundmaterials, sondern zum Auftragen einer Flüssigkeit auf ein Pulverbett für dessen Verfestigung eingesetzt, so entspricht dies dem Verfahren *3D-Drucken* nach VDI 3405 (2014). Dabei gibt es ebenfalls Ansätze, elektrische Leiterbahnen in die Bauteile zu integrieren.

So untersuchten ZAEH ET AL. (2010) die Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen unter Einsatz unterschiedlicher Suspensionen, die mithilfe eines Multimaterialmoduls auf die Oberfläche eines Probekörpers aufgetragen wurden. Als Versuchsanlage diente ein pulverbasierter 3D-Drucker der Firma *voxeljet AG*. Neben herkömmlichen Silbersuspensionen mit einem Anteil an leitfähigem Material zwischen 30 % und 50 % wurde auch ein Materialgemisch, bestehend aus Graphitpartikeln und Ethanol, eingesetzt. Zur Vermeidung einer Sedimentation der Pulverpartikel wurde die Mischung mithilfe eines Propellersmischers kontinuierlich in Bewegung gehalten. Die mit diesen Materialien erzeugten elektrischen Leiterbahnen hatten eine Breite von  $1 \pm 0,05$  mm, eine Höhe von 0,15 mm und einen spezifischen Widerstand von  $\rho = 21,1 \pm 0,44 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  unter Verwendung der Silbersuspension und  $\rho = 24,7 \pm 0,05 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  unter Einsatz der Graphitmischung.

Ein weiterer Ansatz zur Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen wird von POLSAKIEWICZ & KOLLENBERG (2014) präsentiert. Als Material für das Pulverbett wurde ein Alkalisilicat-Pulver mit spratziger Pulverkornform und einem Korngrößendurchmesser mit  $d_{90} = 10,8 \mu\text{m}$  verwendet. Der Binder ist eine Mischung aus einem Polymerbinder und Additiven. Das Additiv wurde eingesetzt, um die Viskosität (6 mPas) und die Oberflächenspannung der Flüssigkeit an den Prozess anzupassen. Das leitfähige Material bestand aus einer Silberpaste, die mit Polymerbinder und Terpeneol gemischt war. Die Mischung besaß einen Massenanteil an Silberpartikeln von 40 % und hatte eine dynamische Viskosität von 42 mPas. Für die Verarbeitung des Materials mit einem Druckkopf musste dieser auf 40 °C aufgeheizt werden, um die Viskosität der Tinte zu senken. Die Bauteile wurden nach dem additiven Aufbauprozess 12 Stunden lang bei 70 °C gelagert. Anschließend wurde das überschüssige Pulver entfernt und das Bauteil bei 810 °C 10 Minuten lang in einem Ofen gesintert. Der letzte Schritt konnte auch zur Sinterung der Silbertinte genutzt werden. Zweidimensionale Leiterbahnen in einer Schicht konnten durch dieses Verfahren erzeugt werden. Der elektrische Widerstand der gesamten Leiterbahn betrug 3,8  $\Omega$ , was für die Erzeugung von Leiterbahnen auf einem Pul-

verbett als gut zu bewerten ist. Der Versuch einer Erzeugung von vertikalen Leiterbahnen durch ein definiertes Einsickern des leitfähigen Materials in die poröse Struktur des Pulverbetts war nicht erfolgreich. Eine Analyse der Testkörper ergab, dass die Infiltration nicht ausreichend war, um eine schichtübergreifende Leitfähigkeit zu erzielen. Eine Ursache hierfür liegt laut den Autoren im eingesetzten Pulvermaterial, das aufgrund seiner Korngrößenverteilung ein Einsickern der Tinte in das Pulverbett erschwerte.

### 3.3 Integration von elektrischen Komponenten

Im Folgenden werden die Arbeiten zur *Integration von elektrischen Komponenten* gemäß dem aktuellen Stand der Forschung und Technik erläutert. Weitere Ansätze in Kombination mit der *Integration von elektrischen Leiterbahnen* werden gesondert in Abschnitt 3.4 genannt.

#### 3.3.1 Ansätze beim Selektiven Laser-Sintern

RAI ET AL. (2004) untersuchten die Integration von Sensoren und unterscheiden dabei zwei Ansätze: ein Einsetzen von Sensoren in nur einer Schicht und ein Einsetzen über mehreren Schichten des Bauteils. Bei erstgenanntem Ansatz wird der Sensor auf die Pulverbettoberfläche gelegt und anschließend die Schicht mit dem Laserstrahl bearbeitet. Die elektrische Komponente wird bei dem Belichtungsmuster nicht berücksichtigt und daher durch den Laserstrahl beeinflusst. Es können deshalb nur Sensoren verarbeitet werden, die einer Beeinflussung durch den Laserstrahl standhalten. Durch das Aufschmelzen der Kunststoffschicht wird die elektrische Komponente in der Schicht fixiert. Der Aufbauprozess kann anschließend fortgeführt werden. Bei der Integration von Sensoren über mehrere Schichten ist ein zweistufiges Vorgehen anzuwenden. Nach dem Verfestigungsprozess wird das lose Pulvermaterial zunächst mit einem Unterdrucksystem aus den ausgesparten Bereichen entfernt und anschließend in diese die Komponente eingelegt. Bei beiden Ansätzen konnte die Umsetzbarkeit anhand von Probekörpern nachgewiesen werden. Jedoch verursachte die Unterbrechung des Aufbauprozesses und das zum Einlegen der elektrischen Komponenten notwendige Öffnen der Prozesskammer Temperaturschwankungen, die eine erhöhte Schwindung des Bauteils und eine geschwächte Anbindung der nächsten Schichten zur Folge hatten. Durch den Prozessschritt der Pulverentfernung kam es bisweilen durch den manuellen Eingriff außerdem zu einer Verschiebung des Bauteils und somit zu einem Prozessabbruch. Zur Vermeidung der Fehler bedarf es nach RAI ET AL. einer Automatisierung des Handhabungs- und Positionierungssystems.

#### 3.3.2 Ansätze bei Jetting-Technologien

Das Ziel von KOBLSKA ET AL. (2005) war die Integration von Dünnschichtsensoren in ein gegossenes Metallbauteil. Die Gussformen wurden zweiteilig ausgelegt und mithilfe des Verfahrens *3D-Drucken* hergestellt. Nach der Verfestigung der Formen wurde der Sensor eingelegt und anschließend wurden die Formhälften durch Kleben verbunden. Einige Sensoren waren nach dem Gieß- und Abkühlprozess nicht mehr funktionsfähig. Die Ursache für den Ausfall konnte nicht vollständig geklärt werden; die Autoren vermuten, dass die durch den Abkühlprozess induzierten Druckspannungen zu einem Versagen führten. Weiterhin zweifeln die Autoren an der Richtigkeit der von den Sensoren gelieferten Messergebnisse.

Einen Ansatz zur Integration von elektrischen Komponenten beim Verfahren Multi-Jet-Modelling erforschten STILTNER ET AL. (2011). Der Fokus der Arbeit lag auf der Integration von Fasern zur Erzeugung von Gelenken und bewegten Elementen. Dabei wiesen die Autoren darauf hin, dass mit dieser Methode ebenso Sensoren und leitfähige Strukturen integriert werden können. Der Bauprozess wird dafür temporär unterbrochen und die Faser oder die Komponente manuell in die dafür vorgesehene Kavität eingelegt. Anschließend wird der Bauprozess fortgeführt.

MACCURDY & LIPSON (2014) verwendeten bei ihren Versuchen für die Erzeugung von elektrischen Schaltungen individuelle Bauelemente mit einem standardisierten Grundkörper. Die quadratischen Grundelemente werden industriell gefertigt und besitzen eine Kantenlänge von 3 mm und eine Höhe von 1 mm (vgl. Abbildung 3-1).

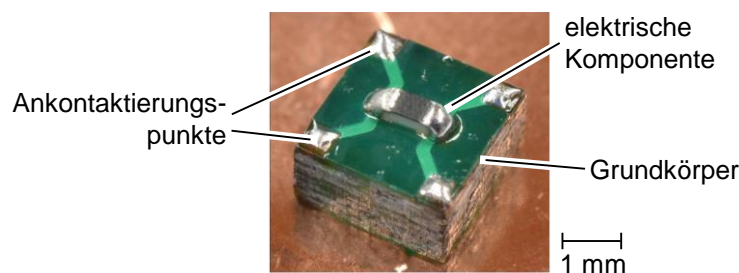


Abbildung 3-1: Standardisiertes Bauelement mit elektrischem Widerstand (SMD-Widerstand 0402) (MACCURDY & LIPSON 2014)

Verschiedenste elektrische Komponenten können aktuell auf diesem Grundkörper verbaut werden, solange diese die maximalen Abmessungen nicht überschreiten und zwei Ankontaktierungspunkte besitzen. Die Anbringung komplexerer

Komponenten, wie z. B. Mikrocontroller oder Transistoren, ist angedacht. Durch Ankontaktierungspunkte an den Ecken, die mit vertikalen Leiterbahnen verbunden sind, können durch das Aufeinandersetzen der Elemente schichtübergreifende Verbindungen erzeugt werden. Die Bausteine können automatisiert über einen Handhabungsmechanismus in die dafür vorgesehenen Kavitäten in einem additiv gefertigten Werkstück platziert werden. Die Herstellung der Verbindungsstellen kann über Lötzinn oder Leitklebstoff erfolgen. Erste Untersuchungen wurden mit der additiven Fertigungsanlage Objekt Connex 500 der Firma *Stratasys Ltd.* durchgeführt. Als Demonstrator wurde eine LED-Taschenlampe erzeugt.

## 3.4 Kombinierte Ansätze

Im Folgenden werden Ansätze gemäß dem aktuellen Stand der Forschung und Technik präsentiert, die sowohl die *Integration von elektrischen Leiterbahnen* als auch die *Integration von elektrischen Komponenten* beinhalten.

### 3.4.1 Ansätze beim Fused Layer Modelling

Erste Untersuchungen hinsichtlich der Erzeugung von elektrischen Schaltungen während eines FLM-Prozesses wurden bereits im Jahr 1999 durch CALVERT ET AL. (1999) veröffentlicht. Dabei wurde zur Verarbeitung einer leitfähigen Silberharztinte (Minico M4100, *Emerson & Curming Inc.*) ein zweiter Extruderkopf eingesetzt, der das sequenzielle Ablegen von zwei Materialien ermöglicht. Die Leiterbahnen wurden anschließend mithilfe einer thermischen Nachbehandlung im Ofen ausgehärtet. Aussagen über die elektrische Leitfähigkeit wurden nicht getroffen. Weiterhin untersuchten CALVERT ET AL. die Möglichkeit, Glasfasern sowie Sensoren in ein Werkstück zu integrieren. Dafür wurde der Ablegeprozess unterbrochen und die entsprechenden Elemente wurden manuell eingelegt.

Einen alternativen Ansatz zur Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen verfolgten SELLS & BOWYER (2006). Neben der Erstellung von Kanälen wurden mithilfe des FLM-Prozesses aus dem Grundmaterial Verschaltungen erzeugt, die im Anschluss mit leitfähigem Material gefüllt wurden. Die Hilfsstrukturen wurden nach der Aushärtung des leitfähigen Materials manuell entfernt und bildeten eine Verbindungsstelle z. B. für Batterien. Elektrische Komponenten wurden in dafür vorgesehene Kavitäten so eingelegt, dass die Kontaktstellen von oben zugänglich waren und mit den elektrischen Leiterbahnen verbunden werden konnten.

PERIARD ET AL. (2007) kombinierten den FLM-Prozess mit einem Direct-Write-Verfahren zur Verarbeitung eines mit Silberpartikeln gefüllten Silikonwerkstoffs.

Das Material wurde mithilfe eines Dispensers, bestehend aus einer Spritze als Vorratsbehälter, einem Schrittmotor zum Ausdrücken der Spritze und einer Dosiernadel, verarbeitet. Durch die Erzeugung von Kanälen und *Vias* und deren Füllung mit dem leitfähigen Material konnten sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Leiterbahnen erzeugt werden. Die Strukturen hatten eine durchschnittliche Höhe von 1,2 mm, eine Breite von 0,8 mm und einen spezifischen elektrischen Widerstand von 0,192  $\Omega$ /m. Durch die Berücksichtigung von Vertiefungen bei der Bauteilerzeugung konnten elektrische Komponenten während des Herstellungsprozesses eingelegt werden. PERIARDE ET AL. beschreiben Schwierigkeiten bei der Verarbeitung des leitenden Materials. Eine schnelle Aushärtung mit der damit verbundenen Schwindung erschwerte eine zuverlässige Ankontaktierung.

Die Methode zur Erzeugung von dreidimensionalen elektrischen Schaltungen in einem 3D-gedruckten Grundkörper mithilfe extrusionsbasierter Verfahren wurde 2013 von der Universität Texas in El Paso patentiert (WICKER ET AL. 2013). Das Patent beschreibt, wie bereits bei der Konstruktion Vertiefungen im Bauteil festgelegt werden können, die während des Herstellungsprozesses sowohl mit elektrischen Komponenten als auch mit leitfähigem Material gefüllt werden können. Die Berücksichtigung von *Vias* zwischen den Lagen und deren Füllen mit leitfähigem Material ermöglicht die Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen. Einen dieses Patent erweiternden Ansatz zur Erzeugung elektrischer Schaltungen auf einem FLM-Körper mithilfe eines Direct-Write-Verfahrens erläuterten ESPALIN ET AL. (2014). Das Hauptziel ihrer Arbeit war die Verbesserung der Maßgenauigkeit der Leiterbahnen durch die Kombination des additiven Fertigungsverfahrens mit einem subtraktiven Verfahren, in diesem Fall einem Mikro-Fräsprozess bzw. einem Laser-Ablationsverfahren. Anders als bei den bisherigen Ansätzen werden keine Kanäle in der CAD-Datei vorgesehen, sondern sie werden durch eine Fräsbearbeitung erzeugt und im Anschluss mit leitfähigem Material gefüllt. Die Abweichung der Ist- von der Soll-Geometrie der Kanäle war dadurch geringer als bei direkt im Modell freigelassenen Kanalstrukturen. Außerdem erweiterten ESPALIN ET AL. den Prozess um eine zusätzliche Bestückungseinheit für eine automatische Handhabung von elektrischen Komponenten. Das als multi<sup>3d</sup> bezeichnete Verfahren ermöglicht somit die Implementierung von elektrischen Komponenten sowie die Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen.

#### 3.4.2 Ansätze beim SL-Verfahren

Die Verarbeitung von verschiedenen Materialien, im Speziellen von leitfähigen Materialien während des SL-Prozesses, wurde von PALMER ET AL. (2005) dargestellt. Nach der Erzeugung eines Grundkörpers wurde der Behälter der SL-

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

Anlage mit dem flüssigen Harz abgesenkt, das Bauteil damit freigelegt und im Anschluss manuell gereinigt. Die Erzeugung der elektrischen Leiterbahnen erfolgte in einem zusätzlichen Prozessschritt mithilfe eines Direct-Write-Verfahrens (Druckluftdispenser). Nach einer Digitalisierung der Bauteiloberfläche wurde mit einem Mehrachsroboter und einer daran befestigten Düse das elektrisch leitfähige Material, eine mit Silberpartikeln gefüllte Suspension, auf den Grundkörper aufgebracht. Die erzeugten Strukturen wurden nach dem Auftrag bei 120 °C thermisch nachbehandelt. Basierend auf den Arbeiten von PALMER ET AL. betrieben MEDINA ET AL. (2005) eine Weiterentwicklung dieses Versuchsstandes. Dadurch konnten erstmals dreidimensionale Leiterbahnen hergestellt werden. Die Herstellung von horizontalen Leiterbahnen erfolgte durch die Abgabe von leitfähigem Material in einer Schicht mit einem anschließenden Sinterprozess, der mithilfe des bereits integrierten Lasers durchgeführt wurde. Zur Erzeugung von vertikalen Leiterbahnen wurde das nicht verfestigte Harz aus den *Vias* entfernt und diese wurden schrittweise mit leitfähigem Material gefüllt. Zwischen diesen Schritten wird das Material jeweils mit dem Laser versintert. Komplexe Werkstücke mit integrierten elektrischen Schaltungen wurden von LOPES ET AL. (2006) erzeugt. Eine Fortführung der Arbeiten erfolgte durch NAVARRETE ET AL. (2007), die einen elektrischen Bewegungssensor herstellten. Zur Erhöhung der geometrischen Genauigkeit der elektrischen Leiterbahnen wurden Kanäle in dem SL-Bauteil erzeugt, die im Anschluss mit einem Leitklebstoff gefüllt wurden. Dadurch sind die Abmessungen der Leiterbahnen nicht mehr ausschließlich von den Möglichkeiten des Dispensersystems, sondern auch von den Eigenschaften und Merkmalen des Verfestigungsprozesses (Laserstrahldurchmesser und Polymerisationsverhalten (LOPES ET AL. 2012)) abhängig. Nach der Befestigung der notwendigen elektrischen Komponenten sowie deren Verbindung mit der elektrischen Leiterbahn wurde der so erzeugte Bewegungssensor in eine dafür vorgesehene Kavität im eigentlichen Werkstück eingelegt. Die Funktionsfähigkeit des Sensors wurde in einem Versuch nachgewiesen.

Die Positionierung der elektrischen Komponenten beschränkte sich bei den bis hier gezeigten Ansätzen auf horizontale Ebenen orthogonal zur Aufbaurichtung. DENAVE ET AL. (2008) entwickelten einen Prozess, der diese räumliche Einschränkung aufhebt und die Implementierung elektrischer Komponenten parallel zur Aufbaurichtung ermöglicht. Die Komponenten wurden dazu in Vertiefungen an horizontalen und vertikalen Flächen eingelegt und durch eine Ankontaktierung befestigt. Zur Erzeugung von Leiterbahnen auf den unterschiedlich orientierten Flächen musste das Abgabewerkzeug in einem 45°-Winkel zur Vertikalen in der Anlage angebracht werden. Zur Vermeidung von Überkreuzungen der Leiterbahnen

und zur Minimierung des Aufwandes durch die Generierung von vertikalen Leiterbahnen im Bauteil sahen DENAVE ET AL. Kanäle in Bogenform vor, die in einem zusätzlichen Prozessschritt mit Leitklebstoff gefüllt wurden. Ein Nachteil bei dieser Methode ist der notwendige Ofenprozess zum Versintern der Leiterbahn. Der übliche Lasersinterprozess konnte aufgrund einer unzureichenden Zugänglichkeit zum Leitklebstoff im Bogen nicht angewendet werden. Eine Weiterentwicklung der Anlagentechnik erfolgte durch CASTILLO ET AL. (2009). Die Leiterbahnen konnten jetzt nicht nur auf ebenen, sondern auch auf konvexen und konkaven Freiformflächen aufgebracht werden.

Den für die Integration von elektrischen Schaltungen notwendige Gesamtprozess veranschaulichten LOPES ET AL. (2012) (vgl. Abbildung 3-2). Der SL-Prozess wird unterbrochen und der Vorratsbehälter mit dem flüssigen Harz abgesenkt, um so das Bauteil freizulegen. Anschließend werden mit einem speziell auf das Harz abgestimmten Reinigungsmittel das Bauteil und die Vertiefungen gereinigt und im Anschluss die Rückstände mithilfe eines Unterdrucksystems entfernt. Alternativ kann auf den Reiniger verzichtet und das Harz direkt abgesaugt werden. Harzrückstände werden im Anschluss mithilfe des Laserstrahls verfestigt, wodurch jedoch Ungenauigkeiten in den geometrischen Abmessungen der Vertiefungen entstehen. In die freigelegten Bereiche werden die elektrischen Komponenten eingelegt und unter Einsatz eines Dispensers mit den zuvor erstellten elektrischen Leiterbahnen verbunden. Zur Vermeidung einer Wechselwirkung des leitfähigen Materials mit dem Harz sollte der Sinterprozess der elektrischen Leiterbahn direkt nach der Materialabgabe erfolgen. Die dafür notwendige Energie wird durch den UV-Laser der SL-Anlage bereitgestellt.

In einer weiterführenden Arbeit von LOPES ET AL. (2014) wurden unterschiedliche Sintermethoden hinsichtlich ihres Einflusses auf die elektrische Leitfähigkeit von verschiedenen Materialien untersucht. Dabei wurden bei den Lasersintermethoden neben unterschiedlichen Wellenlängen auch verschiedene Parameter sowie Belichtungsmuster betrachtet.

Einen alternativen Ansatz zur Erhöhung der Komplexität der dreidimensionalen elektrischen Leiterbahnen präsentieren MACDONALD ET AL. (2014). Das Werkstück wurde dazu in mehrere ineinandergreifende Elemente aufgeteilt und bei jeder Einzelkomponente eine elektrische Schaltung auf der Bauteiloberfläche erzeugt. Durch das Fügen der einzelnen Komponenten kam es zu einer Ankontaktierung der Leiterbahnen und somit zu einer geschlossenen dreidimensionalen Schaltung.

### 3 Stand der Forschung und Technik

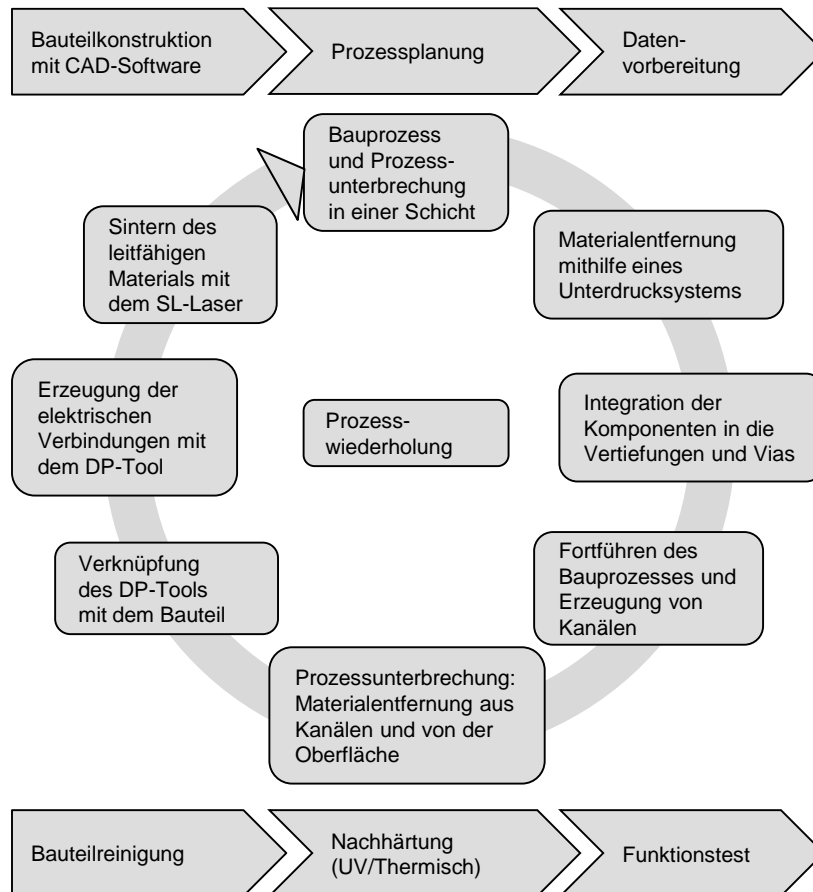


Abbildung 3-2: Vorgehensweise zur Erstellung von elektrischen Schaltungen während des SL-Prozesses in Anlehnung an LOPES ET AL. (2012); DP = Dispenser; UV = Ultraviolett

NIESE ET AL. (2014) verfolgten einen ähnlichen Ansatz wie die Gruppe der Universität El Paso und erweiterten das additive Fertigungsverfahren um Techniken aus der Leiterplattenerzeugung. Die als eSLA (embedding Stereolithography) bezeichnete Technologie soll die Herstellung von elektrischen Schaltungen innerhalb 3D-gedruckter Werkstücke sowie auf deren Werkstückoberfläche während des additiven Aufbauprozesses ermöglichen. Das Vorgehen entspricht der in Abbildung 3-2 dargestellten Methode, wird aber durch ein verbessertes Reinigungskonzept für die Vertiefungen erweitert. Dabei werden die Rückstände nach dem Entfernen des Harzes mit einem Vakuumsystem nicht verfestigt, sondern gezielt mithilfe eines Laserabtragverfahrens entfernt. Die Untersuchungen beschäftigten sich mit der Erzeugung von zweidimensionalen Leiterbahnen und deren geometrischen Abmessungen in Abhängigkeit von verschiedenen Prozessparametern sowie mit dem Zusammenhang der elektrischen Leitfähigkeit mit den Parametern des Sinterprozesses.



Eine weiterer Methode für die Erzeugung von elektrischen Schaltungen während eines SL-Prozesses entwickelten ANSORGE ET AL. (2010). Während des Herstellungsprozesses wurden lediglich die elektrischen Komponenten in dafür vorgesehene, vom Harz befreite Vertiefungen eingelegt. Nach der Beendigung des additiven Aufbauprozesses wurde mithilfe eines Überdrucks das Harz aus den Kanälen ausgeblasen und die Hohlräume wurden anschließend mithilfe einer Spritze mit Leitklebstoff gefüllt. Die während des Prozesses eingelegten Komponenten wurden durch eine passende Kanalführung automatisch ankontaktiert.

### 3.4.3 Ansätze beim Selektiven Laser-Sintern

AMEND ET AL. (2010) untersuchten die Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen auf 3D-gedruckten Werkstücken unter Einsatz des ADDIMID-Verfahrens (ROTH ET AL. 2004). Dieses Verfahren ist eine Erweiterung der MID-Technik (Molded Interconnect Device, MID) durch eine additive Metallisierung des Bauteils und ermöglicht die Herstellung von Werkstücken mit Schaltungsträgern. Dem Pulverwerkstoff (Polyamid) werden feine Metallpartikel (z. B. Kupfer, Nickel oder Aluminium) in spratziger Form und mit einem gemittelten Korndurchmesser von  $1,2\ \mu\text{m}$  beigemischt. Die Metallpartikel absorbieren die elektromagnetischen Wellen des Laserstrahls und heizen sich bei einer längeren Exposition über die Verdampfungstemperatur des Kunststoffes auf. Dieser wird dadurch lokal entfernt und bietet eine für den nachfolgenden Metallisierungsschritt (z. B. chemische Metallabscheidung) notwendige aktivierte Oberfläche. Die Ergebnisse zeigen, dass auch hier die Oberflächenrauheit eine entscheidende Rolle für die Qualität der elektrischen Leiterbahn spielt. Zur selektiven Metallisierung und somit zur Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen mussten die Werkstücke in einem zusätzlichen Arbeitsschritt infiltriert werden, um die Oberfläche anschließend laserstrukturieren zu können. In einer weiterführenden Arbeit von AMEND ET AL. (2013) wurde der Prozess um die Möglichkeit der Integration von elektrischen Komponenten erweitert. Eine Anbindung an die Leiterbahnen erfolgte mithilfe des Verfahrens *Laserstrahl-löten*. Der spezifische elektrische Widerstand der Leiterbahnen betrug im Mittel ca.  $0,096\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

### 3.4.4 Ansätze bei Jetting-Technologien

Einen kombinierten Ansatz präsentieren REFLE ET AL. (2017) im Rahmen des Forschungsprojektes NextFactory. Ziel des Projektes ist die Kombination unterschiedlicher Technologien zu einem neuartigen Produktionsprozess, mit dem Prototypen oder Kleinserien mikromechatronischer Produkte hergestellt werden können. Erste

Prototypen wurden mithilfe eines Photopolymer-Jetting-Verfahrens hergestellt. Für die Erzeugung der Leiterbahnen wurde eine elektrisch leitfähige Tinte mithilfe eines Druckkopfes verarbeitet. Die elektrischen Komponenten wurden in dafür vorgesehene Kavitäten eingebracht und mit Leitklebstoff unter Einsatz eines Dispensverfahrens an die Leiterbahnen ankontaktiert. Mithilfe eines Ofenprozesses wurde eine Wärmebehandlung zur Versinterung der Leittinte durchgeführt. Der elektrische Widerstand betrug nach einer Wärmebehandlung über 120 Minuten bei 180 °C bei den Leiterbahnen mit einer Breite von einem Millimeter und einer Messlänge von 11 mm ca. 0,35 Ω. Eine elektrische Verbindung zwischen den Leiterbahnen und den integrierten elektrischen Komponenten konnte nachgewiesen werden.

#### 3.4.5 Ansätze beim Laser-Direct-Writing-Verfahren

Das Laser-Direct-Writing-Verfahren (LDW) ist die punktuelle Abgabe von Materialien durch die Bearbeitung eines Trägers (Ribbon) mithilfe eines Laserstrahls (PIQUÉ ET AL. 1999). Der Träger, ein transparentes Grundmaterial, ist mit dem zu verarbeitenden Material beschichtet. Der Laserstrahl transmittiert durch den Träger und wird von dem Material absorbiert. Die durch das schlagartige Verdampfen des Materials erzeugte Dampfblase führt dazu, dass sich ein Bereich (Voxel) der Beschichtung vom Träger löst und auf das zu bedruckende Substrat abgegeben wird. Form und Höhe des abgegebenen Voxels können laut WANG ET AL. (2010) je nach Anwendungsfall variiert werden. Ein besonderes Charakteristikum des LDW-Verfahrens ist die hohe Flexibilität des eingesetzten Laserstrahls. Dieser kann sowohl für die punktuelle Abgabe unterschiedlicher Materialien (leitfähig, isolierend etc.) als auch zum Abtragen von Material auf der Substratoberfläche, zur Strukturierung der Oberfläche sowie für verschiedene thermische Nachbearbeitungsprozesse (z. B. Sintern) eingesetzt werden. So können z. B. durch ein Laserabtragverfahren *Vias* erzeugt werden, die nach dem Füllen mit leitfähigem Material vertikale Leiterbahnen darstellen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, elektrische Komponenten auf der Substratoberfläche abzulegen (MATHEWS ET AL. 2007, PIQUÉ 2011). Dafür wird zunächst mithilfe des Laserstrahls Material an der Substratoberfläche abgetragen und eine Vertiefung geschaffen. Anschließend wird die elektrische Komponente darin abgelegt. Die Komponenten sind dabei an den Ankontaktierungsstellen mit dem Träger verbunden. Der Laserstrahl schmilzt die Verbindungselemente, wodurch sich die Komponente vom Träger löst und in die Vertiefung fällt. Die Abgabe unterschiedlicher Materialien in einer definierten Reihenfolge und deren thermische Nachbehandlung ermöglichen die Erzeugung von Sensoren (PIQUÉ ET AL. 2000).

### 3.5 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

#### 3.5.1 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden unterschiedliche Ansätze gemäß dem aktuellen Stand der Forschung und Technik dargestellt, um elektrische Leiterbahnen bzw. elektrische Komponenten in additiv gefertigte Bauteile zu integrieren.

Dabei konnten bereits mannigfaltige Lösungsansätze für die Teilbereiche *Leiterbahnerzeugung* und *Integration von elektrischen Komponenten* sowie deren *Ankontaktierung* identifiziert werden. Dies ist neben dem zunehmenden Interesse unterschiedlicher Forschungseinrichtungen und Unternehmen an dieser Technologie auch der fortschreitenden Entwicklung der leitfähigen Werkstoffe zu verdanken. Es zeigt sich eine kontinuierliche Entwicklung hin zu Flüssigkeiten mit einem hohen Massenanteil an leitfähigen Partikeln bei gleichzeitig geringer Viskosität und hin zu partikkellosen Tinten. Alle diesen Tinten sind für Jetting-Technologien geeignet. Auch die Dispenser-Technologien zur Verarbeitung von höherviskosen Fluiden erleben wegen ihrer Einsatzmöglichkeiten bei additiven Fertigungstechnologien eine Renaissance.

Abhängig von den betrachteten additiven Fertigungsverfahren sind die Aktivitäten im Bereich der *Integration von elektrischen Schaltungen* unterschiedlich weit fortgeschritten. Grundsätzlich gilt, dass sich die Ansätze trotz der teils guten Ergebnisse größtenteils noch in der Prototypenphase befinden. Eine industrielle Umsetzung für eine Serienfertigung fand noch nicht statt; dennoch bringen einzelne Unternehmen bereits erste Anlagen für eine Einzelfertigung bis hin zur Kleinserienfertigung für Werkstücke mit integrierten Schaltungen auf den Markt (*Voxel8*, *NanoDimension* etc.). Der von den Unternehmen fokussierte Anwenderkreis sind die Hobbyisten, die ohne großen Aufwand Platinen und Werkstücke für Prototypen fertigen möchten.

Ein Grund für die bis dato fehlende Einsatzmöglichkeit der Technologien in der industriellen Serienanwendung liegt darin, dass bei allen gezeigten Ansätzen Nachteile hinsichtlich der Herstellungskosten, der Abmessungen und der Leitwerte der elektrischen Schaltungen im Vergleich zu konventionell hergestellten Platinen hingenommen werden müssen. Verantwortlich dafür sind die hohen Materialkosten, die aufwändigen Zwischenschritte sowie die schwierigen Bedingungen für die Erstellung und für die thermische Nachbehandlung der elektrischen Schaltungen.

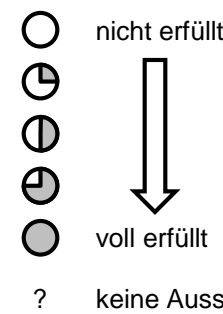
### 3.5.2 Abgeleiteter Handlungsbedarf

Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung eines Prozesses zur *Integration von elektrischen Schaltungen* in ein mithilfe des Verfahrens *3D-Drucken* additiv gefertigtes Werkstück. Dieser neue Prozess kombiniert die Vorteile der additiven Fertigungstechnologien (siehe Abschnitt 2.6.1) mit den in Abschnitt 1.2 beschriebenen Vorteilen der in einem Werkstück integrierten elektrischen Schaltungen.

Zur präzisen Definition des Handlungsbedarfs werden im Folgenden die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik und Forschung zusammengefasst und die Ansätze, die bereits die Erzeugung von Leiterbahnen und die Integration von elektrischen Komponenten beinhalten, anhand der in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen bewertet (siehe Tabelle 3-1). Die Ansätze, die lediglich einen der beiden Bausteine der Zielstellung betrachten, werden aufgrund des fehlenden zweiten Bausteins in Tabelle 3-1 nicht berücksichtigt.

Die vielversprechendsten Ansätze, die viele der definierten Anforderungen bereits erfüllen, konnten bei den Verfahren *Fused Layer Modelling* und *Stereolithografie* identifiziert werden. Zu diesen Verfahren existieren die meisten Erfahrungen und Ergebnisse, wodurch bereits funktionale dreidimensionale Schaltungen in einem Bauteil prozesssicher und wiederholbar erzeugt werden können. Eine direkte Übertragung der Methoden auf das Verfahren *3D-Drucken* ist bei keinem der Ansätze möglich. Der Hauptgrund hierfür sind die unterschiedlichen Oberflächen, auf denen die elektrischen Schaltungen erzeugt werden sollen. Bei den genannten geeigneten Verfahren sind die Oberflächen für die eingesetzten Flüssigkeiten nicht durchlässig, was ihre Ablage erleichtert. Die Funktionsintegration während des laufenden Aufbauprozesses auf einer porösen Pulverbettoberfläche ist ein noch wenig untersuchter Ansatz. Erste Versuche dazu gibt es bei dem Verfahren *Laserstrahlsintern*. Aufgrund des für die komplexen Erweiterungen in der Versuchsanlage notwendigen hohen Umsetzungsaufwands wurden die meisten Versuche zur Erzeugung von Leiterbahnen an separaten Versuchsständen mit bereits vorgefertigten Prüfkörpern durchgeführt. Eine Ausführung der Prozessschritte in der Versuchsanlage bedingt aktuell noch einen manuellen Eingriff, wodurch es zu einem Versatz des Bauteils sowie zu einer thermischen Beeinflussung des Verfestigungsprozesses kommen kann. Zusätzliche Herausforderungen ergeben sich durch die im Vergleich zu FLM- und SL-Verfahren porösen Oberflächen. Zusätzliche Prozessschritte zur Verdichtung der Oberfläche, z. B. mit der Laserstrahlquelle, sind dadurch notwendig. Der Laserstrahl bietet jedoch den Vorteil, dass mit ihm das aufgebrauchte leitfähige Material thermisch nachbehandelt und damit die elektrische Leitfähigkeit verbessert werden kann.

Tabelle 3-1: Bewertung der unterschiedlichen Ansätze aus Abschnitt 3.4

<b>Erfüllungsgrad</b> 	Anforderungen aus Abschnitt 2.8	CALVERT ET AL. (1999)	SELLS & BOWYER (2004)	PERIARD ET AL. (2007)	ESPALIN ET AL. (2014)	MACDONALD ET AL. (2014)	NIESE ET AL. (2014)	ANSORGE ET AL. (2010)	AMEND ET AL. (2013)	REFLE ET AL. (2017)	PIQUÉ ET AL. (2000)
	Eingriffsmöglichkeit	A1	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ohne Prozessbeeinträchtigung	A2	◐	◑	◒	◓	◔	◕	◖	◗	?	◘
Prozesseignung	A3	?	○	?	○	?	○	○	○	○	?
Integrationsaufwand	A4	◐	◑	◒	◓	○	◔	◕	○	◖	○
Arbeitssicherheit	A5	●	◑	◒	◓	◔	◕	◖	◗	◘	◙
Integrierbarkeit	A6	●	◑	◒	◓	◔	?	○	○	●	◘
therm. Beeinflussung	A7	◐	○	●	◑	◒	○	◓	○	○	○
mech. Beeinflussung	A8	◐	○	◑	○	◒	◓	◔	◕	◖	◗
mech. Eigenschaften	A9	?	?	◑	◒	?	?	?	●	?	?
spez. Widerstand	L1	?	?	●	?	●	?	?	●	●	?
geometr. Abmessungen	L2	○	○	○	◓	◔	?	○	●	●	●
Flexibilität	L3	◐	◑	◒	◓	◔	◕	◖	◗	◘	◙
2D- und 3D-Leiterbahnen	L4	◐	◑	●	◓	◔	?	●	◑	◒	◓
Ankontaktierung	L5	?	●	◑	●	●	?	●	●	●	●
unter. Komponenten	K1	●	●	◑	●	●	?	◑	●	●	◑
sichere Ankontaktierung	K2	?	?	◑	◒	◓	?	◑	●	●	?
Übergangswiderstand	K3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Ansätze beim Verfahren *3D-Drucken* beschäftigen sich aktuell lediglich mit der Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen während des additiven Aufbauprozesses. Erste Ergebnisse hierzu konnten bei der Erstellung von zweidimensionalen Leiterbahnen erzielt werden. Eine Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen wurde noch nicht umgesetzt. Zudem zeigen die Leiterbahnen starke Schwankungen hinsichtlich ihrer Abmessungen, wodurch die Forderung nach definierten Leiterbahnen nicht erfüllt werden kann. Zudem fehlen für die vollständige Erreichung der definierten Ziele zusätzliche Verfahrensschritte zur Integration von

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

elektrischen Komponenten und zur Anbindung der Komponenten an die elektrischen Leiterbahnen.

Trotz der vielen Vorteile von elektrischen Schaltungen in additiv gefertigten Werkstücken konnte somit kein Ansatz identifiziert werden, der die in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen gänzlich erfüllt. Daher muss in dieser Arbeit ein 3D-Druckprozess so erweitert werden, dass er die *Integration von elektrischen Leiterbahnen* sowie die *Integration und Ankontaktierung von elektrischen Komponenten* während des additiven Aufbauprozesses unter Einhaltung der definierten Anforderungen ermöglicht. Das zur Klärung der wissenschaftlichen Fragestellung eingesetzte Vorgehen wurde in Abschnitt 1.3 dargestellt.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

### 4.1 Vorgehen im Kapitel

Zur Erreichung des in Abschnitt 1.2 definierten Ziels gilt es, den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Prozess des Verfahrens *3D-Drucken* um zusätzliche Subprozesse zur *Integration von elektrischen Leiterbahnen* sowie zur *Integration von elektrischen Komponenten* und deren *Ankontaktierung* unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen zu erweitern (vgl. Abbildung 4-1).

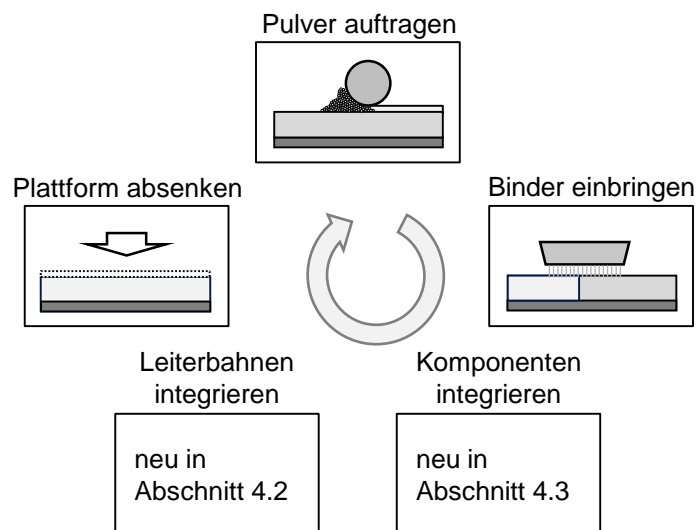


Abbildung 4-1: Erweiterung des 3D-Druckprozesses um zwei Subprozesse: die Integration von Leiterbahnen und von Komponenten

Ausgehend von dem in Abbildung 2-1 (Seite 12) beschriebenen Prozess werden zunächst unterschiedliche leitfähige Materialien hinsichtlich ihrer Eignung bewertet (vgl. Abschnitte 4.2.2 und 4.2.3), bevor mit einem ausgewählten Werkstoff ein Prozess zur *Integration von elektrischen Leiterbahnen* in einem additiv gefertigten Bauteil entwickelt wird (2D: Abschnitt 4.2.3; 3D: Abschnitt 4.2.5). Basierend auf den Ergebnissen werden unterschiedliche Bauformen der elektrischen Komponenten und deren Verbindungsmöglichkeiten an das leitfähige Material analysiert (Abschnitt 4.2.6). Zusammen mit dem im Folgenden zu entwickelnden Subprozess zur *Integration von elektrischen Komponenten* (4.3.3) wird in Abschnitt 4.3.5 ein Vorgehen zur Herstellung einer elektrischen Verbindung während des Aufbauprozesses erarbeitet. Die Ankontaktierung bildet die Schnittstelle zwischen beiden

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

---

Subprozessen und muss, um Iterationsschritte und Anpassungen in den Einzelprozessen zu vermeiden, zweimal durchlaufen werden (vgl. Abbildung 4-2).

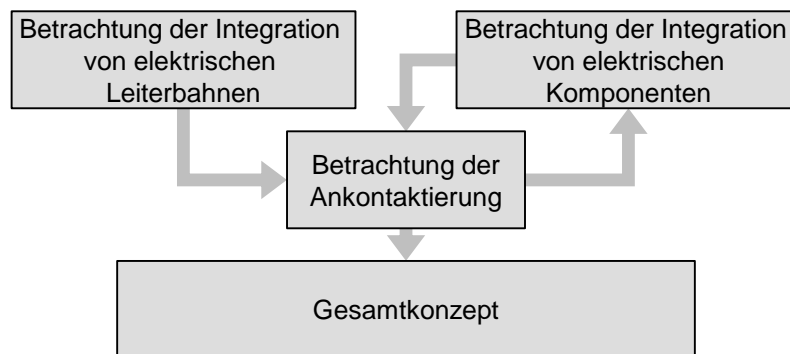


Abbildung 4-2: Vorgehensweise bei der Entwicklung der Subprozesse

Zur Veranschaulichung des zukünftigen funktionserweiterten 3D-Druckprozesses werden für die einzelnen Subprozesse erweiterte Abläufe erstellt (vgl. Abschnitt 4.2.7 und Abschnitt 4.3.6) und diese in Abschnitt 4.4 zu einem Gesamtprozess für die Erzeugung von elektrischen Schaltungen während des additiven Aufbauprozesses verknüpft.

## 4.2 Integration von elektrischen Leiterbahnen

### 4.2.1 Vorgehensweise

Zur Auswahl eines geeigneten leitfähigen Materials werden zunächst die unterschiedlichen Materialklassen hinsichtlich ihrer Eignung für einen Einsatz im 3D-Druckprozess bewertet. Als Bewertungsgrundlage wurden die Eigenschaften sowie die Vor- und Nachteile für gängige leitende Materialien (Feststoffe, Suspensionen, Tinten und Klebstoffe) ermittelt. Die Ergebnisse können dem Anhang (Abschnitt 10.1) entnommen werden. Entscheidungsgrundlage für ein für den Prozess geeignetes Material sind die Ergebnisse aus einer Fluidsimulation und experimenteller Versuchsreihen. Basierend auf dem ausgewählten Material werden Konzepte zur Erzeugung von zweidimensionalen wie auch dreidimensionalen Leiterbahnen (vgl. Abschnitt 4.2.5) erarbeitet. Weiterhin wird untersucht, ob eine Ankontaktierung von elektrischen Komponenten an die Leiterbahnen möglich ist bzw. welche weiteren Schritte dafür notwendig sind (vgl. Abschnitt 4.2.6). Der um den Subprozess *Integration von elektrischen Leiterbahnen* erweiterte 3D-Druckprozess wird abschließend in einem Prozessmodell veranschaulicht (vgl. Abschnitt 4.2.7).



### 4.2.2 Bewertung der Materialien anhand der Anforderungen

Die relevanten Anforderungen aus Abschnitt 2.8 werden zunächst, angelehnt an die MoSCoW-Priorisierung (MORAN 2016), in Muss- (MUST), Soll- (SHOULD) und Kann-Anforderungen (COULD bzw. nice to have) sowie die nicht umzusetzenden (WON'T) Anforderungen eingeordnet. Letztere werden für zukünftige Entwicklungen vorgemerkt. Die Erfüllung von Muss-Anforderungen ist zur Erreichung der Zielsetzung zwingend notwendig. Wird eine Muss-Anforderung von einer Lösungsalternative auch durch technische Anpassungen nicht erfüllt, führt dies zu deren Ausschluss. Soll-Anforderungen sollten für die Zielerreichung erfüllt werden, sind aber nicht erfolgskritisch. Sie bestimmen jedoch die Eignung einer Lösung, den Grad ihrer Zielerreichung sowie ihre Leistungsfähigkeit. Kann-Anforderungen sind für die Zielerreichung nicht zwingend notwendig, können aber z. B. aufgrund von Vereinfachungen in der Bedienung einen zusätzlichen Entscheidungsgrund darstellen.

Ein Eingriff in jede Schicht (A1) kann unter Einsatz jeder Materialklasse erfolgen. Integrierte Leiterbahnen (A6) erfordern eine Handhabung der Materialien während des 3D-Druckprozesses. Ansätze für die Abgabe von Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Viskosität durch berührungslose Systeme wurden bereits in Kapitel 3 aufgezeigt. Für die Ablage von Festkörpern (z. B. Drähte) auf einem Pulverbett während eines additiven Aufbauprozesses bestehen noch keine Erkenntnisse. Aufgrund der Festigkeit des Materials im Ausgangszustand kann die Erzeugung von flexiblen Leiterbahnen (L3) mit definierten Winkeln und Radien eine Vorbehandlung des Festkörpers erfordern. Materialabhängige minimale Biegeradien schränken jedoch die Formflexibilität von Festkörpern ein, wodurch die Materialklasse mit „minus“ bewertet wurde. Zudem ist mit einem hohen Umsetzungsaufwand zu rechnen. Flüssigkeiten können, unabhängig von ihrer Viskosität, durch unterschiedliche Abgabemethoden und unter Verwendung von zusätzlichen Achsensystemen flexibel und positionsgenau auf eine Oberfläche aufgebracht werden. Der Aufwand für die Abgabe des leitfähigen Materials variiert hingegen (A4). Leitfähige Tinten können bei Eignung einfach und effizient mithilfe eines Druckkopfes verarbeitet werden. Die anderen Materialklassen benötigen ein zusätzliches Abgabemodul. Da die Eigenschaften der mit leitfähigen Flüssigkeiten erzeugten elektrischen Leiterbahnen nicht nur material-, sondern auch prozessabhängig sind, können durch die alleinige Betrachtung der unterschiedlichen Materialklassen keine Aussagen über die erreichbare elektrische Leitfähigkeit (L1) und die geometrischen Abmessungen (L2) getroffen werden. Vielmehr gilt es diese Werte experimentell zu ermitteln.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

---

Hinsichtlich einer Beeinträchtigung des additiven Aufbauprozesses (A2) können für Festkörper und Leitklebstoffe aufgrund fehlender Untersuchungen keine Aussagen getroffen werden. Ein Patent von WICKER ET AL. (2013) beschreibt die Möglichkeit, Vertiefungen in einer Ebene vorzusehen, um diese anschließend mit einem Material bzw. einer Komponente zu füllen. Umsetzungen zur Vermeidung eines Kontaktes zwischen einer Leiterbahn und dem Beschichter können folgenden Veröffentlichungen entnommen werden: MEDINA ET AL. (2005), PALMER ET AL. (2005), PERIARD ET AL. (2007), MOSES ET AL. (2009), ANSORGE ET AL. (2010), MIRELES ET AL. (2012), AGUILERA ET AL. (2013), ESPALIN ET AL. (2014), NIESE ET AL. (2014). Eine Umsetzung dieser Methoden bei einem pulverbettbasierten Verfahren erfolgte noch nicht. Suspensionen und leitfähige Tinten bilden aufgrund der vergleichsweise geringen Auftragsmenge des Materials lediglich dünne Schichten auf der Oberfläche, wodurch der folgende Prozessschritt der Pulverbetterzeugung nicht beeinflusst werden dürfte. Bezüglich der thermischen Beeinflussung des Prozesses (A7) können aktuell lediglich Festkörper positiv bewertet werden, da der Einsatz von Drähten keine thermische Nachbehandlung erfordert. Im Falle einer Aufheizung des Drahtes zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit ist diese Anforderung mit „minus“ zu bewerten. Bei den leitfähigen Flüssigkeiten ist die Erfüllung der Anforderung materialabhängig, wodurch keine eindeutige Aussage möglich ist.

Eine Anbindung von elektrischen Komponenten an eine Leiterbahn (L5) mithilfe eines Feststoffes oder eines Leitklebstoffs ist aktueller Stand der Technik in der Elektronikproduktion. Eine direkte Anbindung an elektrische Leiterbahnen, die mit Suspensionen bzw. leitfähigen Tinten hergestellt wurden, ist nicht bekannt und müsste für eine zuverlässige Aussage zunächst experimentell untersucht werden. Standardmäßig werden bei diesen Materialien zur Herstellung von Verbindungen Leitpasten bzw. Feststoffe eingesetzt.

Eine Aussage über die Eignung der unterschiedlichen Materialien für ein pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren (A3) kann aufgrund fehlender Erkenntnisse nur teilweise getätigt werden. Vorversuche zeigten, dass Festkörper auf einem Pulverbett abgelegt werden können, es jedoch zu einer mechanischen Beeinflussung des in diesem Prozessschritt noch formlabilen Bauteils kommen kann (A8). Durch die kontaktfreie Abgabemethode kann bei Flüssigkeiten mit einer niedrigen Viskosität davon ausgegangen werden, dass das Pulverbett nicht beeinflusst wird. Bei Leitklebstoffen gilt es, dies noch zu untersuchen. Jedoch kann es aufgrund der porösen Pulverbettoberfläche zu einem Einsickern der Flüssigkeit kommen. Ein Beispiel dafür zeigt die Arbeit von KELLNER (2013) (vgl. Abbildung 4-3).

## 4.2 Integration von elektrischen Leiterbahnen

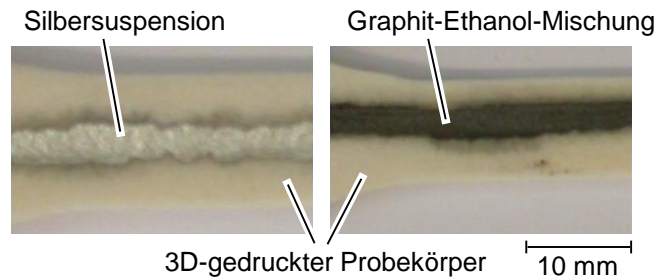


Abbildung 4-3: Erzeugung zweidimensionaler elektrischer Leiterbahnen unter Einsatz einer Silbersuspension (links) und einer Graphit-Ethanol-Mischung (rechts) (KELLNER 2013)

Zwei unterschiedliche Suspensionen wurden von ihr unter Einsatz eines Multimaterialmoduls und einer Dosiernadel mit einem Öffnungsdurchmesser von  $0,33\ \mu\text{m}$  auf eine Pulverbett oberfläche abgelegt. Die Leiterbahnen hatten eine minimale Breite von  $1 \pm 0,05\ \text{mm}$  und eine minimalen Tiefe von  $150\ \mu\text{m}$ .

Die undefinierte Ausprägung der Leiterbahn könnte sowohl durch die verwendete Suspension als auch durch den Auftragsmechanismus verursacht worden sein. Dies wurde im Rahmen der Arbeit nicht genauer analysiert. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Eignung des Materials zur Erzeugung von definierten Strukturen sind demzufolge noch Aufgaben zukünftiger Forschung.

Bezüglich der Anforderung einer arbeitssicheren Handhabung der Materialien (A5) bestehen bei dem Einsatz sowohl von Festkörpern als auch von Suspensionen und Klebstoffen keine Bedenken. Partikelbasierte leitfähige Tinten hingegen beinhalten Nanopartikel, die aufgrund ihrer geringen Größe natürliche Barrieren des menschlichen Körpers überwinden und so zu Gesundheitsschädigungen führen können (BECKER ET AL. 2009). Da bei der Verarbeitung der Tinten mit einem Druckkopf ein feiner Nebel mit Silbernanopartikeln gebildet wird, kann eine gesundheitliche Beeinträchtigung des Bedieners nur durch aufwändige technische Abluftsysteme vermieden werden.

Die Bewertung der unterschiedlichen Materialien wird in Tabelle 4-1 dargestellt. War aufgrund fehlender Informationen eine Bewertung nicht möglich, wurde dies mit einem Fragezeichen gekennzeichnet.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Tabelle 4-1: Eingliederung der Anforderungen und Bewertung der Materialklassen; kann aufgrund fehlender Informationen keine Aussage getroffen werden, wird dies mit einem „?“ dargestellt.

Anforderungen aus Abschnitt 2.8		Festkörper	Leitkleber	Lacke und Suspensionen	Leitfähige Tinten
Muss-Anforderungen	Eingriffsmöglichkeit A1	+	+	+	+
	Prozessbeeinträchtigung A2	?	?	+	+
	Prozesseignung A3	+	?	?	?
	Arbeitssicherheit A5	+	+	+	?
	Integrierbarkeit A6	?	+	+	+
	Flexibilität L3	-	+	+	+
Soll-Anforderungen	therm. Beeinflussung A7	+	?	?	-
	mech. Beeinflussung A8	-	?	+	+
	Ankontaktierung L5	+	+	?	?
	elektrischer Widerstand L1	+	?	?	?
	geometr. Abmessungen L2	+	?	?	?
	mech. Eigenschaften A9	?	?	?	?
Kann-Anforderungen	2D- und 3D-Leiterbahnen L4	?	?	?	?
	Integrationsaufwand A4	-	-	-	+

+ erfüllt    ? Informationsmangel    - nicht erfüllt

Eine Materialklasse ist dann für den Einsatz geeignet, wenn alle Muss-Anforderungen positiv bewertet werden konnten. Bereits *eine* negative Bewertung einer Muss-Anforderung führte zum Ausschluss der Materialklasse. So konnte beispielsweise aufgrund einer zu geringen Flexibilität die Muss-Anforderungen L3 mithilfe von Festkörpern nicht erfüllt werden, wodurch diese Klasse als Option ausschied.

Für eine Entscheidung zwischen den unterschiedlichen Flüssigkeiten bedurfte es zusätzlicher Untersuchungen. Näher analysiert wurde zunächst die Anforderung A3: *Eignung der Materialien für einen Einsatz beim pulverbettbasierten 3D-Druckprozess*, da dies bei allen verbleibenden Materialklassen eine noch zu klärende Muss-Anforderung darstellte. Wenn die Anforderung A3 mit der Materialklasse Lacke und Suspensionen erfüllt werden kann, ist das Material für die Zielerfüllung geeignet.

Als Entscheidungsgrundlage wurde zunächst ein Simulationsmodell, angelehnt an den in Abbildung 4-4 dargestellten Modellentwicklungsprozess, aufgebaut. Eine Beschreibung der eingesetzten Methode sowie der Modellentwicklung wurde in GLASSCHROEDER ET AL. (2014) veröffentlicht und kann im Detail dem Anhang (vgl. Abschnitt 10.2) entnommen werden. Anhand des Modells konnte das Verhalten verschiedener Flüssigkeiten nach der Abgabe auf ein Pulverbett untersucht

werden. Aufgrund der physikalischen Komplexität der Mehrphasenströmung und der damit notwendigen hohen Rechenleistung wurde die Simulationsdomäne auf ein repräsentatives Volumenelement eingeschränkt. Durch eine Verifizierung des Modells anhand einer Variationsrechnung wurde die Richtigkeit der Reaktion des Modells auf Änderungen der Eingangsparameter nachgewiesen. Eine Validierung der Simulation war im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich, da die Randbedingungen der Simulation nicht experimentell nachgestellt werden konnten. Die Simulationsergebnisse konnten daher nur für erste Aussagen bezüglich des Verhaltens der Flüssigkeiten nach der Abgabe auf einem Pulverbett genutzt werden.

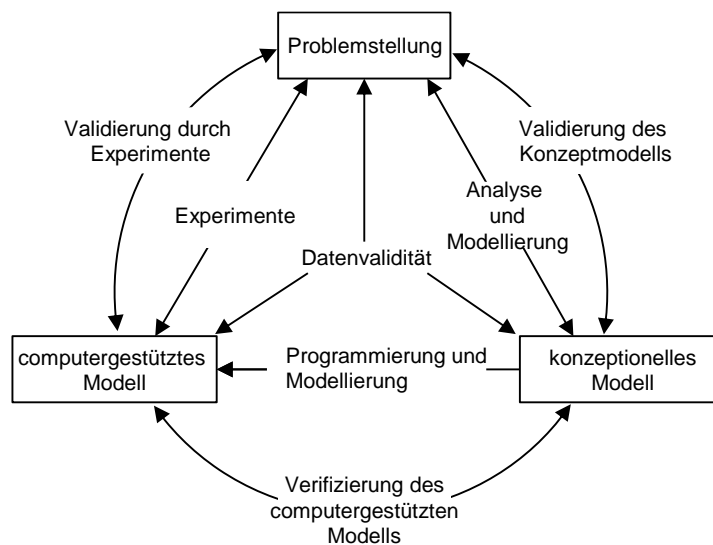


Abbildung 4-4: Vereinfachte Darstellung eines Modellentwicklungsprozesses nach SARGENT (2013)

Um eine endgültige Aussage hinsichtlich der Eignung der unterschiedlichen Flüssigkeiten im Druckprozess zu erhalten, wurden experimentelle Vorversuche mit zwei unterschiedlichen Materialien (eine Leittinte und ein Leitklebstoff) durchgeführt und die entstandenen Probekörper anschließend untersucht. Dabei zeigte sich, dass die experimentellen Befunde die Ergebnisse der Simulation widerspiegeln.

### 4.2.3 Simulation und Experimente zur Materialauswahl

Bevor das Verhalten von Fluiden simuliert werden konnte, musste zunächst ein repräsentatives Volumenmodell des Pulverbetts aufgestellt werden (vgl. Abschnitt 10.2.3 im Anhang). Die Eigenschaften des Pulverbettes wurden bereits in Abschnitt 2.3 erläutert und dienen als Zielgröße des zu erstellenden Pulvermodells.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Aufgrund der großen Anzahl der Pulverpartikel musste für das Pulverbettmodell zunächst eine Abstraktion vorgenommen werden. Zur Beherrschung der Komplexität war die Einführung eines repräsentativen Volumenelements (Representative Elementary Volume = REV) zweckmäßig. Dabei handelt es sich um einen kleinen Ausschnitt aus dem Pulverbett, welcher zwar die Charakteristik der makroskopischen Pulverbettmatrix (Pulverkorn, Binder, Luft) aufweist, aber aufgrund der geringen Größe weniger komplex ist und damit den Rechenbedarf gering zu halten erlaubt. Das Prinzip eines REVs veranschaulicht Abbildung 4-5.

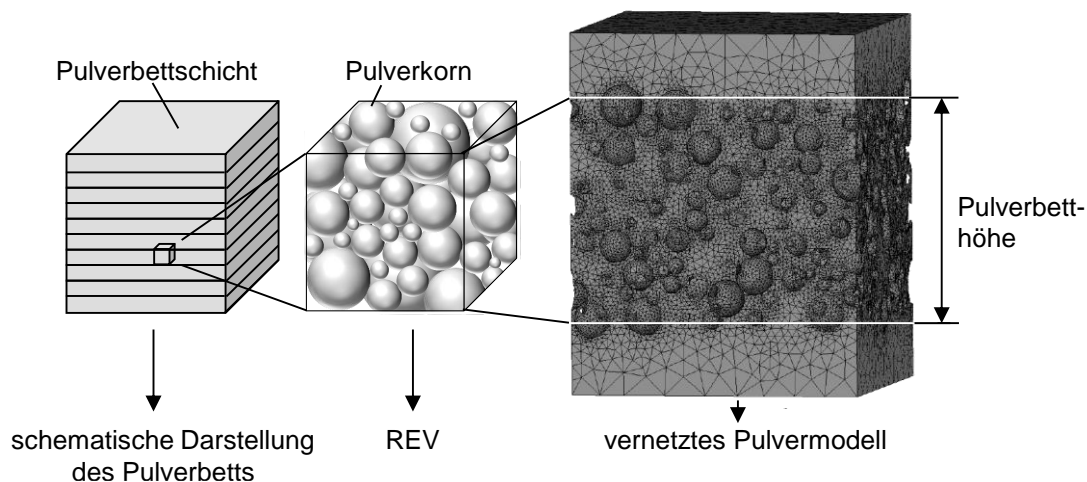


Abbildung 4-5: Prinzip eines repräsentativen Volumenelements (Mitte) und vernetztes Pulvermodell (rechts)

Da das REV einen Ausschnitt aus der realen Pulvermatrix darstellt, können nach der Berechnung der lokalen Strömungsverhältnisse die Erkenntnisse auf das Gesamtsystem übertragen werden. Dazu müssen die Pulverkörner des REVs in Bezug auf den Raumfüllungsgrad und die Korngrößenverteilung vergleichbare Eigenschaften wie das reale Pulverbett aufweisen.

Zur Abstraktion des Strömungsverhaltens unterscheiden HAYES ET AL. (1995) dabei vier unterschiedliche Modellklassen:

- Geometrisches Kapillarmodell
- Geometrisches Zellmodell
- Empirisches Modell
- Statistisches Modell

In dem hier betrachteten Fall handelt es sich nach HAYES ET AL. um ein geometrisches Modell unter Berücksichtigung der Umströmung des Einzelkörpers.

Zur Erstellung eines Pulvermodells für die Simulation wurde anhand eines APDL-Skripts ein stochastischer Algorithmus zur Füllung eines Raumes mit Pulverkörnern formuliert. Eine Beschreibung des Algorithmus sowie eine grafische Veranschaulichung der Erstellung des Pulvermodells erfolgt in Abschnitt 10.2.3 im Anhang. Die gewählten Abmessungen des Modells betragen  $200\ \mu\text{m} \cdot 200\ \mu\text{m} \cdot 150\ \mu\text{m}$ . Zur Erreichung eines realen Raumfüllungsgrads von 60 % musste der maximale im Modell vorkommende Korndurchmesser auf  $64\ \mu\text{m}$  festgelegt werden. Das finale Modell bestand aus 2115 Einzelkörpern.

Zur Beantwortung der in Abschnitt 4.2.2 gestellten Frage, welche leitfähige Flüssigkeit für den Einsatz in einem 3D-Druckprozess geeignet ist, wurden zwei Fluide mit unterschiedlicher Viskosität auf das Pulverbett aufgebracht (vgl. Abschnitt 10.2.6). Die dynamische Viskosität der ersten Flüssigkeit betrug 20 mPas und stand stellvertretend für die verschiedenen leitfähigen Tinten. Die Grenze wurde aufgrund der technischen Limitierung des verwendeten Druckkopfes SpectraSL128 gewählt (FUJIFILM DIMATIX INC. 2010). Dieser Materialklasse sind auch die meisten Suspensionen zugeordnet, da die Trägerflüssigkeit, in der die Partikel gelöst sind, oft auf Ethanol bzw. Wasser mit einer Viskosität unter 20 mPas basiert (vgl. Abschnitt 10.1).

Die dynamische Viskosität der zweiten Flüssigkeit (Leitklebstoff) betrug 300 mPas. Dies ist als Minimalwert anzusehen, da die meisten Leitklebstoffe auf Epoxidharz basieren und somit grundsätzlich eine höhere dynamische Viskosität aufweisen. Für eine bessere Verarbeitbarkeit des Materials kann eine Erwärmung des Leitklebstoffs notwendig sein, wodurch die Viskosität sinkt und damit in den definierten Bereich gelangen kann.

Die Ergebnisse der Simulation (vgl. Abbildung 4-6) werden anhand des Volumenanteils (VF) nach einer Eindringzeit von 15 ms dargestellt. Für jede Zelle wurde der Anteil des Binders  $V_{FB}$ , der Anteil der Luft  $V_{FL}$  sowie der Anteil des leitfähigen Materials  $V_{FT}$  (Tinte) bzw.  $V_{FK}$  (Klebstoff) für eine Zelle berechnet, wobei die Summe je Zelle stets 1 ergeben muss. Bei einer Ergebnisdarstellung mit einem  $V_{FB}$ -Wert von beispielsweise 0,8 werden daher nur die Zellen dargestellt, die zu mindestens 80 % mit Binder gefüllt sind. Demnach kann die Grenzfläche zwischen dem Binder und dem leitfähigen Material nicht exakt lokalisiert werden. Angaben zur Vernetzungsstrategie sowie zu den definierten Randbedingungen des Simulationsmodells können dem Anhang entnommen werden (Abschnitt 10.2).

Die Verteilung der leitfähigen Tinte im Porenraum des Pulverbetts veranschaulicht, dass die Tinte wie der Binder in das Pulverbett einsickert und sich ein fein verzweigtes Netz mit schmalen Stegen ausbildet. Wegen der Kapillarkräfte kommt

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

es auch zu einer horizontalen Bewegung der Flüssigkeit. Hinsichtlich des Ziels, definierte Leiterbahnen zu erzeugen, ist dieses Verhalten als nachteilig zu bewerten. Der Ladungstransport kann lediglich über eine dünne Netzstruktur erfolgen. Daher wird bei Verwendung einer leitfähigen Tinte ein hoher elektrischer Widerstand der elektrischen Leiterbahn erwartet.

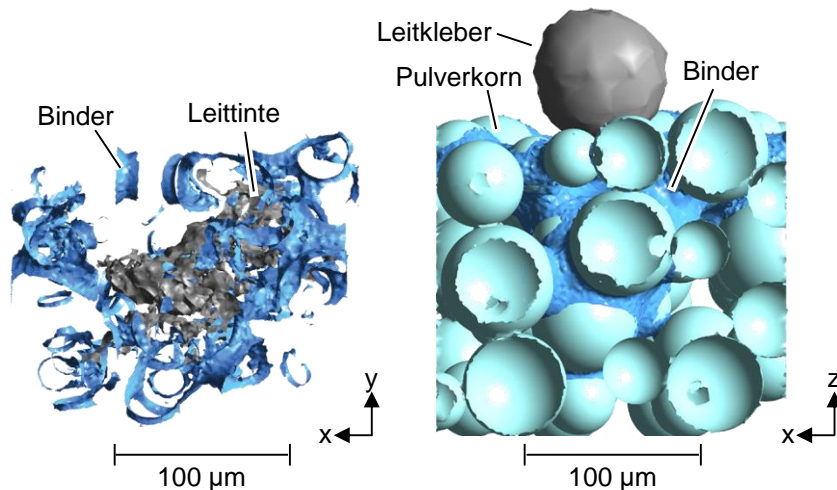


Abbildung 4-6: Darstellung der Simulationsergebnisse; links: Aufbringen einer leitfähigen Tinte ( $VF_B = 0,6$  und  $VF_T = 0,6$ ) (Pulverpartikel wurden der Übersicht halber ausgeblendet); rechts: Aufbringen eines Leitklebstoffs ( $VF_B = 0,4$  und  $VF_K = 0,4$ ).

Im Gegensatz dazu kann beim Auftrag des Leitklebstoffs kein Einsickern des Materials in das Pulverbett ermittelt werden. Die erhöhte Viskosität hat nach dem Newtonschen Fluidreibungsgesetz einen Anstieg der inneren Reibungskraft zur Folge, die der Deformation des Tropfens einen Widerstand entgegensetzt und somit sein Eindringen verhindert. Es muss jedoch erwähnt werden, dass in dieser Simulation aufgrund des hohen Rechenzeitbedarfs nur ein kleiner Zeitbereich von 15 ms betrachtet werden konnte. Eine Deformation und ein Einsickern des Leitklebstoffs können verzögert erfolgen. Um die Einsatzfähigkeit der Materialklasse final zu bewerten, mussten Experimente durchgeführt werden.

### 4.2.3.1 Experimentelle Untersuchung – leitfähige Tinte

Für die experimentelle Untersuchung wurde das Material sowohl manuell wie auch mithilfe eines Druckkopfes auf ein Pulverbett aufgebracht. Eine Bewertung der erzeugten Leiterbahnen erfolgte hinsichtlich des elektrischen Widerstandes und der geometrischen Abmessungen der Leiterbahnen.



Zur Auswahl einer geeigneten leitfähigen Tinte wurden unterschiedliche, käuflich erwerbbar Produkte mit folgenden Anforderungen abgeglichen:

- Die dynamische Viskosität der Tinte muss, um diese mit dem Druckkopf verarbeiten zu können,  $\leq 20$  mPas sein.
- Die Größe der leitfähigen Partikel der Tinte sollte so gering wie möglich sein, um ein Verstopfen der Druckkopfdüsen zu vermeiden.
- Für eine gute elektrische Leitfähigkeit sollte der Anteil der leitfähigen Partikel in der Tinte so hoch wie möglich sein.
- Zur Vermeidung einer thermischen Beeinflussung des Pulverbetts sollte die notwendige Sintertemperatur so niedrig wie möglich sein.

Die unter Berücksichtigung der Anforderungen ausgewählte Tinte der Firma *Xerox*® hat einen Massenanteil an leitfähigen Partikeln von 40 % bis 43 % bei einer Partikelgröße  $\leq 20$  nm. Die dynamische Viskosität liegt zwischen 5 mPas und 30 mPas, abhängig von der Temperatur der Tinte. Die Dauer des Sinterprozesses bei 120 °C wird vom Hersteller mit 10 Minuten angegeben. Leitfähige Tinten mit geringeren Sintertemperaturen zur Vermeidung einer thermischen Beeinflussung des Verfestigungsprozesses sind nicht auf dem Markt erhältlich. Nach LEE ET AL. (2005) kann eine Reduzierung der Sintertemperatur durch eine Erhöhung der Belichtungsdauer ausgeglichen werden, wodurch ein Einsatz der *Xerox*®-Tinte auf thermisch sensiblen Oberflächen möglich sein dürfte.

Das leitfähige Material wurde zunächst manuell unter Einsatz einer Spritze mit montierter Dosiernadel direkt nach dem Binderauftrag auf einen Probekörper aufgetragen. Da die aufgebrachte Menge nicht der Abgabemenge eines Druckkopfes entsprach, wurde in einer weiteren Versuchsreihe die Silbertinte mithilfe eines zweiten in die Anlage integrierten Druckkopfes verarbeitet. Die thermische Nachbehandlung über die Zeit  $t$  erfolgte mit einem Infrarotheizstrahler der Firma *Heraeus Holding GmbH* (Leistung 1200 W). Dieser befand sich dabei in einem Abstand von 20 mm über der Pulverbettsoberfläche. Der elektrische Widerstand wurde mit einem Multimeter durch eine Zweipunktmessung bei einem Messabstand von 10 mm bestimmt. Übergangswiderstände von der Messspitze auf die elektrische Leiterbahn können daher in den Werten enthalten sein. Jede Messung wurde zweimal wiederholt, um Schwankungen auszugleichen. Zur Ermittlung des Einflusses der Materialmenge auf die elektrische Leitfähigkeit wurden auf einigen Probekörpern die Leiterbahnen mehrfach gedruckt, die genaue Abgabemenge konnte jedoch nicht ermittelt werden. Die gemittelten Ergebnisse der Widerstandsmessungen können aus Tabelle 4-2 abgelesen werden.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Tabelle 4-2: Gemittelte Widerstandswerte der mit Nano-Silbertinte hergestellten Leiterbahnen mit unterschiedlichen Nachbehandlungsprozessen

	keine thermische Nachbehandlung	thermische Nachbehandlung t < 10s	thermische Nachbehandlung t > 10s	mehrfach bedruckt + thermische Nachbehandlung t > 10s
manueller Materialauftrag	Widerstand unendlich	1200 k $\Omega$	4 $\Omega$	1 $\Omega$
Materialauftrag mit Druckkopf	Widerstand unendlich	Widerstand unendlich	Widerstand unendlich	0,008 $\Omega$

Die Erzeugung einer leitfähigen Struktur auf einer Pulverbetttoberfläche durch eine manuelle Materialabgabe und eine thermische Nachbehandlung ist demnach möglich. Der Widerstand sinkt mit zunehmender Belichtungsdauer sowie bei einem steigenden Anteil an leitfähigem Material. Eine Erhöhung der Tintenmenge wurde bei den Versuchen durch eine manuelle Abgabe der leitfähigen Tinte statt der Abgabe mit dem Druckkopf und durch mehrfaches Bedrucken einer Leiterbahn erzielt (siehe Tabelle 4-2, Zeile 1). Unter Einsatz eines Druckkopfes wurde bei einer einmaligen Materialabgabe auf die Oberfläche ein unendlicher Widerstand ermittelt. Erst bei einer Mehrfachbedruckung derselben Leiterbahn und einer thermischen Nachbehandlung konnte ein endlicher Widerstandswert erreicht werden. Während der Erzeugung der Leiterbahnen wurde zudem ein kontinuierlicher Anstieg an ausgefallenen Druckkopfdüsen festgestellt, was schlussendlich zu einem vollständigen Verstopfen des Druckkopfes führte. Durch das Freispritzen des Moduls (Erzeugung eines Überdrucks an den Düsen) konnte nur kurzzeitig eine Verbesserung des Druckkop fzustands erzielt werden.

Bei der thermischen Nachbehandlung trat ein Verdampfen des Bindermaterials ein, was sich in einer farblichen Veränderung des bedruckten Pulverbetts bemerkbar machte. Eine Anbindung der Folgeschichten war aufgrund des fehlenden Reaktionspartners in dieser Situation nicht mehr möglich. Eine nähere Untersuchung der Leiterbahn mithilfe eines optischen Auflichtmikroskops (Nikon SMZ1000 mit einer Kaltlichtquelle Schott KL 1500 LCD) zeigte, dass die Pulverpartikel durch die thermische Nachbehandlung die Glasübergangstemperatur überschreiten, ihre Form verlieren und daher eine geschlossene PMMA-Deckschicht bilden. Diese scheint die Leiterbahn vollständig zu umschließen. Lufteinschlüsse deuten auf eine Hemmung des Austritts der beim Sinterprozess der Tinte entstehenden Gase hin.

Ein Querschnitt durch den mit leitfähiger Tinte bedruckten Probekörper ist in Abbildung 4-7 dargestellt. Wie bereits bei der Fluidsimulation unter Einsatz eines REVs (vgl. Abbildung 4-6) prognostiziert wurde, kommt es aufgrund der niedrigen dynamischen Viskosität der Tinte zu einem Einsickern der Flüssigkeit in den

Probekörper, was zu einer Ummantelung der Pulverpartikel mit einer leitfähigen Deckschicht führt.

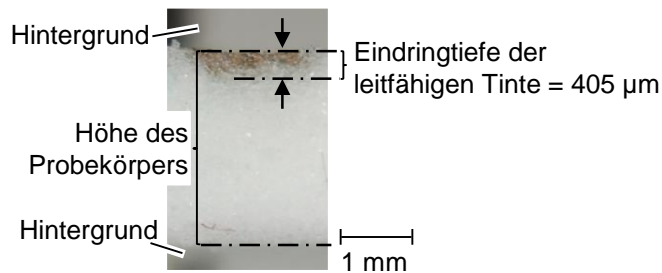


Abbildung 4-7: Darstellung des Querschnitts eines Probekörpers mit gedruckter Leiterbahn aus leitfähiger Tinte

Die Ergebnisse von KELLNER (2013) verdeutlichen, dass durch die Verwendung von Suspensionen vergleichbare Resultate erzielt werden können. Eine gute elektrische Leitfähigkeit konnte aufgrund der im Vergleich zu Nanotinten größeren Partikel sowie einer großen Menge an aufgetragenem Material erreicht werden.

Die Erzeugung einer leitfähigen Struktur ist also maßgeblich abhängig von der Menge an aufgebrachtem Material und der damit verbundenen Fähigkeit, genügend Leiterpfade über der Netzstruktur auszubilden. Eine Erhöhung der Materialmenge führt zwangsweise zu einer Verbreiterung der Struktur und somit zu Leiterbahnen mit undefinierten Abmessungen. Zudem verbessert sich die elektrische Leitfähigkeit mit zunehmender Sinter Temperatur bzw. Sinterzeit. Eine thermische Nachbehandlung beeinflusst jedoch den additiven Aufbauprozess und kann zu einem Prozessabbruch führen.

### 4.2.3.2 Experimentelle Untersuchung - Leitklebstoff

Die experimentelle Untersuchung des Leitklebstoffs erfolgte nach der gleichen Vorgehensweise wie bei der Tinte. So wurde nach der Auswahl eines geeigneten Materials dieses zunächst manuell mithilfe einer Spritze und einer Dosiernadel verarbeitet. Anschließend erfolgte eine prototypische Umsetzung eines Dispensersystems zur Untersuchung der Materialabgabe während des laufenden additiven Aufbauprozesses. Die Leiterbahnen wurden wiederum hinsichtlich des elektrischen Widerstands sowie ihrer geometrischen Abmessungen bewertet.

Ausgewählt wurde der Leitklebstoff anhand der folgenden Kriterien:

- Die Viskosität muss über 300 mPas liegen.
- Eine Aushärtung muss ohne thermische Nachbehandlung möglich sein.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

- Der Silberanteil sollte so hoch wie möglich sein, um eine gute elektrische Leitfähigkeit zu erreichen.

Anders als bei den Tinten hatten die für den Einsatz eines Druckkopfes relevanten Parameter *Größe der leitfähigen Partikel* und *dynamische Viskosität* keinen Einfluss auf die Materialauswahl im Rahmen dieser Arbeit, da für die Verarbeitung von Leitklebstoffen ein zusätzliches Multimaterialmodul eingesetzt werden musste (vgl. Abbildung 4-8).

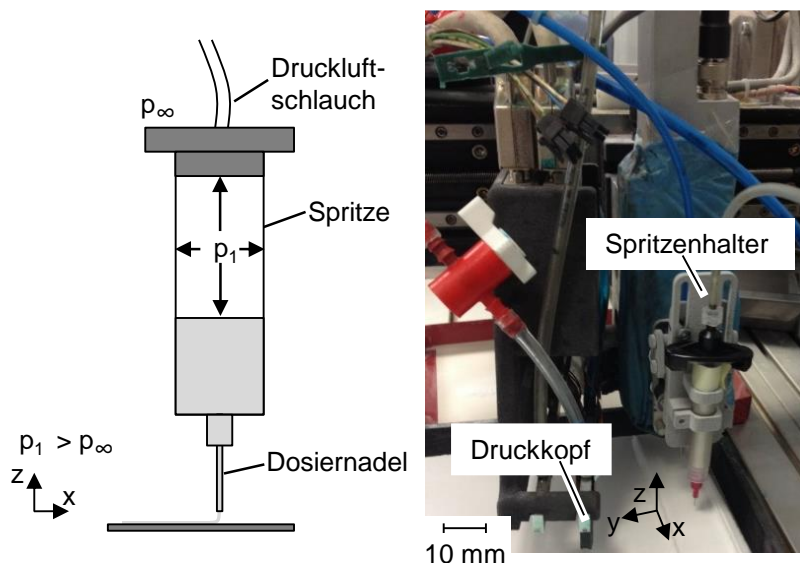


Abbildung 4-8: Funktionsprinzip eines Druckluftdispensers (links) und in einer Versuchsanlage integrierter Prototyp (rechts)

Ausgewählt wurde der Leitklebstoff EPO-TEK® E4110 der Firma *EPOXY TECHNOLOGY Inc.*, ein Zwei-Komponenten-Klebstoff mit einer dynamischen Viskosität  $\geq 800$  mPas und einer Partikelgröße  $\leq 45$   $\mu\text{m}$ . Ausschlaggebend für die Wahl dieses Leitklebstoffs war dessen Eigenschaft, auch bei Raumtemperatur auszuhärten. Dies dauert laut Hersteller drei Tage. Der spezifische elektrische Widerstand ist anschließend  $\leq 90$   $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Eine thermische Behandlung (vgl. Anhang Abschnitt 10.1) des Leitklebstoffs bei  $60$   $^\circ\text{C}$  reduziert die Sinterzeit auf sechs Stunden und verringert den Widerstandswert auf  $\leq 5$   $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  (EPOXY TECHNOLOGY INC. 2015).

Für den manuellen Auftrag wurde der Leitklebstoff mithilfe eines Druckluftdispensers 1000XL der Firma *EDF* verarbeitet. Für die Versuche wurde eine Dosiernadel F560090-1/4 der Firma *Vieweg GmbH* mit einem Innendurchmesser von  $0,41$  mm und einem Außendurchmesser von  $0,71$  mm eingesetzt. Erste, auf einem Grünling aufgetragene Leiterbahnen wiesen nach der Aushärtung bereits gute

elektrische Eigenschaften auf, wengleich die Form der Leiterbahn aufgrund des manuellen Auftrags sehr inhomogen war.

Für den Einsatz des Druckluftdispensers in der Versuchsanlage wurde diese zunächst mit einem in der Höhe verstellbaren Spritzenhalter erweitert (vgl. Abbildung 4-8 rechts). Eine Kollision der Dosiernadel mit Komponenten der Anlage während des additiven Aufbauprozesses wurde dadurch vermieden. Der Halter wurde neben dem Druckkopf an die y-Achse montiert, was die Positionierung des Moduls auf dem Baufeld mithilfe der x- und y-Achse der Anlage nicht einschränkte. Der Abstand zwischen der Dosiernadel und dem Pulverbett betrug bei der Leiterbahnerzeugung 0,3 mm. Parallel zur Erhöhung des Drucks in der Spritze musste für die Erzeugung von Leiterbahnen zusätzlich eine Anlagenachse translatorisch verfahren werden. Der bei Vorversuchen ermittelte elektrische Widerstand der Leiterbahnen auf einer PA-12-Platte sank bei Raumtemperatur mit zunehmender Aushärtedauer bis zu einem minimalen Wert von 0,53  $\Omega$ , gemessen an einer Leiterbahnlänge von 10 mm und einem berechneten Leiterbahnquerschnitt von ca. 0,318 mm<sup>2</sup> (5 mm/s Verfahrensgeschwindigkeit der Anlagenachse und 2 bar Überdruck in der Spritze). Daraus berechnet sich ein spezifischer Widerstand von 16,99  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Eine weitere Verringerung des elektrischen Widerstandes dieser Probe auf einen Wert von 0,32  $\Omega$  (spezifischer Widerstand von 10,17  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) ergab sich erst nach einer thermischen Behandlung im Ofen bei 60 °C über sechs Stunden hinweg.

Generell kam es bei den elektrischen Leiterbahnen zu starken Schwankungen des gemessenen Widerstandswertes. Eine nähere Untersuchung des Gefüges durch einen zur Oberfläche des Probekörpers parallelen Schnitt durch den Leitklebstoff verdeutlichte, dass sich insbesondere in den breiten Leiterbahnen viele Lufteinschlüsse befanden. Eine mögliche Erklärung dafür sind Luftblasen, die durch den Mischvorgang der beiden Komponenten des Leitklebstoffs oder durch den Druckluftdispenser ins Material eingebracht worden sein könnten.

Die während des Aufbauprozesses auf ein feuchtes Pulverbett aufgetragenen elektrischen Leiterbahnen wurden nach einer Verweildauer von 24 Stunden im Pulverbett über vier Stunden hinweg einem Ofenprozess bei 40 °C unterzogen. Den Querschnitt eines so erzeugten Probekörpers stellt Abbildung 4-9 dar. Wie anhand der Fluidsimulation am Beispiel eines REVs prognostiziert (vgl. Abbildung 4-6), kommt es aufgrund der hohen Viskosität des Leitklebstoffs zu keinem Einsickern des Materials in das Pulverbett. Der Leitklebstoff bleibt auf der Oberfläche des Probekörpers liegen.

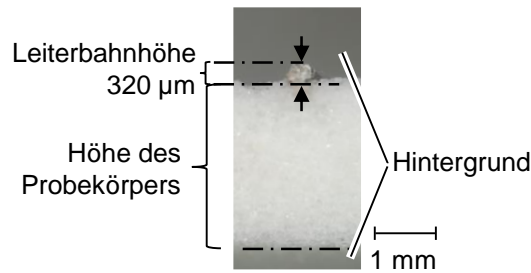


Abbildung 4-9: Querschnitt eines Probekörpers mit gedruckter Leiterbahn aus Leitklebstoff

Eine optische Vermessung ergab eine Leiterbahnhöhe von 0,32 mm, was über der Höhe einer Pulverschicht liegt. Dies hat zur Folge, dass noch nicht ausgehärteter Leitklebstoff bei der Erzeugung der nächsten Pulverschicht durch einen Beschichterkontakt bzw. aufgrund einer mechanischen Krafteinwirkung durch das abgelegte Pulver beeinflusst wird. Neben einer Deformation der Leiterbahnen kann es zudem zu einer Verunreinigung des Beschichters (Rakel) mit Klebstoff kommen, was die folgenden Prozessschritte stören kann.

### 4.2.3.3 Ergebnis

Mithilfe einer CFD-Simulation wurde zunächst das Verhalten von zwei unterschiedlichen leitfähigen Materialien auf einer zufallsgenerierten Pulverschüttung untersucht. Anschließend wurde anhand einer experimentellen Versuchsreihe das Verhalten beider Materialien auf einer Pulverbettoberfläche analysiert. Zudem wurden die dadurch erreichbaren elektrischen Widerstände und Abmessungen der Leiterbahnen ermittelt.

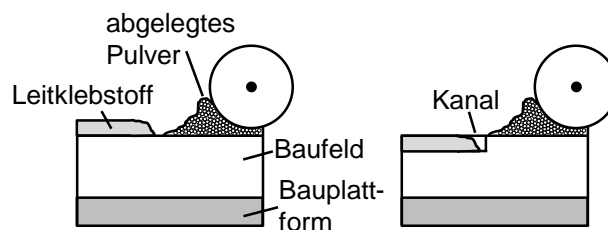
Obwohl es sich bei den Versuchen um keine Validierung des Simulationsmodells handelte, zeigten sowohl die Simulationsergebnisse als auch die Experimente, dass für die Erzeugung von elektrisch leitenden Strukturen auf einem porösen Pulverbett mit definierten geometrischen Abmessungen hochviskose Flüssigkeiten verwendet werden müssen. Das Simulationsmodell kann somit als Werkzeug zur Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher Flüssigkeiten auf einem Pulverbett eingesetzt werden, um bereits im Vorfeld erste Anhaltspunkte bezüglich des Materialverhaltens zu gewinnen.

Eine Verarbeitung hochviskoser Flüssigkeiten durch den in der Versuchsanlage integrierten Druckkopf ist nicht möglich, weswegen zur Zielerreichung in dieser Arbeit ein zusätzliches Modul in den 3D-Drucker implementiert werden musste. Weiterhin galt es zu untersuchen, inwieweit mit diesem Material dreidimensionale Leiterbahnen erzeugt und wie elektrische Komponenten ankontaktiert werden

könnten. Aussagen über die elektrische Leitfähigkeit können wegen der prototypischen Umsetzung noch nicht endgültig getroffen werden, die Vorversuche zeigen jedoch bereits vielversprechende Ergebnisse. Zur Vermeidung eines Kontakts zwischen dem Beschichter bzw. dem Pulver und dem Leitklebstoff muss das leitfähige Material ins Pulverbett eingebettet werden. Ein entsprechendes Konzept wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

### 4.2.4 Konzept zur Erzeugung von Vertiefungen im Pulverbett

Die Integration der Leiterbahnen und elektrischen Komponenten in das Pulverbett kann durch die Erzeugung von Kavitäten und Kanälen erfolgen. Ein Kanal wird als eine Vertiefung im Pulverbett definiert, die deutlich länger als breit ist und somit für die Integration von elektrischen Leiterbahnen eingesetzt werden kann, wohingegen bei einer Kavität das Seitenverhältnis Länge zu Breite meistens unter 2:1 liegt. Abbildung 4-10 zeigt neben einer Ablage des Leitklebstoffs auf dem Pulverbett das Konzept, bei dem die Leiterbahn in das Pulverbett integriert ist und somit ein Kontakt zwischen dem Beschichter und dem Leitklebstoff vermieden wird.



*Abbildung 4-10: Leiterbahn auf der Pulverbettoberfläche (links) und Konzept des Kanals (rechts) zur Vermeidung einer Beeinflussung der integrierten elektrischen Leiterbahnen*

Neben der Vermeidung einer Beeinflussung des Leitklebstoffs durch den Beschichter hat die Abgabe von Leitklebstoff in Kanälen nach GUTIERREZ ET AL. (2011) weitere Vorteile. So ist der Einsatz eines Leitklebstoffs mit einer dynamischen Viskosität, die zu einem Zerfließen des Materials nach dem Auftrag führt, möglich. Die Kanäle bilden eine Form, die die geometrischen Abmessungen der Leiterbahn definiert. Es können mehrere Leiterbahnen dicht nebeneinander erzeugt werden, da durch den Steg eine Isolierung vorhanden ist.

Für die Umsetzung des dargestellten Konzepts bedarf es eines zusätzlichen Prozessschrittes zur Erzeugung von Vertiefungen während des additiven Aufbaupro-

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

---

zesses. Zur Identifikation von möglichen Lösungsansätzen hierfür wurden bestehende Lösungen gemäß Kapitel 3, Stand der Forschung und Technik, gesammelt sowie unterschiedliche physikalische Wirkprinzipien hinsichtlich ihrer möglichen Anwendung untersucht.

Lösungen, die auf mechanischen Ansätzen basieren (z. B. einem Fräsprozess), wurden aufgrund der damit verbundenen Beeinflussung des Pulverbetts (vgl. Tabelle 4-1, Anforderung A8) sowie der dadurch verursachten Pulverrückstände ausgeschlossen. Ansätze, die ein Fixieren des Pulvers in der Vertiefung (z. B. durch Adhäsive) vor dem eigentlichen Entfernungsprozess vorsehen, um das fixierte Pulver dann als Ganzes zu entnehmen, wurden aufgrund der dafür notwendigen langen Prozesszeit und des Umsetzungsaufwandes für eine präzise Verfestigung des Pulvers ebenfalls verworfen. Ein Aufschmelzen bzw. Verdampfen des Pulverwerkstoffes durch eine thermische Behandlung würde die Handhabung vereinfachen. Jedoch würde es aufgrund der hohen Temperaturen zu einer Erwärmung des umliegenden Pulvers kommen, wodurch der chemische Verfestigungsprozess beschleunigt und somit die Anbindung zur Folgeschicht beeinträchtigt werden würde (vgl. Tabelle 4-1, Anforderung A7). Ein Transport des Pulvers durch Wirkkräfte wie die elektrostatische Anziehung und van-der-Waals-Kräfte ist theoretisch möglich. Aufwand und Bearbeitungszeit für die Entfernung des Pulvers sind dabei jedoch sehr hoch anzusetzen, wodurch es ebenfalls zu einer Beeinflussung des Verfestigungsprozesses und somit zu veränderten Bauteileigenschaften kommen würde (vgl. Tabelle 4-1, Anforderung A7).

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Vertiefungen im Pulverbett ist die Entfernung des Pulvers durch ein strömendes Medium, z. B. Druckluft. Eine Bearbeitung der Vertiefungen durch die Erzeugung eines Überdrucks würde jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Zerstörung des Bauteils und des Pulverbetts führen. Die Erzeugung eines Unterdrucks ist hingegen ein Ansatz, der die Anforderungen erfüllen kann. Zudem ist der Transport von pulverförmigen Medien über eine Flugförderung ein probates Verfahren, da das Fördergut in einem geschlossenen System gehandhabt werden kann (KRAUME 2012). Flugförderer gehören zur Klasse der Dünnstromförderer, bei denen das Medium unter Einsatz einer hohen Gasgeschwindigkeit durch das System gesaugt wird (GROTE & FELDHUSEN 2011). Aufgrund der formlabilen Struktur des Bauteils im Pulverbett ist jedoch eine großflächige Absaugung des Pulvermaterials ohne eine Beschädigung des gedruckten Bauteils nicht möglich (vgl. Tabelle 4-1, Anforderung A2). Deshalb wird ein neuer Ansatz zur definierten Entfernung des Pulvermaterials benötigt.

Für einen Vorversuch zur lokalen Entfernung des Pulvermaterials wurde ein Vakuumerzeuger VAD 1/4 der Firma *Festo AG & Co. KG* mit Unterdruckschläuchen



## 4.2 Integration von elektrischen Leiterbahnen

an die im Versuchsfeld vorhandene Druckluftleitung angeschlossen und in die Versuchsanlage integriert. Der Unterdruck wird über ein Magnetventil (Festo MHE2-M1H-3/2G-QS4) gesteuert, als Werkzeug zum definierten Absaugen der Pulverkörner wurde eine Dosiernadel TE714150PK der Firma *Oki Metcal* mit einem Innendurchmesser von 1,6 mm eingesetzt. Damit der Vakuumerzeuger nicht vom abgesaugten Pulver verunreinigt wird, wurde ein Pulverabscheider zwischen Unterdruckerzeuger und Dosiernadel vorgesehen. Das pneumatische Schaltbild des Versuchsaufbaus kann Abbildung 4-11 entnommen werden.

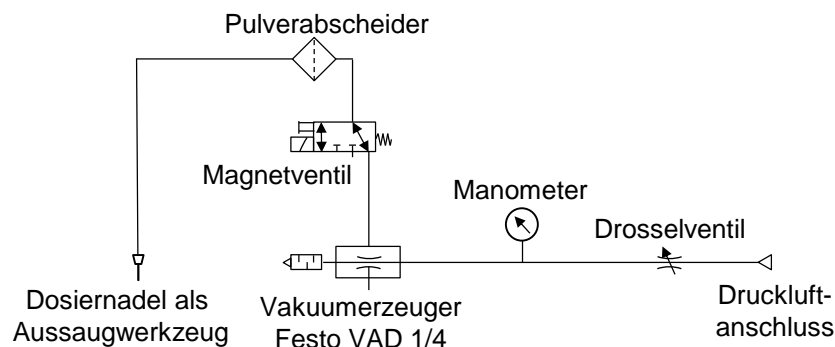


Abbildung 4-11: Pneumatisches Schaltbild des Versuchsaufbaus

Die Dosiernadel wurde zunächst in mit Binder bedrucktes Material eingetaucht. Je nach Dauer zwischen dem Benetzen des Pulvers mit Binder und der Bearbeitung des Pulverbetts mit dem Unterdrucksystem kommt es entweder zu einer teilweisen oder zu keiner Entfernung der Pulverkörner. Das mit Binder benetzte Pulver blieb im Unterdruckschlauch hängen und polymerisierte, was letztlich zu dessen Verschluss führte.

In einem zweiten Versuch wurde der Bereich der Kavität nicht mit Binder bedruckt und das binderfreie Pulver anschließend mit der Nadel entfernt. Dies führte zu durchgehend guten Ergebnissen (vgl. Abbildung 4-12).

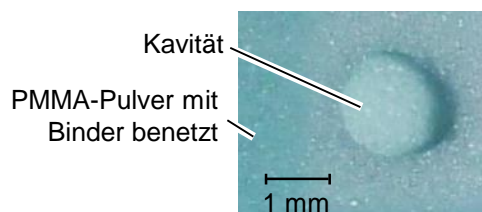


Abbildung 4-12: Vorversuch zum Entfernen des Pulvers aus einer Vertiefung mit Unterdruck

Ein Nachrutschen der Pulverkörner von den Wänden wurde nicht beobachtet. Der Binder im Randbereich der Kavität scheint in dieser Zeit das Pulvermaterial ausreichend zu fixieren.

Die Versuchsreihe verdeutlicht, dass die gewählte Methode zum Entfernen des Pulvermaterials geeignet ist. Zur Vermeidung eines Verschlusses des Unterdruckschlauches durch polymerisierendes Pulver gilt es, das zu entfernende Pulver nicht mit Binder zu bedrucken. Aufgrund der runden Form des Aussaugwerkzeuges (Dosiernadel) weisen die Vertiefungen abgerundete Ecken auf. Eine genaue Untersuchung der Abmessungen der Kavitäten mit einem verbesserten Versuchsaufbau wird in Abschnitt 6.4.1 beschrieben.

### 4.2.5 Prozess zur Erstellung von dreidimensionalen Leiterbahnen

Neben der Erzeugung von zweidimensionalen Leiterbahnen ist ein weiteres Ziel die Erstellung von dreidimensionalen Leiterbahnen während des Aufbauprozesses. Dies erfordert die vertikale Verbindung zweier horizontaler Leiterbahnen auf unterschiedlichen Schichtebenen mit leitfähigem Material.

Zur Erstellung der vertikalen Leiterbahnen wurden zwei unterschiedliche Methoden näher betrachtet. Diese wurden zunächst im Rahmen von Vorversuchen prototypisch umgesetzt, eine detaillierte Betrachtung der geometrischen Abmessungen erfolgt zu diesem Zeitpunkt nicht. Zur Vereinfachung des Prozessschrittes der Ankontaktierung wurden die innenliegenden horizontalen Leiterbahnen mit einer Breite von 1,2 mm angefertigt. Aufgrund der für die Erzeugung der Leiterbahn benötigten Prozesszeit kommt es zu einer Verflüchtigung des Bindermaterials und damit zu einer unzureichenden Anbindung der Folgeschicht. Zum Ausgleich des verdampften Materials wurde daher die folgende Pulverschicht mit der doppelten Bindermenge bedruckt.

In Prozessvariante 1 werden die Kavitäten mithilfe des Unterdrucksystems erzeugt und anschließend mit Leitklebstoff gefüllt (vgl. Abbildung 4-13). Eine experimentelle Untersuchung ergab, dass die noch nicht ausgehärteten horizontalen Leiterbahnen durch den anliegenden Unterdruck an dem Aussaugwerkzeug mit angesaugt wurden, was zu einer Unterbrechung der Leiterbahn und zum Verstopfen des Unterdrucksystems führt. Durch die Integration eines Festkörpers (Blechstreifen) konnte dies verhindert werden (vgl. Abbildung 4-13). Nach dem Füllen des Kanals mit leitfähigem Material kam es zu einem Einsickern des Leitklebstoffs in einen Hohlraum oberhalb des Blechstreifens. Diese Hinterschneidungen können durch den Prozessschritt der Pulverentfernung entstehen, indem nicht nur das Pulver aus

dem vertikalen, sondern auch das nicht mit Binder benetzte Pulver aus dem horizontalen Kanal entfernt wird. Dies vergrößert die Fläche zwischen dem Leitklebstoff und dem Festkörper, führt jedoch zu einer undefinierten Ausprägung der Kontaktstellen sowie zu einer trichterförmigen Öffnung an der Werkstückoberseite durch das Nachfließen des Leitklebstoffs.

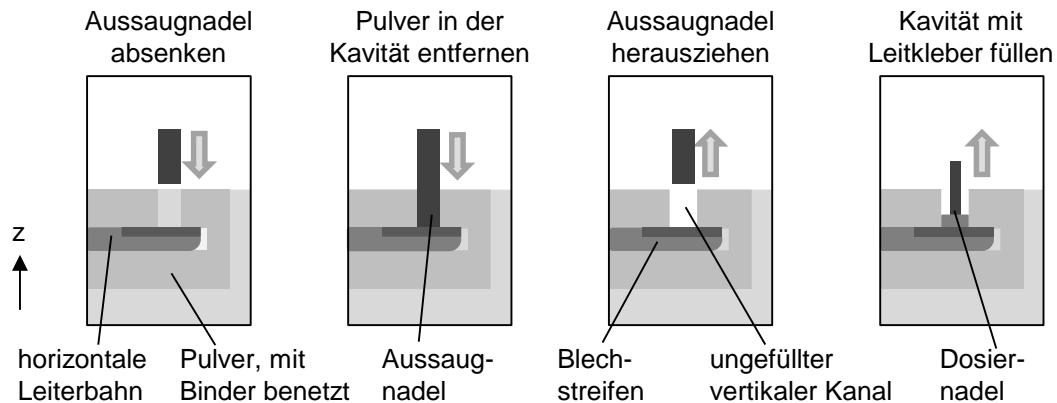


Abbildung 4-13: Prozessvariante 1 zur Erstellung von vertikalen Leiterbahnen

Prozessvariante 2 sieht die direkte Erzeugung der vertikalen Leiterbahn mithilfe des Multimaterialmoduls vor. Bei noch nicht vollständig verfestigtem Bauteil kann die Dosiernadel in das Pulverbett eingestochen werden. Das Pulver wird dabei von der Nadel verdrängt. Nach Erreichen der horizontalen Leiterbahn wird die Dosiernadel wieder herausgezogen und es wird dabei kontinuierlich leitfähiges Material abgegeben.

Erste experimentelle Untersuchungen hierzu wurden mit einer Dosiernadel mit einem Außendurchmesser von 0,71 mm und einem Innendurchmesser von 0,41 mm durchgeführt. Das Multimaterialmodul (vgl. Abbildung 4-8) wurde dazu an eine zusätzlich in die Versuchsanlage integrierte Linearachse montiert. Da die Verfahrensgeschwindigkeit der Achse zu schnell für eine gleichmäßige Materialabgabe war, wurde für die Vorversuche die z-Achse schrittweise angehoben und zwischen jedem Schritt Leitklebstoff mit einem Druckstoß von 3 bar abgegeben. Die Enden der vertikalen Bahnen auf der Bauteiloberfläche bildeten gleichzeitig die Ankontaktierungspunkte für die spätere elektrische Widerstandsmessung.

Die 4-Punkt-Widerstandsmessungen der Leiterbahnen ergaben bei zwei von drei Bahnen eine messbare Leitfähigkeit. Eine Betrachtung der offengelegten Struktur der nicht leitenden Probe mithilfe eines Auflichtmikroskops zeigte, dass sich zwischen der horizontalen und der vertikalen Leiterbahn eine isolierende Schicht PMMA befand (siehe schwarze Umrandung in Abbildung 4-14). Die isolierende

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Schicht entstand durch den Einstechvorgang (vgl. Abbildung 4-15). Die für die Kanalerstellung verwendete Dosiernadel des Multimaterialmoduls besitzt ein flaches Ende und ist beim Einsatz mit Leitklebstoff gefüllt. Bei Kontakt der Nadelspitze mit der Pulverbett-oberfläche haften die Pulverkörner an und werden anschließend durch den Einstechvorgang in die horizontale Leiterbahn befördert (vgl. Abbildung 4-15), wo sich je nach Menge an Pulvermaterial eine isolierende Schicht ausbilden kann. Eine elektrische Leitfähigkeit zwischen den beiden Kontaktpunkten konnte daher nicht gemessen werden.

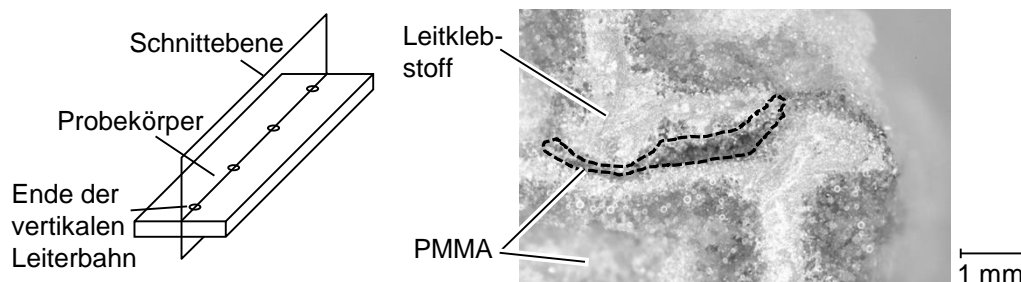


Abbildung 4-14: Schematische Darstellung des Probekörpers und der Schnittebene (links); optische Aufnahme des Probekörpers mit PMMA-Schicht zwischen der vertikalen und der horizontalen Leiterbahn (rechts)

Da diese Schicht den elektrischen Widerstand erhöht und eine prozesssichere Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen verhindert, sieht ein angepasstes Verfahren das Einstechen der Dosiernadel bis unterhalb der horizontalen Leiterbahn vor. Aufgrund der Aushärtedauer des Leitklebstoffs von 24 Stunden ist ein Durchdringen der horizontalen Leiterbahn möglich. Anschließend kann mit der Abgabe des leitfähigen Materials während des Herausziehvorgangs begonnen werden. Mit diesem Vorgehen kann gewährleistet werden, dass die Pulverpartikel an der Nadelspitze unterhalb der horizontalen Struktur liegen und somit keinen Einfluss auf die dreidimensionale Leiterbahnstruktur haben (vgl. Abbildung 4-15).

Die erzeugten dreidimensionalen Leiterbahnen waren ohne einen fehlerhaften Knotenpunkt. Die 4-Punkt-Widerstandsmessung ergab einen gemittelten elektrischen Widerstand von ca.  $0,065 \Omega$  bei einer Messlänge von 10 mm. Die genaue Untersuchung von dreidimensionalen Leiterbahnen mit einem verbesserten Versuchsaufbau wird in Abschnitt 6.3.2 erläutert.

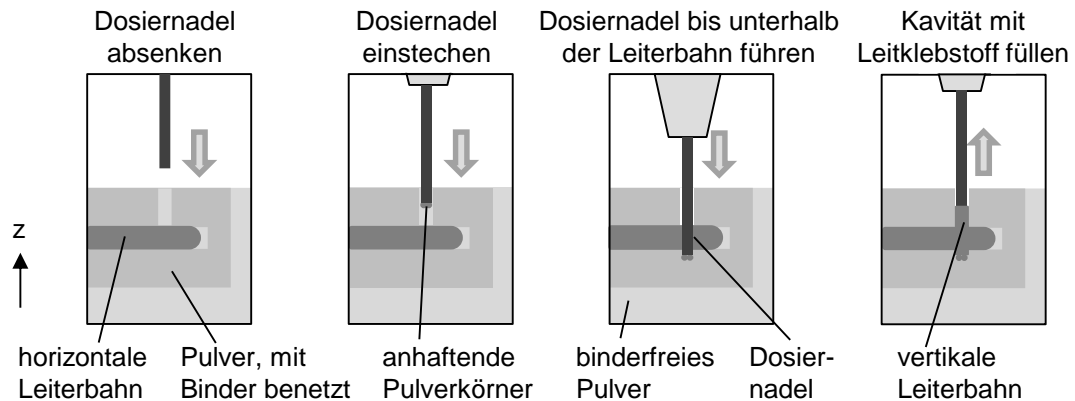


Abbildung 4-15: Adaptierter Prozess zur Erzeugung vertikaler Leiterbahnen mithilfe des Multimaterialmoduls

### 4.2.6 Eignung des Leitklebstoffs für die Ankontaktierung

Ein Vorteil des Leitklebstoffs als Verbindungsmaterial liegt in dessen hoher Elastizität, was die dynamische Belastbarkeit erhöht. Ein Nachteil ist seine schlechtere elektrische Leitfähigkeit im Vergleich zu Lötendraht oder Pasten, die wiederum eine thermische Behandlung benötigen, womit Anforderung (A7) nicht mehr erfüllt werden kann. Deshalb wird der Nachteil einer schlechteren elektrischen Leitfähigkeit toleriert und eine Ankontaktierung mithilfe eines Leitklebstoffs näher untersucht. Somit ist beim Einsatz des Leitklebstoffs kein zusätzliches Modul zum Einbringen eines weiteren Materials während des Prozesses notwendig, wodurch sich der Gesamtprozess zur Erzeugung einer elektrischen Schaltung vereinfacht.

Das Ergebnis von Vorversuchen zum Ankontaktieren zweier unterschiedlicher Bauformen von elektrischen Komponenten an eine Leiterbahn aus Leitklebstoff zeigt Abbildung 4-16.

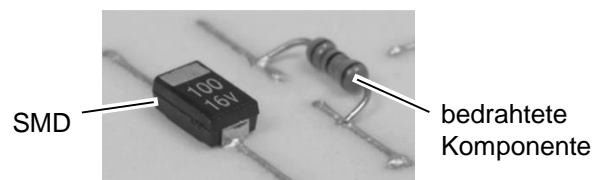


Abbildung 4-16: Bedrahtete Komponente und SMD an einer Leiterbahn aus Leitklebstoff

Die horizontalen Leiterbahnen wurden auf einem Probekörper (Werkstoff: PA12) erzeugt und die elektrischen Komponenten manuell aufgebracht. Nach einem

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Sinterprozess konnte bei beiden Bauarten eine elektrische Anbindung nachgewiesen werden.

### 4.2.7 Erweiterter Prozess

Im Folgenden wird der neue Prozess zur Integration von zwei- und dreidimensionalen elektrischen Leiterbahnen als Erweiterung des bestehenden 3D-Druckprozesses dargestellt (vgl. Abbildung 4-17).

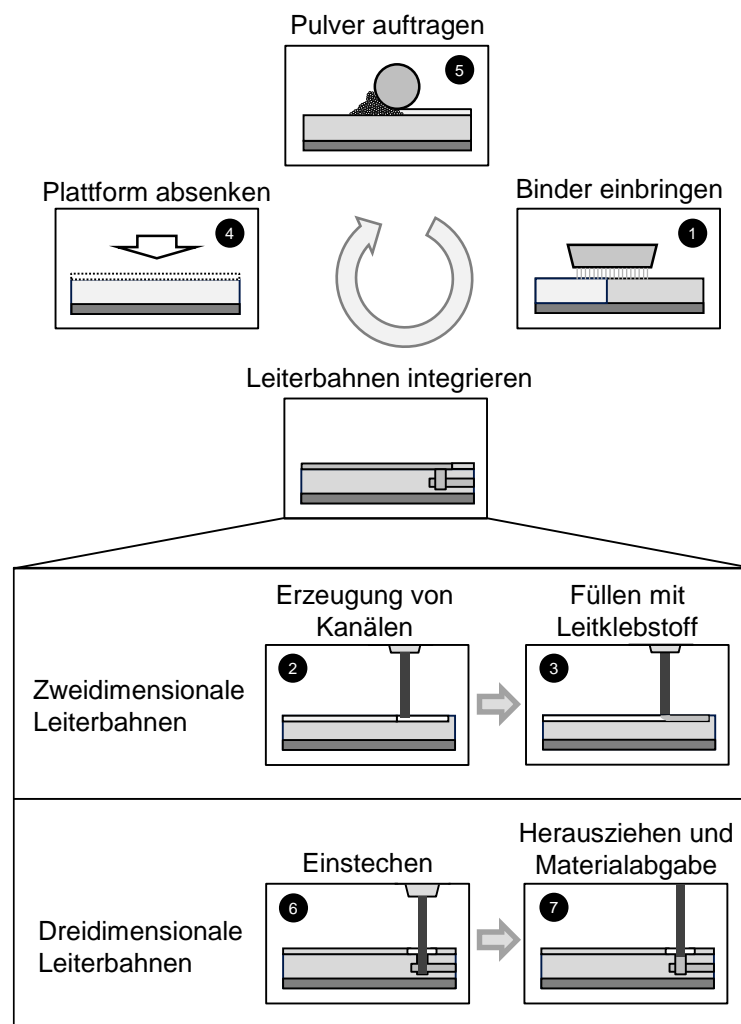


Abbildung 4-17: Prozessmodell zur Erstellung von zwei- und dreidimensionalen Leiterbahnen

### Zweidimensionale Leiterbahnen

Nach der Abgabe des Binders auf die Pulverschicht (1), in der eine Leiterbahn erzeugt werden soll, wird mithilfe eines Unterdrucksystems das Pulvermaterial lokal aus dem Pulverbett entfernt (2). Die Bereiche werden zuvor nicht mit Binder benetzt. Dies vereinfacht die Pulverentfernung und vermeidet ein Verstopfen des Unterdrucksystems durch polymerisierende Pulverkörner. Die Kanäle werden anschließend mithilfe eines weiteren Moduls zur Verarbeitung von hochviskosen Fluiden mit leitfähigem Material gefüllt (3). Die Breite der Kanäle definiert dabei auch die maximale Breite der Leiterbahn. Anschließend wird eine neue Pulverschicht erzeugt (4 und 5) und der additive Aufbauprozess fortgesetzt.

### Dreidimensionale Leiterbahnen

Für die Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen werden zunächst die Schritte bis zur Kanalerzeugung (2) durchgeführt. Anschließend wird die Dosiernadel des Multimaterialmoduls in das Pulverbett eingestochen (6) und die Spitze bis unterhalb der bereits ins Pulverbett integrierten horizontalen Leiterbahn positioniert. Durch das Herausziehen der Nadel bei gleichzeitiger Abgabe von leitfähigem Material (7) werden die vertikalen Leiterbahnen bis zur aktuellen Schicht erzeugt. Die Materialabgabe kann für die Erzeugung von horizontalen Leiterbahnen (3) direkt im Anschluss fortgesetzt werden.

## 4.3 Integration von elektrischen Komponenten

### 4.3.1 Vorgehensweise

Für den Teilbereich *Integration von elektrischen Komponenten* muss zunächst festgelegt werden, welche Bauform der elektrischen Komponenten eingesetzt werden soll (vgl. Abschnitt 4.3.2). In Abhängigkeit davon wird der Subprozess zur Integration der Komponenten während des Aufbauprozesses erarbeitet (vgl. Abschnitt 4.3.3). Dazu wird ein Konzept zur *Handhabung der Komponenten* (vgl. Abschnitt 4.3.4) sowie ein weiterer Subprozess zur *Ankontaktierung der Komponenten* (Abschnitt 4.3.5) an die elektrische Leiterbahn benötigt. Die Prozessschritte des erweiterten 3D-Druckprozesses werden in einem erweiterten Prozessmodell dargestellt (vgl. Abschnitt 4.3.6).

### 4.3.2 Auswahl der elektrischen Komponenten

Wie bereits in Abschnitt 2.8.4 beschrieben, existieren drei unterschiedliche Formen von elektrischen Komponenten. Der Einsatz bedrahteter Komponenten ist bei

entsprechender Auslegung der Kavität trotz der fehlenden Vorkehrungen zum Fixieren der Drahtenden möglich. Aufgrund des vereinfachten Aufbaus mit einem regelmäßigen Grundkörper und den definierten Verbindungsstellen ergibt sich durch den Einsatz von SMDs eine Vielzahl an Vorteilen, weshalb sich diese Bauform als industrieller Standard etabliert hat. Neben dem geringeren Raumbedarf für die Ankontaktierung gestaltet sich die automatisierte Handhabung der Komponenten im Vergleich zu bedrahteten Komponenten einfacher. Zudem sind die meisten Arten von elektrischen Bauelementen (Widerstände, Kondensatoren, Transistoren etc.) als SMDs erhältlich. Daher werden für die weiteren Untersuchungen SMDs betrachtet.

### 4.3.3 Prozess zur Integration von elektrischen Komponenten

SMDs sind in den unterschiedlichsten Abmessungen erhältlich. Die Bezeichnung der Komponenten richtet sich nach dem EIA-Standard (Electronic Industries Alliance-Standard) und beschreibt die Größe (Länge und Breite) der Komponente in Zoll (STINY 2007). So reicht z. B. die Auswahl der elektrischen Widerstände von einer Länge von 0,4 mm und einer Breite von 0,2 mm (EIA-Bezeichnung: 01005) bis zu einer Länge von 19,1 mm und einer Breite von 16,5 mm (EIA-Bezeichnung 7565). Fertigungsbedingt können die Abmessungen der Komponenten Abweichungen von bis zu 10 % vom Nennmaß aufweisen (STINY 2007).

Ausgehend von den Recherchen über die verschiedenen elektrischen Bauelemente lässt sich folgern, dass für die Integration von SMDs während des 3D-Druckprozesses vergleichbare Herausforderungen wie bei der Erstellung von Leiterbahnen existieren. Die Bauteilhöhe der kleinsten elektrischen Widerstände (EIA: 01005) beträgt 130  $\mu\text{m}$  und ist damit geringer als die beim kunststoffbasierten 3D-Druckprozess üblicherweise verwendete Schichthöhe von 150  $\mu\text{m}$ . Aufgrund der geringen geometrischen Abmessungen der Komponenten sowie einer mangelnden Fixierungsmöglichkeit auf dem Pulverbett kann bei der Verwendung der 01005-Komponenten davon ausgegangen werden, dass die von der Walze verursachte Pulverbewegung zu einer Verschiebung der Komponente führt. Bereits die nächstgrößere Bauform hat eine Höhe von ca. 270  $\mu\text{m}$ , was bei einer Positionierung auf dem Pulverbett zu einem Kontakt zwischen dem Beschichter und der elektrischen Komponente während der Erzeugung der Pulverschicht führen würde. Daher müssen zur Integration von SMDs während des additiven Aufbauprozesses die Komponenten unterhalb der aktuellen Pulverschicht positioniert werden. Dazu kann das in Abschnitt 4.2.4 entwickelte Konzept zur Erzeugung von Kavitäten eingesetzt werden, in die in einem Folgeschritt die elektrischen Komponenten ein-



## 4.3 Integration von elektrischen Komponenten

gelegt werden. Voruntersuchungen ergaben, dass wegen der bestehenden Fertigungstoleranz des Druckprozesses die Kavitäten größer erzeugt werden müssen, um einen Kontakt zwischen ihrer Wand und der elektrischen Komponente zu vermeiden. Der dadurch erzeugte Spalt (vgl. Abbildung 4-18) wird durch den Folgeschritt der Schichtaufbringung wieder mit losem Pulver gefüllt. Das SMD wird somit vollständig mit Pulver umschlossen. Der Nachteil der geringen mechanischen Belastbarkeit von SMDs auf Platinen ist daher irrelevant.

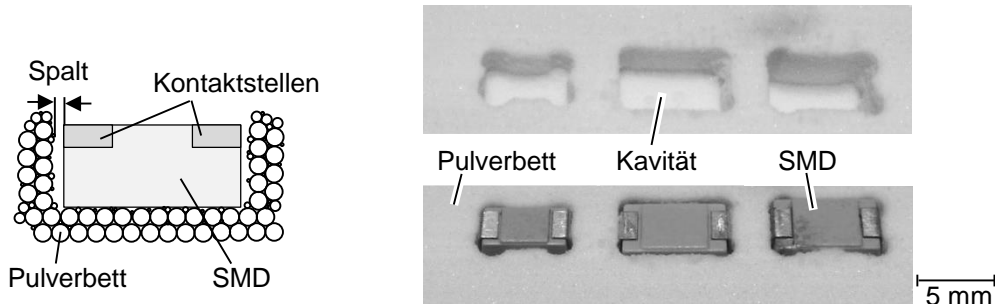


Abbildung 4-18: Voruntersuchung zur Integration von SMDs in Kavitäten in einem Pulverbett (rechts); Seitenansicht schematisch (links)

### 4.3.4 Konzept zur Handhabung von elektrischen Komponenten

Ziel des vorliegenden Abschnitts ist die Entwicklung eines Konzepts zur Handhabung von SMDs während des additiven Aufbauprozesses, um die elektrischen Komponenten von einer bestimmten Position in eine dafür vorgesehene Kavität im Pulverbett zu transportieren. Die Handhabung der Komponenten kann manuell oder über ein teil- bzw. vollautomatisiertes System erfolgen. Bei Vollautomatisierung muss die Komponente mithilfe eines Greifers an ein kinematisches Transportsystem fixiert werden. Die Vielzahl unterschiedlicher Greifer lässt sich anhand des physikalischen Wirkprinzips unterteilen (HESSE 2011). Eine so gegliederte Auswahl möglicher Greifsysteme zeigt folgende Aufzählung:

- Mechanische Greifer (Zangengreifer, Klemmgreifer, verhakende Greifer)
- Pneumatische Greifer (Überdruckgreifer)
- Pneumostatische/pneumodynamische Greifer (Vakuumsauger, Haftsauger, Luftstromgreifer)
- Elektrische Greifer (Magnetgreifer, elektrostatische Greifer)
- Adhäsive Greifer (Kapillargreifer, Gefriergreifer, Klebstoffgreifer)

Aus diesen Greifervarianten wurde zuerst eine Vorauswahl getroffen. Dabei wurden diese zunächst hinsichtlich ihrer Eignung für die Handhabung von SMDs

## **4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen**

---

beurteilt. Sämtliche Konzepte mit verhakendem Greifer sowie Gefriergreifer können wegen der Oberflächenbeschaffenheit der zu greifenden Komponenten ausgeschlossen werden. Weiterhin fallen innengreifende Systeme aufgrund der quaderförmigen Form der Komponenten ebenso wie elektrostatische Greifer wegen der teilweise isolierenden Eigenschaften einzelner Komponenten weg. Da die elektrischen Bauelemente in der Kavität nur eine von außen sichtbare Fläche haben, ist die Anzahl der Greifpunkte auf eine Seitenfläche beschränkt, was auch Klemmgreifer ausschließt.

Ausgewählt wurde das Prinzip des Vakuumgreifers. Seine Vorteile bestehen neben einer geringen notwendigen Greiffläche in der Erzeugung von hohen Greifkräften, einer einfachen Lösbarkeit des Greifkontaktes sowie der einfachen Umsetzung bei geringem Kostenaufwand. Ein weiterer Vorteil, der zur Entscheidung für den Vakuumgreifer geführt hat, ergibt sich aus den Erkenntnissen von Abschnitt 4.2.4, wo bereits ein Unterdrucksystem zur Entfernung von losen Pulverpartikeln zugrunde lag. Beide Systeme funktionieren nach dem gleichen Wirkprinzip, wodurch für den notwendigen Handhabungsprozess kein gesondertes Modul benötigt wird, sondern ein gemeinsames Modul für die Pulverentfernung und die Handhabung der SMDs eingesetzt werden kann.

Zum Fixieren bzw. Anheben eines einzelnen SMDs wurde das Modul aus Abschnitt 4.2.4 eingesetzt. Für die weitere Anwendung gilt es, ein Greifsystem entsprechend den Anforderungen aus Abschnitt 2.8 zu konzipieren.

### **4.3.5 Prozess zum Ankontaktieren an die Leiterbahn**

Aufgabe des Ankontaktierungsprozesses ist die Verbindung eines in ein Pulverbett eingebetteten SMDs mit einer elektrischen horizontalen Leiterbahn aus Leitklebstoff.

Unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse ergeben sich zwei mögliche Orientierungen, in denen ein SMD eingelegt werden kann; mit den Kontaktflächen nach unten (Face-down-Methode) oder mit den Kontakten nach oben zeigend (Face-up-Methode). Für beide Varianten wird in Abbildung 4-19 eine mögliche Vorgehensweise zur Ankontaktierung dargestellt.

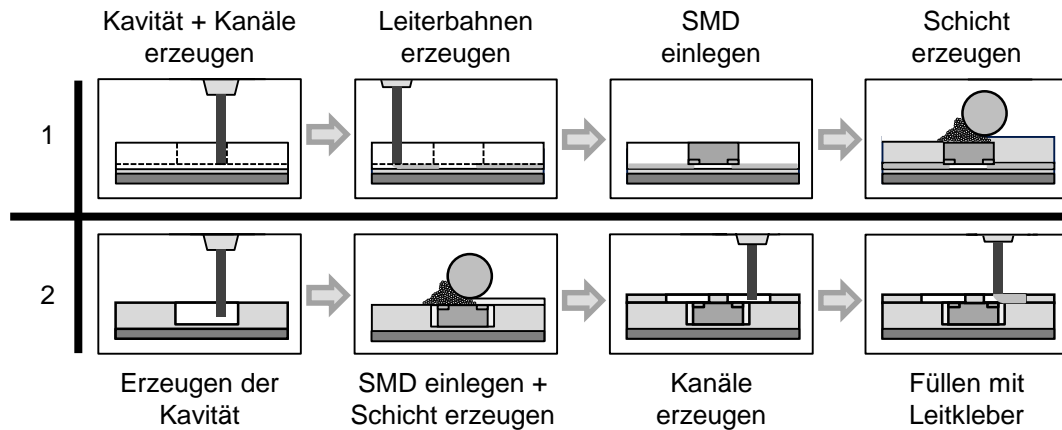


Abbildung 4-19: Möglichkeiten, SMDs in eine Kavität zu integrieren;  
1: Face-down-Methode, 2: Face-up-Methode

### Face-down-Methode (Variante 1)

Variante 1 erfordert zunächst die Erzeugung der Kavität und der Kanäle, in die sowohl die Leiterbahn eingebracht als auch das SMD (Kontaktflächen nach unten) in einem Prozessschritt eingelegt werden kann. Anschließend werden mithilfe des Beschichters die Vertiefungen mit Pulver aufgefüllt und der Druckvorgang fortgesetzt.

Der nicht mit Pulver gefüllte Bereich unterhalb des SMDs birgt das Risiko, dass der Leitklebstoff durch die Gewichtskraft der Komponente verdrängt wird, zusammenfließt und dadurch die elektrische Komponente überbrückt. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts wurden parallele Leiterbahnen in unterschiedlichen Abständen (1 mm, 2 mm, 3 mm und 3,5 mm) auf einem PMMA-Probekörper erzeugt und das SMD (Widerstand mit 2 k $\Omega$ ) einmal auf die Leiterbahnen abgelegt und einmal auf unterschiedliche Abstände (0,2 mm und 0 mm) zur Pulverbettsoberfläche abgesetzt. Dabei sollte untersucht werden, unter welchen Bedingungen ein Zusammenfließen des Leitklebstoffs stattfindet. Die Probekörper wurden bei 40 °C im Ofen thermisch nachbehandelt und anschließend mit einer 4-Punkt-Widerstandsmessung vermessen. Waren die Werte der Messung kleiner als der Wert des Widerstandes, konnte von einer Überbrückung (Kurzschluss) ausgegangen werden. Betrag der gemessene Widerstand ca. 2 k $\Omega$ , war die Kontaktierung erfolgreich. Die Ergebnisse des Versuchs werden in Tabelle 4-3 dargestellt.

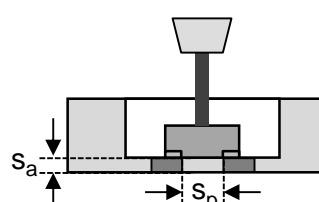
Ein weiteres Risiko bei Variante 1 besteht in der Erzeugung der Vertiefungen. Da sowohl die Leiterbahnen als auch die Komponenten auf der gleichen Ebene platziert werden, bedarf es vergleichsweise tiefer Kanäle, die anschließend wieder mit Pulver gefüllt werden müssen. Untersuchungen ergaben, dass es bei der Erzeugung von Kanälen ab einer Tiefe von 4,1 mm zu einer Verschiebung des gedruckten

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Bauteils im Pulverbett kommt (vgl. Analyse der Tiefe der Kanäle, Abschnitt 6.4.1.2). Eine mögliche Erklärung hierfür wird in Abschnitt 6.4.3.2 gegeben.

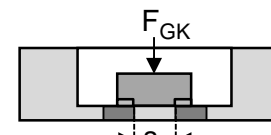
*Tabelle 4-3: Ergebnisse bezüglich des Zusammenfließens der Leiterbahnen in Abhängigkeit vom Abstand der parallelen Leiterbahnen; oben: Einstellen eines definierten Abstands zur Pulverbettoberfläche mithilfe einer Linearachse; unten: eine manuelle Ablage der Komponente auf der Leiterbahn unter Wirkung des reinen Eigengewichts (Gewichtskraft =  $F_{GK}$ )*

Ablegen eines SMDs auf definierten Abstand



Abstand der parallelen Leiterbahnen $s_p$	Abstand zum Boden der Kavität $s_a$	
	0,2 mm	0 mm
1 mm	X	X
2 mm	O	X
3 mm	O	O
3,5 mm	O	O

Manuelle Ablage unter Wirkung der Gewichtskraft ( $F_{GK}$ )



Abstand der parallelen Leiterbahnen $s_p$	$F_{GK}$
1 mm	X
2 mm	O
3 mm	O
3,5 mm	O

Legende:  
 X = Kurzschluss  
 O = erfolgreiche Kontaktierung

Aufgrund der genannten Risiken ist die Variante 1 nur bedingt für die Erzeugung von Verbindungen zwischen SMDs und Leiterbahnen während des Aufbauprozesses geeignet. Ein mögliches Einsatzfeld dieser Variante ist die Ankontaktierung von elektrischen Komponenten auf der Werkstückoberfläche.

### Face-up-Methode (Variante 2)

Bei Variante 2 wird mithilfe des Aussaugsystems zunächst eine Kavität erzeugt, in der anschließend das SMD mit den Kontaktflächen nach oben zeigend abgelegt wird. Die Kanäle für die Leiterbahnen werden separat in einer späteren Schicht erzeugt.

Der Spalt zwischen der elektrischen Komponente und dem Rand der Kavität ist dabei für die Qualität der Anbindung ausschlaggebend. Loses Pulver, das beim Schritt der Pulverbetterzeugung den Hohlraum füllt, wird im folgenden Druckprozess nicht mit Binder benetzt, wodurch das Risiko besteht, dass bei der Erzeugung der Kanäle für die horizontalen Leiterbahnen das Pulver im Spalt entfernt wird. Der so entstandene Graben kann dazu führen, dass der Leitklebstoff darin ein-

### 4.3 Integration von elektrischen Komponenten

ckert und dadurch eine Unterbrechung in der Leiterbahn entsteht. Der für den Einsatz der Komponenten minimal benötigte Spalt wird in Abschnitt 6.4.1.1 hergeleitet. Bei Einhaltung dieses Wertes konnte in den Versuchsreihen ein Absaugen der Pulverpartikel aus dem Hohlraum zwischen der Wand der Kavität und dem SMD vermieden werden.

Der additive Aufbauprozess wird nach dem Einlegen der elektrischen Komponente fortgesetzt und ggf. auf einer höheren Schicht erneut für die Erzeugung der Kanäle der Leiterbahnen unterbrochen. Der ermittelte Grenzwert der Aussaugtiefe bei der Kanalerzeugung von 4,1 mm kann durch die Beschränkung der Kanaltiefe auf maximal 2 mm unberücksichtigt bleiben.

Zur Gewährleistung einer guten Verbindung muss sichergestellt werden, dass keine Pulverrückstände auf den Kontaktflächen vorzufinden sind. Dazu wurde im Rahmen einer experimentellen Versuchsreihe die Nadelspitze schrittweise um 0,1 mm in das Pulverbett abgesenkt und das Pulvermaterial lokal entfernt. Der maximale Abstand zwischen der Aussaugnadel und der Kontaktfläche, bei dem die Pulverkörner nahezu vollständig entfernt werden konnten, wurde zu 0,2 mm ermittelt. Ein Probekörper mit einseitig freigelegten Kontaktflächen wird in Abbildung 4-20 dargestellt.

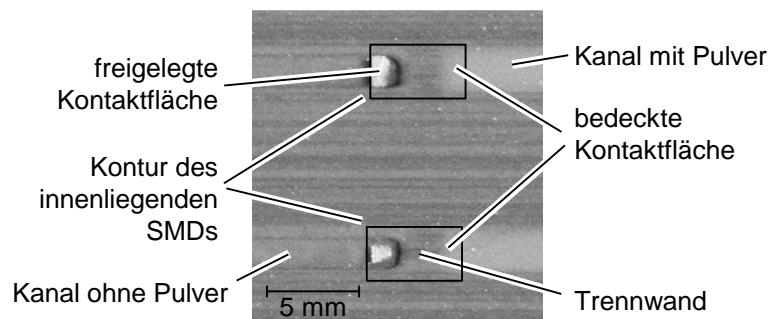


Abbildung 4-20: Eingelegte elektrische Komponenten mit freigelegten Kontaktflächen

Das leitfähige Material wird anschließend in die erzeugten Kanäle abgegeben. Um das Risiko eines Zusammenfließens des Leitklebstoffs zu unterbinden, wird zwischen den Kanälen auf dem SMD eine Trennwand von min. 1 mm Breite belassen. Zur Erhöhung der Stabilität wurde dieser Bereich beim Prozessschritt der Binderabgabe ebenfalls bedruckt. Die Umsetzbarkeit wurde durch Versuche belegt. Variante 2 ermöglicht somit die prozesssichere Ankontaktierung von elektrischen Komponenten an eine Leiterbahn während des additiven Aufbauprozesses.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Beide Varianten haben für die Erzeugung von komplexen Bauteilen mit elektrischen Schaltungen ein potenzielles Einsatzgebiet. Da der Fokus dieser Arbeit auf innenliegenden Strukturen liegt, wurde nur Variante 2 für die weiteren Untersuchungen weiterverfolgt.

### 4.3.6 Erweiterter Prozess

In Abbildung 4-21 ist der Prozess für die Erweiterung des 3D-Druckprozesses zur *Integration von elektrischen Komponenten* dargestellt.

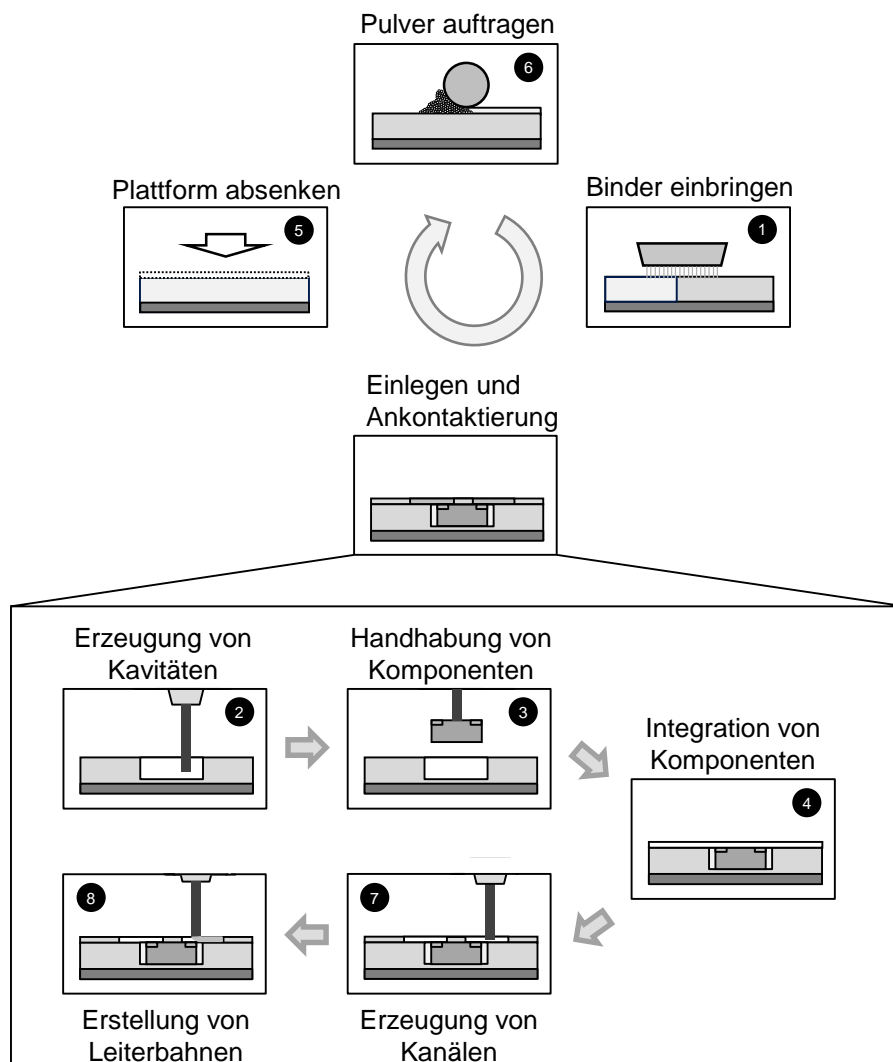


Abbildung 4-21: Prozessmodell zur Integration von SMDs sowie deren Ankontaktierung an die elektrische Leiterbahn unter Einsatz der Face-up-Methode

Die geometrischen Abmessungen der elektrischen Komponenten erfordern die Erzeugung von Kavitäten (2), in die die SMDs unter Einsatz eines Unterdruckmoduls eingelegt werden (3 und 4). Die Komponenten befinden sich unterhalb der obersten Pulverschicht, was die Erzeugung einer neuen Schicht ohne Beeinflussung der eingelegten Objekte ermöglicht (5 und 6). Zur Erzeugung einer elektrischen Ankontaktierung wurden zwei unterschiedliche Varianten erarbeitet und deren mögliches Einsatzfeld untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Erzeugung von Verbindungen nach dem Einlegen der Komponente die Prozesssicherheit steigert. Dazu werden mit dem Unterdruckmodul Kanäle bis zu den Kontaktflächen erzeugt (7) und diese im Anschluss mit Leitklebstoff gefüllt (8). Eine Trennwand zwischen den beiden Kontaktpunkten verhindert das Zusammenfließen des Leitklebstoffs und somit eine Überbrückung (Kurzschluss) der beiden Kontaktflächen jeder elektrischen Komponente. Nach der Ankontaktierung kann die Bauplattform abgesenkt und der Aufbauprozess fortgeführt werden.

### 4.4 Prozess zur Erzeugung von elektrischen Schaltungen

Basierend auf den in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 erarbeiteten Teilkonzepten wird im Folgenden der gesamte Prozess für die Erstellung von elektrischen Schaltungen während des 3D-Druckprozesses dargestellt (vgl. Abbildung 4-22).

Bevor die Schichtdaten erzeugt werden, gilt es, ein Volumenmodell des Werkstücks zu erstellen. Wichtig für den erweiterten Prozess ist, dass bereits im CAD-Modell die Positionen der SMDs sowie die des Leiterbahnnetzes als Hohlräume abgebildet werden. Mithilfe eines Druckkopfes wird beim anschließenden Druckprozess Bindermaterial auf das Pulverbett aufgebracht (1). Bereiche, in die elektrische Komponenten oder Leitklebstoff integriert werden sollen, werden aufgrund der Hohlräume im CAD-Modell nicht mit Binder benetzt. Der Prozess zum Ankontaktieren der elektrischen Komponenten erfordert, dass zunächst die SMDs in das Bauteil integriert werden (2-4), bevor die horizontalen Leiterbahnen erzeugt werden können.

Daher wird mithilfe eines Unterdruckmoduls zunächst das lose Pulver aus den Kavitäten entfernt (2). Die elektronischen Bauelemente werden mithilfe eines Handhabungsmechanismus in die dafür vorgesehenen Vertiefungen eingelegt (3 und 4). Anschließend wird die Bauplattform abgesenkt (5), mithilfe des Beschichters eine neue Pulverschicht erzeugt (6) und diese mit der doppelten Bindermenge bedruckt (1). Die doppelte Bindermenge ist notwendig, um die wegen der verlängerten Prozesszeit verdampfte Bindermenge zu kompensieren.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

Dieser Zwischenschritt gewährleistet das Füllen des Spalts zwischen dem SMD und der Kavitätswand. Anschließend wird das Pulver aus den Bereichen entfernt, in denen die horizontalen Leiterbahnen erzeugt werden sollen (7). Ebenso müssen die Ankontaktierungspunkte der elektrischen Komponenten freigelegt werden (8).

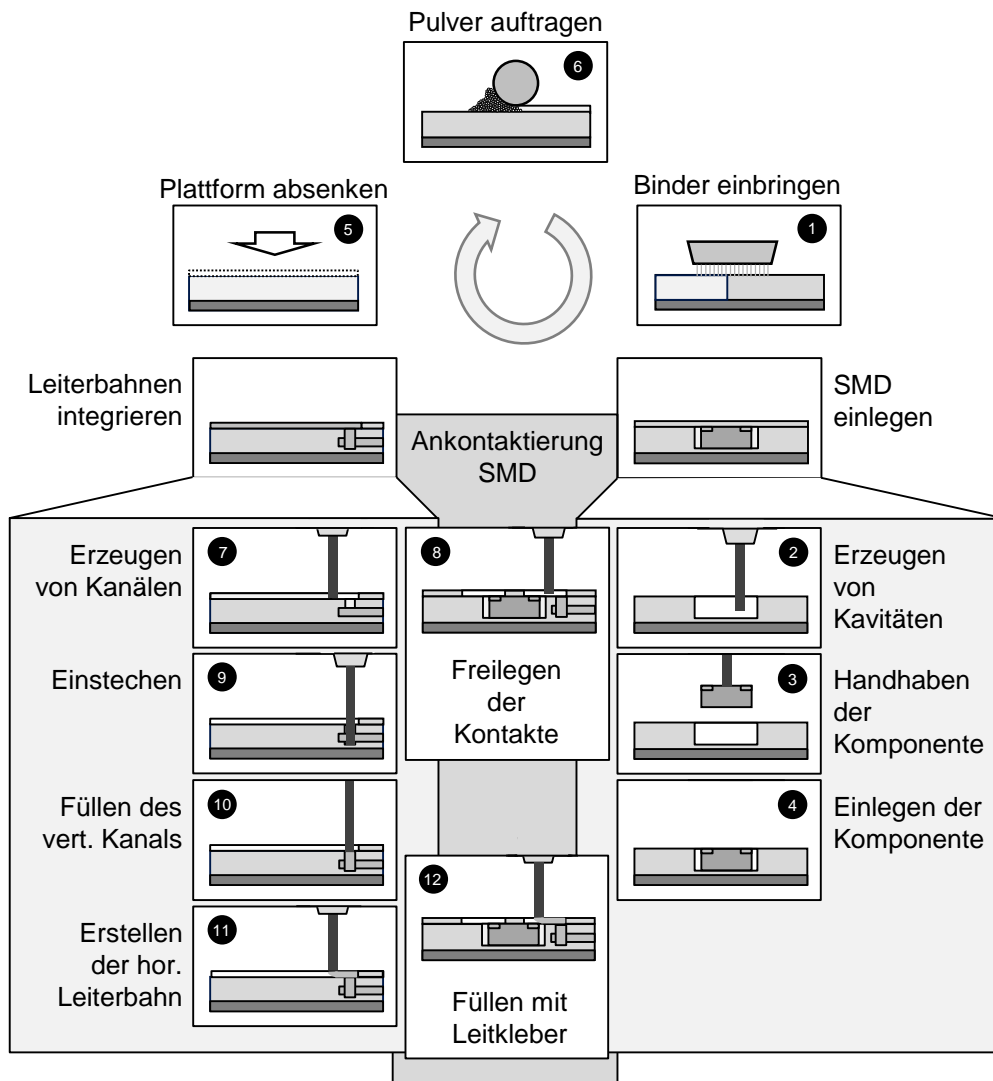


Abbildung 4-22: Prozessmodell zur Erzeugung elektrischer Schaltungen während des 3D-Druckprozesses

Bevor die Kanäle mit Leitklebstoff gefüllt werden und die Ankontaktierung der Komponenten erfolgt, müssen, falls vorgesehen, die vertikalen Verbindungen zu den darunterliegenden Leiterbahnen hergestellt werden (9 und 10). Dafür wird mit der Dosiernadel in den nicht mit Binder benetzten Bereich bis unterhalb der innenliegenden horizontalen Leiterbahn eingestochen (9). Beim Herausziehen wird kontinuierlich leitfähiges Material abgegeben und somit der durch die Dosiernadel



erzeugte Kanal gefüllt (10). Beim Erreichen der obersten Pulverschicht wird im günstigsten Fall unterbrechungslos mit der Erzeugung der horizontalen Leiterbahnen fortgefahren (11). Beim Erreichen der Ankontaktierungsstelle der elektrischen Komponenten muss die Materialabgabe wegen der Trennwand zwischen den Kontakten unterbrochen werden (12). Diese Barriere gewährleistet, dass das leitfähige Material nicht zusammenfließt. Nachdem die vertikalen und die horizontalen Leiterbahnen erzeugt wurden, wird mit dem additiven Aufbauprozess fortgefahren (5, 6 und 1).

### 4.5 Zusammenfassung

Die verschiedenen leitfähigen Materialklassen wurden zunächst anhand der in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen bewertet. Wegen fehlender Informationen für die Bewertung wurden die Ergebnisse einer CFD-Simulation, bei der der Auftrag von zwei Flüssigkeiten (Binder und leitfähiges Material) auf ein Pulverbett abgebildet wurde, herangezogen. Es zeigte sich, dass aufgrund der hohen Porosität des Ausgangsmaterials eine hochviskose Flüssigkeit (z. B. ein Leitklebstoff) zur Erzeugung von Leiterbahnen eingesetzt werden muss.

Da wegen des hohen Rechenaufwands für die Simulation lediglich ein repräsentatives Volumenelement mit den Abmessungen  $200\ \mu\text{m} \cdot 200\ \mu\text{m} \cdot 150\ \mu\text{m}$  betrachtet werden konnte, wurde anschließend der Auftrag von zwei Materialien (Leitklebstoff und leitfähige Tinte) auf einem Pulverbett experimentell durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse stimmen mit denen aus der Simulation überein: Leitfähige Tinten sickern in das Pulverbett ein, wogegen der Leitklebstoff auf der Oberfläche verbleibt.

Der ausgewählte Leitklebstoff wurde für diese Untersuchungen mithilfe eines Druckluftdispensers auf einem Probekörper abgegeben. Weiterhin wurde gezeigt, dass mithilfe des Materials der Prozessschritt der Ankontaktierung eines SMDs an eine Leiterbahn erfolgen kann. Die in den Vorversuchen erzeugten leitfähigen Strukturen waren jedoch höher als eine Pulverschicht, was zu einem Kontakt des nicht ausgehärteten Klebstoffs mit dem Beschichter bzw. dem Pulvermaterial führen würde. Deshalb wurden unterschiedliche Konzepte zur Erzeugung von Vertiefungen in einem Pulverbett untersucht. Ein geeignetes Verfahren hierfür ist ein Unterdrucksystem, bei dem das lose Pulvermaterial mit einem Werkzeug abgesaugt und in einem Pulverabscheider gesammelt wird.

## 4 Prozessmodell für die Erzeugung elektrischer Schaltungen

---

Zur Identifikation einer Greiftechnik, mit der die SMDs während des Prozesses gehandhabt werden können, wurden unterschiedliche Konzepte untersucht und bewertet. Der Unterdruckgreifer erfüllt dabei die Anforderungen am besten. Bei seiner Verwendung kann für den Prozess des Einsetzens der SMDs und für den Prozess des Entfernens von Pulverkörnern das gleiche Modul eingesetzt werden, wodurch der Umsetzungsaufwand geringer gehalten werden kann.

Für die Aufgabe der Ankontaktierung von elektrischen Komponenten an die Leiterbahnen wurden verschiedene Methoden entwickelt und diese über Vorversuche hinsichtlich der Zielerfüllung bewertet. Bei der ausgewählten Face-up-Methode werden zwischen den Kontaktstellen Trennwände berücksichtigt, die ein Zusammenfließen des Leitklebstoffs verhindern.

Sowohl für den Subprozess der *Integration der Leiterbahn* wie auch für den Subprozess der *Integration von elektrischen Komponenten* und deren Ankontaktierung wurden erweiterte Prozessmodelle erstellt. Diese wurden zu einem Gesamtmodell zusammengeführt und damit wurde der erweiterte Prozess zur *Erzeugung von elektrischen Schaltungen* beschrieben.

Anschließend galt es, die für die Umsetzung notwendigen technischen Anlagenmodule zu entwickeln und diese in die Versuchsanlage zu integrieren. Dies wird im nächsten Kapitel beschrieben.

## 5 Komponentenentwicklung

### 5.1 Vorgehen im Kapitel

In diesem Kapitel werden, basierend auf den in Kapitel 4 definierten Prozessen, die für die Umsetzung des Gesamtprozesses notwendigen technischen Module der Versuchsanlage beschrieben. Dazu werden zunächst der bestehende Versuchsaufbau und der technische Ablauf des 3D-Druckprozesses betrachtet. Ein etabliertes Werkzeug zur detaillierten Analyse eines Systems ist das Funktionsmodell. Eine Beschreibung der Methode zur Erstellung von Funktionsmodellen ist beispielsweise in PONN & LINDEMANN (2011) zu finden. Die Funktion des Modells wird über eine Operation beschrieben und hat einen Eingangs- und Ausgangszustand (vgl. Abbildung 5-1). Das hier eingesetzte Funktionsmodell nach EHRENSPIEL (2009) konzentriert sich auf die Beschreibung der Eigenschaftsänderungen von Umsatzprodukten. Ein Umsatzprodukt ist ein an einem Umsatz (beispielsweise Material oder Energie) beteiligtes Objekt (PONN & LINDEMANN 2011). Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit wurde die Funktion im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch ein zusätzliches Feld „Komponente“ erweitert. Dieses beschreibt die Komponente der Anlage, die zur Umsetzung der Eigenschaftsänderung bewegt werden muss.

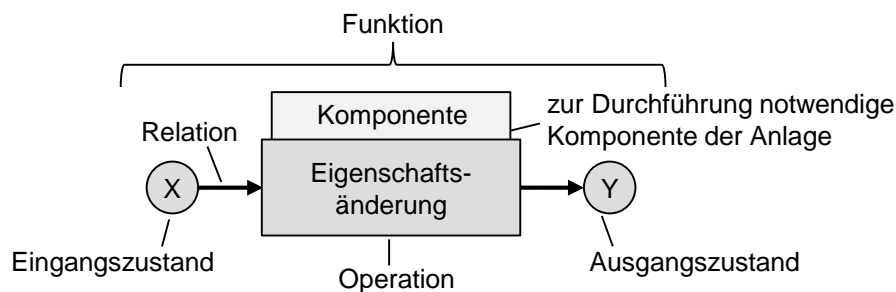


Abbildung 5-1: Aufbau einer Funktion im umsatzorientierten Funktionsmodell in Anlehnung an EHRENSPIEL (2009)

Basierend auf den entwickelten Prozessmodellen werden spezifische Funktionsmodelle für die Aufgaben *Erzeugung elektrischer Leiterbahnen* (Abschnitt 5.3.2) und *Erzeugung von Vertiefungen bzw. Handhabung von SMDs* (Abschnitt 5.4.2) erarbeitet. Nach der Analysephase werden jeweils Anforderungen an die zu entwickelnden Anlagenmodule definiert und anschließend wird die hardware- und softwaretechnische Umsetzung der Module dargestellt.

### 5.2 Versuchsaufbau und Prozesse

Der verwendete Versuchsstand wurde in Kooperation mit der Firma *voxeljet AG* entwickelt und ist wegen seines einfachen Aufbaus und guter Modifizierbarkeit für die Durchführung von Untersuchungen hinsichtlich Prozess- und Werkstoffgrundlagen gut geeignet. Eine einfache Zugänglichkeit zu den einzelnen Anlagenkomponenten sowie die Möglichkeit der Anpassung der Steuerungssoftware bietet eine gute Ausgangssituation, die bestehende Versuchsanlage zu erweitern und somit bestehende Prozesse zu verbessern bzw. neue Prozesse zu entwickeln. Abbildung 5-2 zeigt den im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Versuchsstand.

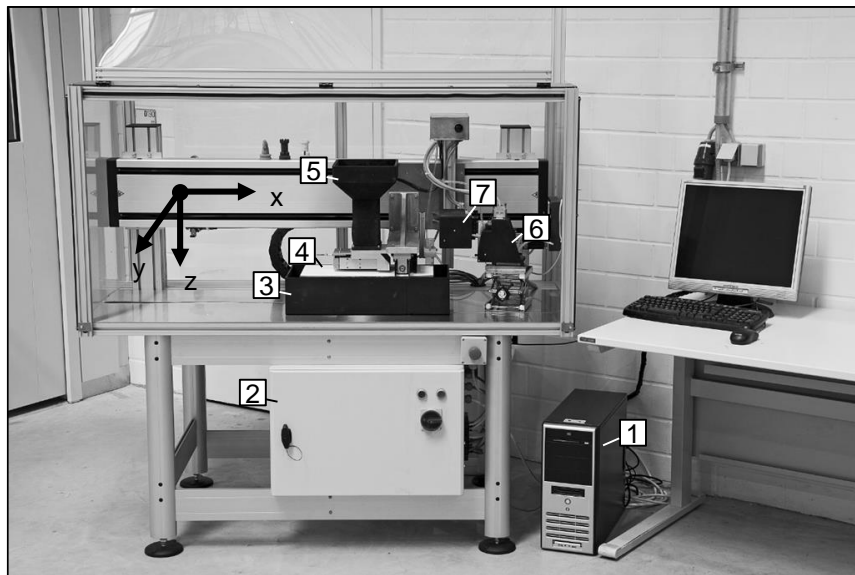


Abbildung 5-2: Versuchsstand

Der Bauraum (4) hat die Dimensionen  $x = 250$  mm,  $y = 110$  mm und  $z = 95$  mm. Der für die Verfestigung benötigte Binder wird über einen Druckkopf vom Typ Spectra SL128 der Firma *Dimatix*® auf das Pulverbett aufgebracht. Der Druckkopf hat 128 Düsen mit einem Durchmesser von jeweils  $50 \mu\text{m}$ , was die Abgabe eines Tropfenvolumens zwischen 65 und 90 Picoliter, abhängig von der Druckfrequenz und der Flüssigkeit, ermöglicht (FUJIFILM DIMATIX INC. 2010).

Flüssigkeiten mit einer dynamischen Viskosität zwischen 8 und 20 mPas können laut Herstellerangaben verarbeitet werden, wobei die Versuchsanlage über eine integrierte Druckkopfheizung verfügt, mit der die Viskosität, falls notwendig, gesenkt werden kann. Flüssigkeiten mit einer dynamischen Viskosität bis zu 40 mPas können somit verarbeitet werden. Für den Druckkopfhalter (6) wurde bei der Entwicklung die Möglichkeit vorgesehen, einen zweiten Druckkopf zu integrieren.

Dies ermöglicht die Verarbeitung von zwei unterschiedlichen Flüssigkeiten während eines Druckauftrags. Das Pulver wird in einem Vorratsbehälter (5) mit einem Fassungsvermögen von ca. 2 Litern gelagert. Über eine Klappe am Boden des Behälters wird das Pulver auf das Pulverbett abgelegt. Der Auftragsmechanismus (7) zur Erzeugung eines ebenen Pulverbetts besteht aus einer gegen die Bewegungsrichtung rotierenden Walze. Überschüssiges Material fällt über die Kante des Baubehälters in einen Auffangbehälter (3).

Die Steuerung der Anlage erfolgt durch einen externen Rechner (1), der über eine USB-Schnittstelle mit dem Anlagencontroller im Schaltschrank (2) verbunden ist. Für die Datenvorbereitung (Platzierung der zu druckenden Objekte im Bauraum sowie Schichtbildberechnung) wird die Software Rapix3D vom Institut *FORWISS* der Universität Passau verwendet.

Die Ansteuerung der Versuchsanlage erfolgt durch die Software „Singlematerial“ bzw. „Multimaterial“, letztere bietet eine Erweiterung um eine frei programmierbare Schnittstelle. Sie ermöglicht den Aufruf einer zusätzlichen Benutzeroberfläche nach Beendigung des Druckvorgangs einer Schicht, um zusätzliche, in die Anlage integrierte Module anzusteuern.

### **Funktionsmodell des 3D-Druckprozesses**

Den in Abschnitt 2.2 in Form eines Funktionsmodells beschriebenen 3D-Druckprozesses veranschaulicht Abbildung 5-3 im Detail. Der Energieumsatz sowie die Steuerung des Systems mithilfe der Druckersoftware werden in dieser Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht berücksichtigt. Elektrische Energie wird neben der Versorgung der Steuerungssysteme der Anlage auch für den Betrieb des Druckkopfs sowie für die Elektromotoren zur Rotation der Beschichterwalze und zur Bewegung der Achsen des Systems benötigt. Für die Achsenbewegung wird die elektrische Energie in ein Drehmoment an der Motorwelle gewandelt.

Neben elektrischer Energie wird an der Anlage Druckluft benötigt, die im vorliegenden Fall zentral erzeugt und durch Druckluftleitungen an der Anlage zur Verfügung gestellt wird. Der Druck in der Leitung beträgt 8 bar. Über einen pneumatischen Schieber wird die Druckluft in eine translatorische Bewegung gewandelt, die in der 3D-Druckanlage die Pulverklappe öffnet, wodurch das Pulver portionsweise auf das Bearbeitungsbett abgelegt wird.

Der Bauprozess lässt sich grundsätzlich in zwei Stoffumsätze aufteilen, die sich in der Operation „Bahnbreite mit Binder bedrucken“ vereinen. Der erste Ausgangsstoff ist das Kunststoffpulver, das über die pneumatisch betriebene Klappe auf das Baubett abgelegt und mithilfe des Beschichters verteilt wird. Sein Endzustand ist ein ebenes Pulverbett, das als Bedingungszustand für die Verknüpfungsoperation vorliegen muss.

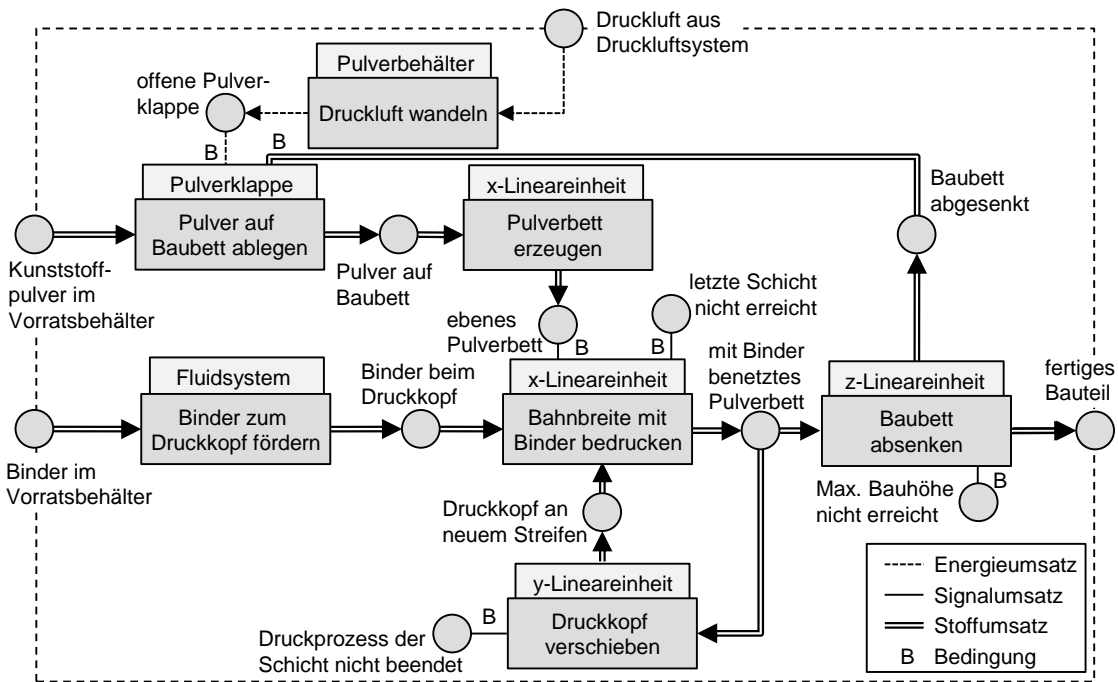


Abbildung 5-3: Funktionsmodell des 3D-Druckprozesses

Der zweite Ausgangsstoff ist der Binder, der unter Nutzung des hydrostatischen Drucks durch einen Heber vom Vorratsbehälter mithilfe eines Fluidsystems zum Druckkopf transportiert und dort über Piezoelemente tropfenweise auf das Pulverbett abgegeben wird. Da der Druckkopf nur einen vom eingestellten Druckkopfwinkel abhängigen Teil des Baubetts simultan bedrucken kann, bedarf es zur Erstellung von größeren Werkstücken einer translatorischen Verschiebung des Druckkopfes in y-Richtung. Nach dem Bedrucken der Schicht wird das Baubett mithilfe der z-Achse um einen definierten Wert abgesenkt. Sofern die maximale Bauhöhe noch nicht erreicht wurde, wird der Prozess wiederholt. Nach dem Bedrucken der letzten Schicht wird das Baubett mit einer Deckschicht versehen.

### 5.3 Entwicklung eines Multimaterialmoduls

#### 5.3.1 Allgemeines

Die Verarbeitung von Flüssigkeiten mit einer dynamischen Viskosität über 40 mPas ist trotz Druckkopfheizung mit dem in der Versuchsanlage integrierten Druckkopf nicht möglich. Daher wird ein neues Modul zur Abgabe eines Leitklebstoffs benötigt, das im Folgenden beschrieben wird.

JILLEK & KELLER (2003) beschreiben unterschiedliche Abgabeverfahren für hochviskose Fluide (beispielsweise Pasten) in der industriellen Leiterplattenherstellung. Diese Verfahren wurden für die Erstellung von Dünnschicht- bzw. Dick-schichtkomponenten entwickelt, deren Herstellung vergleichbaren Anforderungen wie in Abschnitt 3.5.2 beschrieben unterliegt. Weitere Abgabeverfahren für hochviskose Flüssigkeiten werden in BRAND (1997) und in LUCHS (1998) mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen vorgestellt.

Für eine positionsgenaue Dosierung leitfähiger Klebstoffe ist die Dispensertechnik ein geeignetes Abgabeverfahren (CHRISEY & PIQUÉ 2002). Dispenser ermöglichen eine flexible Anpassung der abgegebenen Materialmenge und weisen sowohl eine gute Abkapselung des Materials von der Umgebung als auch einen geringen Reinigungsaufwand auf. Speziell für die Materialabgabe auf ebenen Flächen sind Dispenser aufgrund ihrer einfachen Funktionsweise sehr gut geeignet. Nachteilig ist die geringe Förderleistung an Material und somit die geringe Produktivität. Da diese Arbeit eine prototypische Umsetzung zum Ziel hat, spielt die fehlende Produktivität zunächst eine untergeordnete Rolle.

Es wurden speziell zwei Arten von Dispensern näher betrachtet, der Druckluftdispenser und der Kolbendispenser (vgl. dazu GENG ET AL. (2003)). Der in den Vorversuchen prototypisch umgesetzte Druckluftdispenser zeigte bereits in den ersten Versuchsreihen mehrere Schwachpunkte. Durch die Druckbeaufschlagung können Luftblasen in der Spritze entstehen, die zu Volumenabgabefehlern und zu Luftein-schlüssen in der Leiterbahn führen können. Weiterhin können Undichtigkeiten in der Spritze das Dosierergebnis negativ beeinflussen und zudem einen erhöhten Reinigungsaufwand nach sich ziehen (OTHMAN 2005). Der größte Nachteil liegt in der Abhängigkeit des Druckaufbaus und somit der abgegebenen Materialmenge vom Füllstand der Spritze sowie von der dynamischen Viskosität des Fluids. Ein sich kontinuierlich änderndes Verhältnis von Luft zu Fluid beeinflusst aufgrund der Kompressibilität der Luft und der Inkompressibilität des Fluids den zu wählenden Druck in der Spritze in vergleichbarer Weise wie eine sich ändernde dynamische Viskosität des Fluids. Für eine konstante Materialabgabe (d. h. Menge pro Zeiteinheit) müsste daher der Überdruck in Abhängigkeit vom Füllstand der Spritze und der aktuellen Viskosität kontinuierlich angepasst werden. Die Abhängigkeit des Drucks vom Füllstand wurde von OTHMAN (2005) näher untersucht. Weil die dynamische Viskosität des eingesetzten Leitklebstoffs zudem auch noch zeitabhängig ist, wird aufgrund der dafür benötigten Regelung dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Der Kolbendispenser wird häufig bei medizinischen Anwendungen eingesetzt und ermöglicht die Regelung des Abgabevolumens des Materials über das vom Kolben verdrängte Volumen innerhalb einer definierten Zeit (vgl. Abbildung 5-4). Der

## 5 Komponentenentwicklung

Kolben wird mit einer definierten Kolbengeschwindigkeit ( $v_K$ ) abgesenkt, wodurch das leitfähige Material an der Nadelspitze austritt. Durch eine gleichzeitige Bewegung des Dispensers mit der Geschwindigkeit  $v_V$  kann ein gleichmäßiger Materialstrang auf einer Bauteiloberfläche erzeugt werden. Die sich verändernde Viskosität des Materials und der Füllstand der Spritze spielen eine nur untergeordnete Rolle, da primär die Schubkraft des Motors für eine gleichmäßige Materialabgabe ausschlaggebend ist.

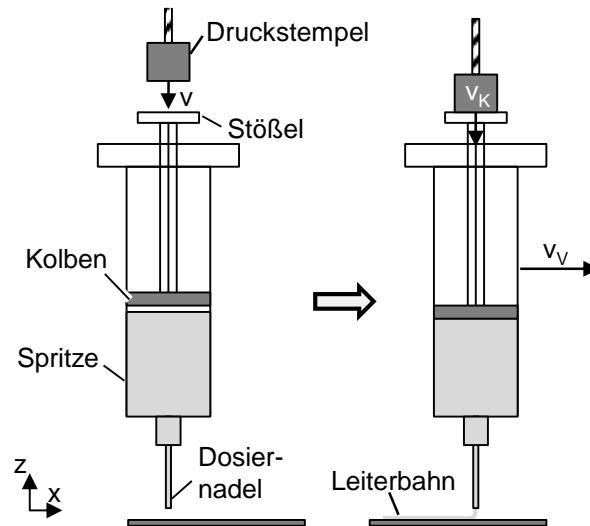


Abbildung 5-4: Funktionsprinzip des Kolbendispensers zur Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen

### 5.3.2 Anforderungsdefinition

Zur Identifikation der für dieses Modul zu stellenden Anforderungen wird, basierend auf dem in Abschnitt 4.3.6 definierten Vorgehen, zunächst ein Funktionsmodell des Prozesses „Erzeugung elektrischer Leiterbahnen“ hergeleitet (vgl. Abbildung 5-5). Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden allgemeine Schritte des 3D-Druckprozesses, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, nicht berücksichtigt.

Die Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen erfolgt nach dem Binderauftrag, wozu der ursprüngliche Druckprozess unterbrochen werden muss. Nach dem Laden der Koordinaten wird das Multimaterialmodul über die x-y-Einheiten an die Startposition bewegt und dort wird die Dosiernadel auf die Soll-Position ins Pulverbett abgesenkt. Abhängig davon, ob eine zweidimensionale oder eine dreidimensionale Leiterbahn erzeugt wird, liegt die Endposition oberhalb des Bodens des zuvor erzeugten Kanals oder im Pulverbett (siehe Abschnitt 4.2.4). Anschließend wird der Kolben des Dispensers mithilfe eines Motors mit einer definierten Geschwindigkeit abgesenkt.



### 5.3 Entwicklung eines Multimaterialmoduls

Der Leitklebstoff wird aus dem Vorratsbehälter verdrängt und über die Dosiernadel abgegeben. Zur Erzeugung der vertikalen Leiterbahnen muss über eine z-Lineareinheit, für horizontale Leiterbahnen über die bestehenden x- und y-Lineareinheiten das Modul translatorisch mit einer definierten Geschwindigkeit bewegt werden. Wenn die Leiterbahnen erzeugt sind und die programmierte Endposition erreicht ist, stoppen die Achsen der Anlage. Bei der Erstellung von dreidimensionalen Leiterbahnen befindet sich das Ende der Dosiernadel nach der Erzeugung der vertikalen Leiterbahn in einem definierten Abstand zum Boden des zuvor erzeugten horizontalen Kanals, wodurch idealerweise sofort im Anschluss mit der Bewegung des Multimaterialmoduls in der x-y-Ebene fortgefahren werden kann. Ist der Prozess zur Erzeugung der horizontalen Leiterbahn abgeschlossen, werden sowohl der Dispensermotor als auch die Achsmotoren gestoppt und das Modul wird über die z-Achse auf Transporthöhe angehoben, um Kollisionen mit Anlagenkomponenten und dem Pulverbett zu vermeiden. Anschließend kann der 3D-Druckprozess mit dem Prozessschritt „Absenken der Plattform“ fortgesetzt werden.

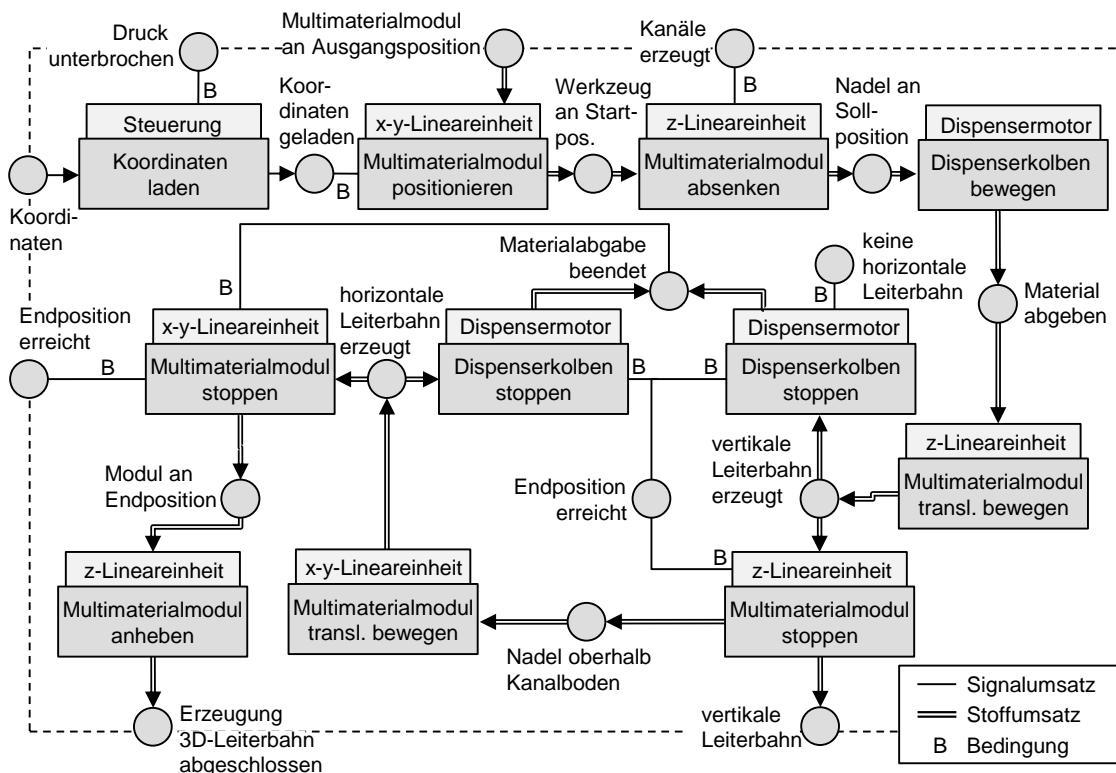


Abbildung 5-5: Funktionsmodell des Multimaterialmoduls zur Erstellung einer dreidimensionalen elektrischen Leiterbahn

Damit ergeben sich folgende Anforderungen:

### **Anforderungen an das Multimaterialmodul (D):**

- D1. Die Nadelspitze kann mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm jede Position in und auf dem Baufeld einnehmen.
- D2. Die Steuerung erfolgt über einfache Befehle, das Programmieren von Bewegungsmustern ist möglich.
- D3. Das Modul ermöglicht das Anheben und Absenken des Werkzeugs.
- D4. Der Kolben kann mit einer definierten Geschwindigkeit bewegt werden.
- D5. Unterschiedliche Fluide bis zu einer dynamischen Viskosität von 1600 mPas sind verarbeitbar.
- D6. Ein Rüsten der Anlage mit leitfähigem Material muss ohne hohen Reinigungsaufwand möglich sein.
- D7. Die Modulmasse darf die Traglast der Achse nicht überschreiten.
- D8. Die Erweiterung sollte einfach zu bedienen sein.

Neben den aus dem Funktionsmodell abgeleiteten Anforderungen wurden eine Vielzahl aufgabenunabhängiger Anforderungen definiert, die einen zuverlässigen Betrieb des Moduls in der Versuchsanlage gewährleisten, hier aber der Übersichtlichkeit wegen nicht näher beschrieben werden.

### **5.3.3 Hardwaretechnische Umsetzung**

Das anhand der Anforderungen D1 bis D8 entwickelte Multimaterialmodul (vgl. Abbildung 5-6) wurde an die y-Achse der Versuchsanlage montiert. Damit kann eine beliebige Position im Baufeld erreicht werden (Anforderung D1). Die Positioniergenauigkeit der Achsen wurde über Versuche ermittelt. Dabei wurde eine bestimmte Position mehrmals mit der x- bzw. der y-Achse angefahren und durch das Absenken des Moduls ein Abdruck des Werkzeugs im Pulverbett hinterlassen. Nach dem 20-fachen Setzen dieses Abdruckes an derselben Position mit einem zwischenzeitlichen Verfahren der Lineareinheiten wurde der Abdruck mithilfe eines Messschiebers vermessen. Das Ergebnis war eine Positionsabweichung der x-y-Lineareinheit unterhalb von  $\pm 0,1$  mm.

Zum Anheben und Absenken des Werkzeugs (Anforderung D3) wird ein Schrittmotor der Firma *Nanotec*, Modell L20 mit einer minimalen Auflösung von 0,005 mm/Schritt nach Umsetzung in eine translatorische Bewegung (NANOTEC 2014) eingesetzt. Die Referenzierung des Schlittens zur Befestigung an der y-Achse erfolgt über einen Endschalter. Die Achsen der Versuchsanlage sowie der eingesetzte Schrittmotor für die z-Bewegung des Moduls weisen damit eine ausreichende Positioniergenauigkeit auf (Anforderung D1).

### 5.3 Entwicklung eines Multimaterialmoduls

Das Ausdrücken der mit Leitklebstoff gefüllten Spritze erfolgt durch einen weite- ren Linearaktuator mit Trapezspindel, Modell L20, von der Firma *Nanotec* (Anforderung D4). Durch die maximale Schubkraft von 30 N (NANOTEC 2014) erzeugt der Motor eine ausreichend hohe Kraft auf den Dosierkolben, um mit dem Dispenser den Leitklebstoff EPO-TEK® E4110 verarbeiten zu können (Anforde- rung D5).

An die Spritze können mithilfe des standardisierten *Luer-Lock*-Anschlusses unter- schiedliche Dosiernadeln mit unterschiedlichen Durchmessern und variablen Längen angebracht werden. Nach der Benutzung können die Spritzen entweder erneut befüllt oder entsorgt werden, der Reinigungsaufwand wird somit minimiert (siehe Anforderung D6). Der Einsatz von additiven Fertigungsverfahren ermög- lichte die Herstellung des Grundkörpers unter Anwendung von Leichtbauansätzen (Form- und Stoffleichtbau), wodurch sich die Masse des Moduls unterhalb der Traglastgrenze der Achse halten ließ (Anforderung D7).

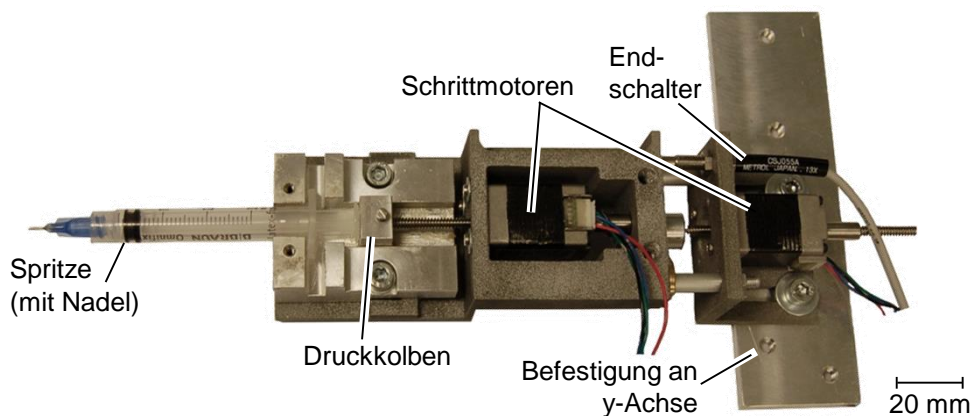


Abbildung 5-6: Multimaterialmodul mit Spritze und Dosiernadel

### 5.4 Entwicklung eines Unterdruckmoduls

#### 5.4.1 Allgemeines

Das Unterdrucksystem muss nach Abschnitt 4.3 zwei unterschiedliche Aufgaben übernehmen, die definierte Entfernung von Pulverpartikeln aus dem Pulverbett für die Integration von Leitklebstoff bzw. von elektrischen Komponenten sowie die Handhabung von SMDs. Für beide Aufgabenfelder definieren sich unterschiedliche Anforderungen an das Modul.

Die spezifischen Anforderungen der einzelnen Tätigkeiten können dem entsprechenden Abschnitt entnommen werden. Zudem wurde eine Vielzahl an tätigkeitsunabhängigen Anforderungen definiert, die einen zuverlässigen Betrieb des Moduls in der Versuchsanlage gewährleisten, die aber der Übersichtlichkeit halber nicht näher beschrieben werden.

#### 5.4.2 Anforderungsdefinition

Zur Identifikation der aufgabenspezifischen Anforderungen wird für beide Aufgaben jeweils ein Funktionsmodell erarbeitet, um so die einzelnen in der Versuchsanlage durchzuführenden Arbeitsschritte näher zu definieren.

##### **Aufgabe 1: Erzeugung von Vertiefungen**

Die Erzeugung von Vertiefungen erfolgt nach dem Binderauftrag, wofür der Aufbauprozess unterbrochen werden muss. Zum Start des Subprozesses werden die Koordinaten in die Steuerung geladen. Das Unterdrucksystem wird über die x-y-Lineareinheiten zur Startposition bewegt. Bevor das Werkzeug in das Pulverbett eintaucht, muss der Unterdruck an der Werkzeugspitze anliegen, um bereits in der Eintauchphase das Pulver zu entfernen. Hat die Nadelspitze die definierte Aussaughöhe erreicht, kann es je nach eingesetztem Werkzeug notwendig sein, es mithilfe eines Rotationsmechanismus abhängig von der Bewegungsrichtung zu orientieren. Durch die translatorische Bewegung des Unterdrucksystems mithilfe der x-y-Achsen werden die Pulverpartikel lokal entfernt. Bei Richtungsänderungen, zum Beispiel von einer Bewegung in x-Richtung zu einer Bewegung in y-Richtung, kann eine erneute Orientierung des Werkzeugs notwendig werden. Nach dem Abfahren des gesamten Bewegungspfades wird das Werkzeug wieder in die Transporthöhe angehoben, um eine Kollision mit anderen Anlagenkomponenten zu vermeiden. Je nach Art, Größe und Anzahl der Vertiefungen kann es notwendig sein, den Prozess zu wiederholen. Wichtig dabei ist, dass zwischen den Vertiefungen das Werkzeug jeweils auf Transporthöhe angehoben wird. Abbildung 5-7 stellt das Funktionsmodell für diesen Prozess dar.

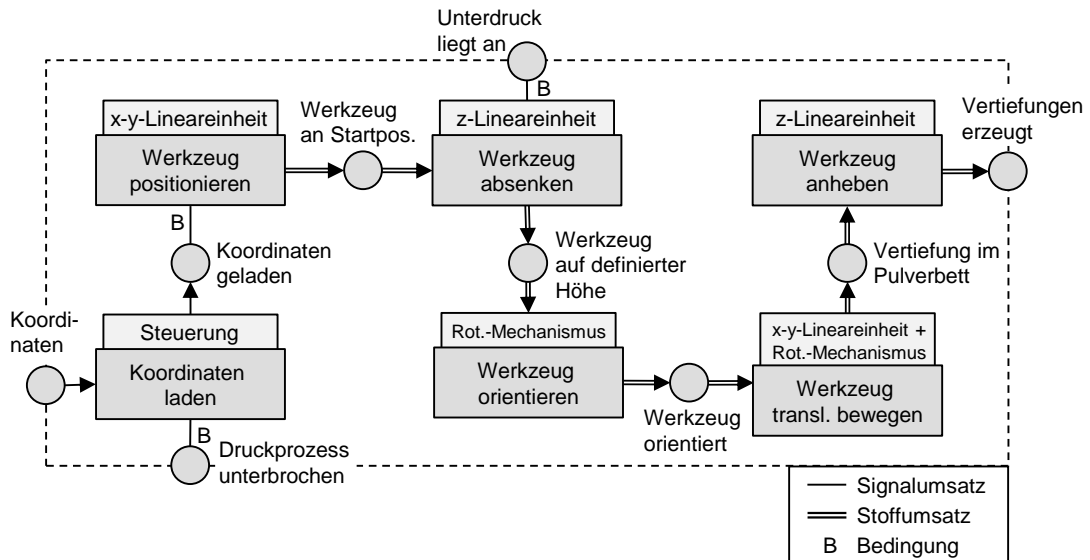


Abbildung 5-7: Funktionsmodell der Aufgabe „Erzeugung von Vertiefungen“

### Aufgabe 2: Handhabung von SMDs

Die unterschiedlichen elektrischen Komponenten werden an einem entsprechenden Zuführsystem für die Handhabungsaufgabe zur Verfügung gestellt. Nach dem Einlesen der einzelnen Koordinaten der Ablagepositionen im Pulverbett begibt sich der Greifer zum Zuführsystem (Position 1A) und senkt sich anschließend auf Position 1B ab. Die Fixierung der Komponente erfolgt durch das Anlegen eines Unterdrucks am Greifer. Anschließend wird das Modul mit der elektrischen Komponente auf Transporthöhe angehoben und zur entsprechenden Position im Pulverbett bewegt (Position 2A). Die Transporthöhe liegt oberhalb der obersten Pulverschicht, was eine Kollision des Greifers bzw. des SMDs mit der Versuchsanlage oder dem Pulverbett vermeidet. Bevor die Komponente in die dafür vorgesehene Kavität abgelegt wird, muss gegebenenfalls die Orientierung der SMDs mithilfe eines Rotationsmechanismus angepasst werden. Die Informationen über die Abmessungen der elektrischen Komponente, ihre Orientierung und ihre Ablageposition müssen der Steuerung übermittelt werden. Erst im Anschluss wird das SMD durch das Absenken des Moduls auf „SMD-Level“ eingelegt (Position 2B). Dieser Wert wird als eine fixe z-Koordinate festgelegt, die für jede Bauteilhöhe im Pulverbett und auf dem Zuführsystem identisch ist. Dies minimiert die Anzahl der unterschiedlichen Positionen in z-Richtung und somit den Programmieraufwand der Verfahrenssätze. Der Greifkontakt wird durch Abschalten des Unterdrucks gelöst. Anschließend kann der Handhabungsmechanismus wieder auf Transporthöhe angehoben werden. Für die Handhabung weiterer elektrischer Komponenten werden die einzelnen Schritte wiederholt. Abbildung 5-8 stellt das Funktionsmodell für den Prozess dar.

## 5 Komponentenentwicklung

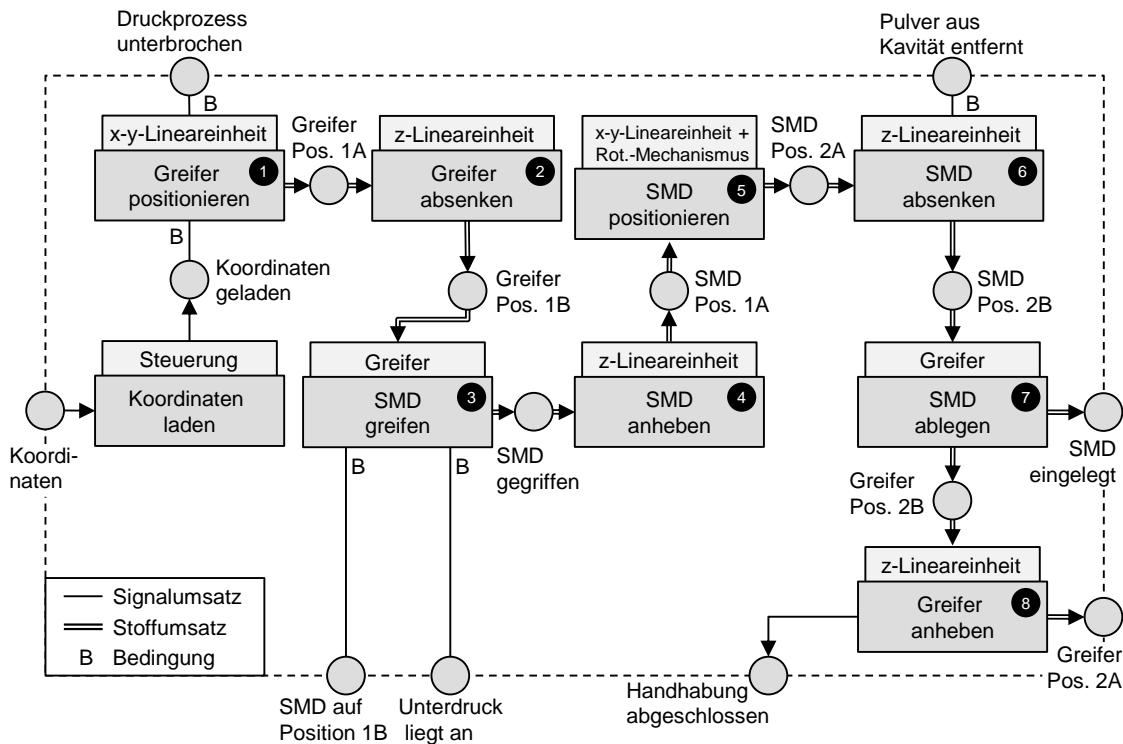
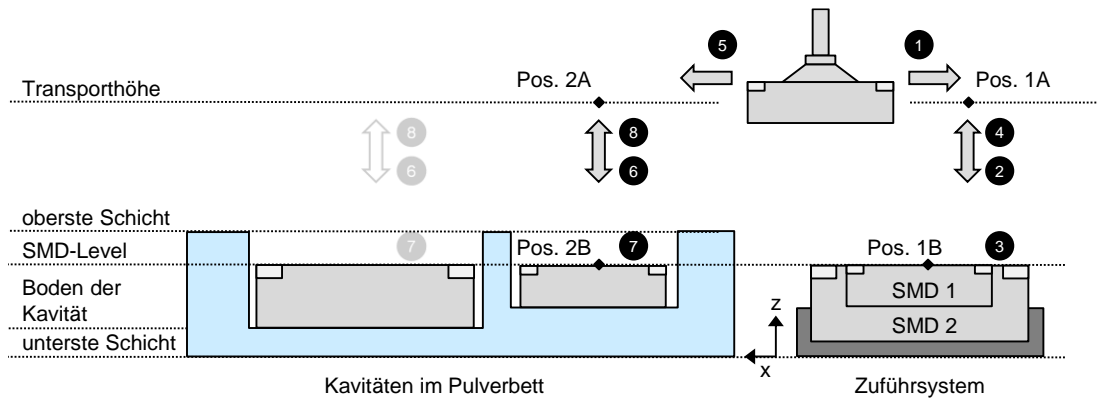


Abbildung 5-8: Funktionsmodell des Handhabungsmechanismus (unten) mit Prozessbeschreibung (oben)

Zur Erzeugung eines ausreichenden Unterdrucks für den Transport von SMDs müssen Greifer mit einem flachen Ende eingesetzt werden. Diese sind nicht unbedingt für die Erzeugung von Kanälen in einem Pulverbett geeignet. Zur Durchführung der unterschiedlichen Tätigkeiten mit einem Modul sollte daher ein Werkzeugwechselsystem vorgesehen werden. Damit ergeben sich folgende Anforderungen:

### Anforderungen an das Unterdrucksystem (U) aus beiden Einsatzbereichen:

- U1. Das Werkzeug kann mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm jede Position im Baufeld einnehmen.
- U2. Die Steuerung erfolgt über einfache Befehle, das Programmieren von Bewegungsmustern ist möglich.
- U3. Der Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge wird gewährleistet.
- U4. Das Modul ermöglicht das Anheben und Absenken der Werkzeuge.
- U5. Der Unterdruck ist ein- bzw. ausschaltbar.
- U6. Das System ist rotierbar ausgelegt, um damit die Orientierung der elektrischen Komponenten sowie die des Aussaugwerkzeugs anzupassen.
- U7. Die Modulmasse darf die Traglast der Achse nicht überschreiten.
- U8. Die zusätzliche Erweiterung soll einfach zu bedienen sein.

Die hardwaretechnische Umsetzung des Moduls kann dem darauf folgenden Abschnitt entnommen werden. Die Software und die steuerungstechnische Integration werden in Abschnitt 5.5 dargestellt.

### 5.4.3 Hardwaretechnische Umsetzung

Abbildung 5-9 veranschaulicht das entwickelte Unterdrucksystem. Mithilfe eines Befestigungselements kann das Modul mit der z-Achse verbunden werden, so dass jede Position im Baufeld erreicht (Anforderung U1) und das Modul angehoben bzw. abgesenkt werden kann (Anforderung U4).

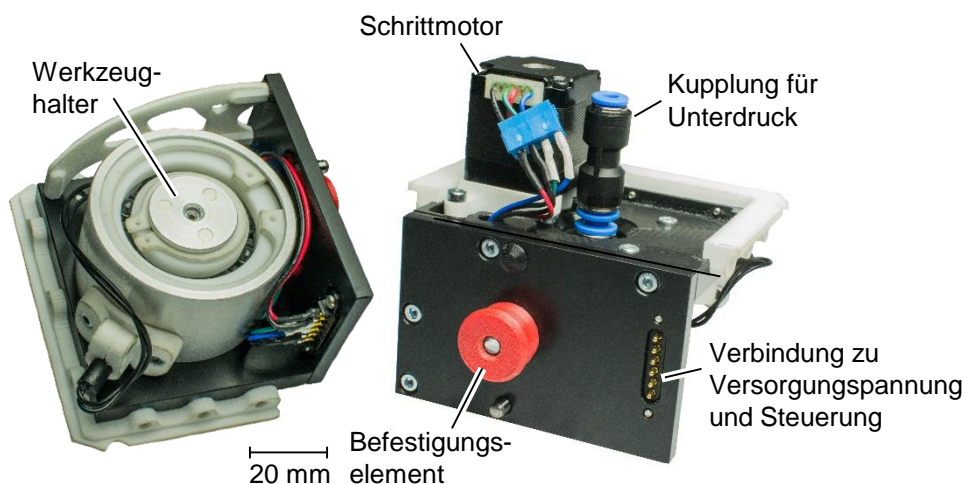


Abbildung 5-9: Unterdrucksystem mit Rotationsmechanismus und Werkzeugwechselsystem

## 5 Komponentenentwicklung

---

Die zusätzlich integrierte z-Achse besitzt nach Herstellerangaben eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm, was bei einer Pulverschichtdicke von  $150\ \mu\text{m}$  ausreichend ist (FESTO 2008). Die hinreichende Genauigkeit des Achssystems der Versuchsanlage wurde bereits in Abschnitt 5.3.3 erläutert. Demnach weisen alle Achsen der Versuchsanlage eine ausreichende Positioniergenauigkeit für die Aufgaben der *Erzeugung von Vertiefungen* sowie der *Integration von elektrischen Komponenten* auf (Anforderung U1).

Ein zusätzlicher Schrittmotor ermöglicht eine Rotation des Werkzeughalters (Anforderung U6). Eine Festo-Druckluftkupplung verhindert ein Verdrehen des Unterdruckschlauches und gewährleistet somit einen prozesssicheren Betrieb des Moduls. Zur Einhaltung der zulässigen Gesamtmasse des Moduls (Anforderung U7) wurden einzelne Komponenten mithilfe des SLS-Verfahrens aus Kunststoff (PA12) gefertigt, so zum Beispiel Halterungen und Sicherungsringe (weiße Komponenten in Abbildung 5-9). An dem Werkzeughalter können mithilfe von Magneten unterschiedliche Werkzeuge befestigt werden (Anforderung U3). Ein Dichtring verhindert Leckagen im Unterdrucksystem. Der Unterdruck wird, wie bereits bei den Vorversuchen, von einer Venturi-Düse erzeugt und mithilfe eines Magnetventils ein- bzw. ausgeschaltet (Anforderung U5). Das eigentliche Aussaugwerkzeug wird an der Spitze des Halters befestigt (vgl. Abbildung 5-10). Eine andere Ausführung des Halters ermöglicht das Anbringen standardisierter Nadeln, z. B. von der Firma *Vieweg GmbH*.



Abbildung 5-10: Halter mit Magneten sowie angebrachtem Aussaugwerkzeug (gebogene Spitze zur Erzeugung von Kanälen)

### 5.5 Integrierte Steuerung beider Module

Eine einfache Bedienung beider Module (Anforderung D8 und U8) für die Erzeugung von elektrischen Schaltungen bedurfte einer steuerungstechnischen Erweiterung der Anlage sowie einer Anpassung der Software.



## 5.5 Integrierte Steuerung beider Module

Zur Steuerung der integrierten Festo-Achse SLTE 10-50 wurde der Festo-Controller SFC-DC-VC-3-E-H0-IO eingesetzt. Dieser wird über den Rechner der Versuchsanlage programmiert und kann bis zu 31 Verfahrssätze speichern (FESTO 2008). Die Ansteuerung des Controllers erfolgt über eine im Rechner integrierte Steuerkarte (National Instruments PCI-2661). Die Spannung zum Betrieb des Controllers wird durch ein eigenes Netzteil, das an das Spannungsnetz des 3D-Druckers angehängt ist, bezogen. Die Steuersignale und die Spannung zum Betrieb des Linearantriebs werden über ein Verbindungskabel zwischen Achse und Controller bereitgestellt.

Die Schrittmotoren für den Unterdruckmechanismus sowie für das Multimaterialmodul werden über eine zusätzliche Steuerkarte TMCM 6110 von der Firma *Trinamic Motion Control* angesteuert. Die Karte ermöglicht den Anschluss von sechs verschiedenen Schrittmotoren und wird zur Steuerung über ein USB-Kabel an den Rechner angeschlossen. Der Gesamtaufbau kann der schematischen Darstellung in Abbildung 5-11 entnommen werden.

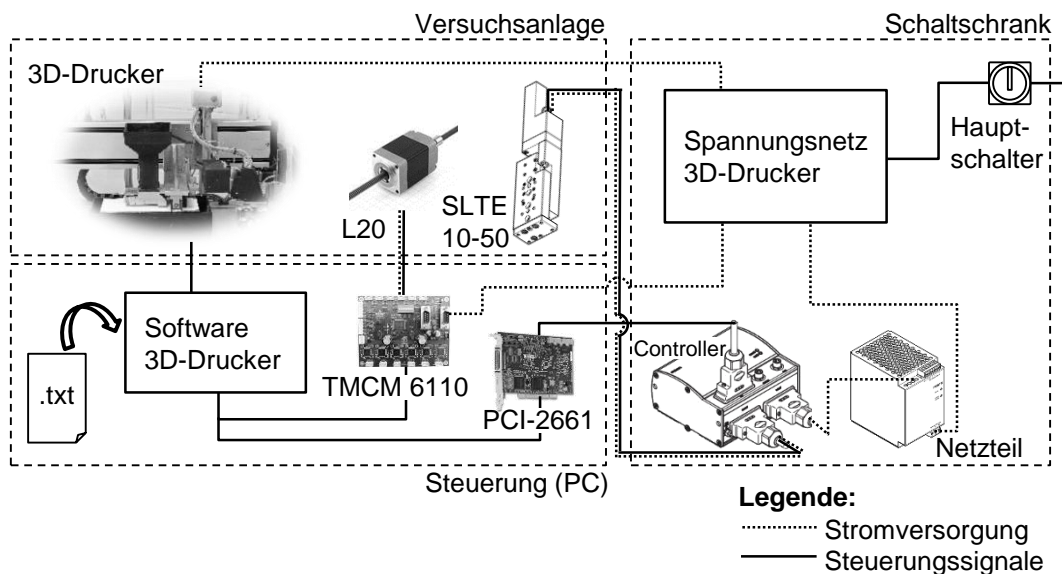


Abbildung 5-11: Steuerung der zusätzlichen Module (Bildquelle: Festo-Komponenten (FESTO 2008))

Die Steuerung des erweiterten 3D-Druckprozesses erfolgt über eine vom Hersteller implementierte Erweiterung der eigentlichen Druckersoftware. Diese ermöglicht nach dem Binderauftrag auf eine Schicht den Aufruf einer Funktion, in der eine eigenständige Programmierung neuer Funktionen möglich ist. Des Weiteren kann in dieser Funktion auf grundlegende Steuerungsbefehle der Anlage, z. B. auf die Übergabe der Position oder das Verfahren der x- und y-Achse, zugegriffen werden. Die Befehlsübergabe lehnt sich an eine NC-Steuerung an.

## 5 Komponentenentwicklung

Die unterschiedlichen Module werden über eindeutige Bezeichnungen aufgerufen. Durch die Übergabe von Koordinaten sowie der auszuführenden Befehle können Kavitäten, Kanäle oder elektrische Leiterbahnen automatisiert erzeugt werden. Das Verfahrprogramm, bestehend aus den Verfahransätzen (WEIDAUER 2013), wird der Steuerung durch das Laden einer Textdatei übergeben. Ein exemplarisches Programm für die Erzeugung eines Kanals findet sich in Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Exemplarisches Verfahrprogramm zur Erzeugung eines Kanals

Nummer	Befehl	Erläuterung
1	t1	Auswahl Modul 1 (Unterdrucksystem)
2	x0 y50	x- und y- Wert der Startposition
3	g1	Unterdruck einschalten
4	z25	Absenken der z-Achse (Verfahransatz 25)
5	x10 y50	Verfahren zur neuen Position
6	z0	Anheben der z-Achse auf Transporthöhe
7	g0	Unterdruck ausschalten

Zur automatisierten Erzeugung von Kavitäten können über spezifische Befehlsätze unterschiedliche Aussaugstrategien vorgesehen werden. Durch den Befehl z# wird die z-Position mit der entsprechenden Nummer angefahren, der Befehl e0 beendet den Befehlssatz. Durch die Übergabe der Information, welches SMD eingelegt werden soll, werden die Koordinaten der einzelnen Positionen inkl. Spaltbreite automatisiert berechnet. Folgende Abbildung stellt die hinterlegten Zwischenpositionen sowie den Verfahrweg von zwei alternativen Aussaugstrategien dar.

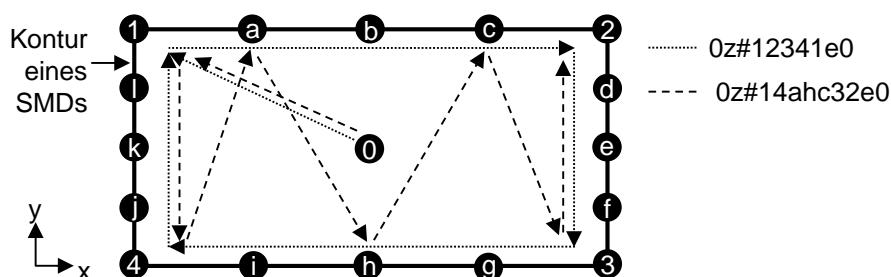


Abbildung 5-12: Zwischenpositionen für die automatisierte Erzeugung von Kavitäten sowie Verfahrweg zweier möglicher Befehlssätze

### 5.6 Zusammenfassung

Für die Entwicklung einzelner Module wurde zunächst der jeweilige Soll-Prozess mithilfe eines Funktionsmodells beschrieben und anschließend wurden die

Anforderungen an die zu entwickelnden Module definiert. Dann wurden die mechanische und die softwaretechnische Umsetzung der einzelnen Module beschrieben.

Die in Kapitel 5 entwickelten Komponenten erfüllen die zuvor definierten spezifischen Anforderungen. Bereits bei der Entwicklung wurde auf eine hohe Flexibilität und eine gute Erweiterbarkeit der Module geachtet, wodurch nun unterschiedliche Werkzeuge zur Materialabgabe bzw. zur Erzeugung der Kavitäten eingesetzt werden können. Die implementierte Steuerung erlaubt nicht nur die freie Positionierung der Module im Baufeld, sondern auch die Beeinflussung einzelner Prozessparameter, so z. B.:

- der Achsengeschwindigkeit der x-Achse des 3D-Druckers,
- der Geschwindigkeit des Dispenserkolbens und
- des Abstandes der zusätzlich integrierten z-Achsen von der Pulverbettfläche.

Aufgrund technischer Rahmenbedingungen konnte die Verfahrensgeschwindigkeit des Schrittmotors zum Heben und Senken des Multimaterialmoduls nicht variiert werden. Die ermittelte Geschwindigkeit betrug 1,82 mm/s.

Der Einfluss dieser und weiterer Parameter auf die Eigenschaften der elektrischen Leiterbahnen bzw. auf die geometrischen Abmessungen der erzeugten Vertiefungen wird im folgenden Kapitel untersucht.



# 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

## 6.1 Vorgehen im Kapitel

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die Eigenschaften der entwickelten Prozesse und Anlagenmodule sowie des Leitklebstoffs einschließlich ihrer Ermittlung beschrieben.

Die Probekörper für die Versuche wurden aus dem Material PolyPor-Pulver Typ A unter Einsatz des PolyPor-Binders Typ A erzeugt. Der prozentuale Anteil der Bindermasse zur Pulvermasse betrug 15 Prozent, die Schichtdicke des 3D-Druckprozesses 150  $\mu\text{m}$ . Um eine Vergleichbarkeit sowie eine Wiederholbarkeit der Ergebnisse trotz einer sich zeitlich verändernden dynamischen Viskosität des Leitklebstoffs gewährleisten zu können, wurden alle Versuche direkt nach dem Mischen des 2K-Klebstoffes bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen durchgeführt. Eine Sicherstellung der konstanten Materialeigenschaften wurde durch die Ermittlung des Massenstroms vor jedem Experiment und den Abgleich des Ist-Wertes mit dem Soll-Wert erreicht.

Im Anschluss an die Analyse des leitfähigen Materials wurden die relevanten Prozessparameter der einzelnen in Kapitel 5 entwickelten Module variiert und deren Auswirkungen auf die elektrischen Eigenschaften der Leiterbahnen und auf die Abmessungen der Leiterbahnen und Vertiefungen aufgenommen.

Eine Bewertung des entwickelten Gesamtsystems gemäß den in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen erfolgt zum Schluss des Kapitels.

## 6.2 Materialeigenschaften und -bewertung

### 6.2.1 Allgemeines

Zur Ermittlung der Eigenschaften des Materials für den Einsatz während des 3D-Druckprozesses wurde im Rahmen unterschiedlicher Versuchsreihen zunächst die Verarbeitbarkeit des Leitklebstoffs mit dem Multimaterialmodul näher analysiert (vgl. Abschnitt 6.2.2), bevor das Verhalten des Materials auf der Pulverbettoberfläche (vgl. Abschnitt 6.2.3), der erzeugte Übergangswiderstand bei einer Ankontaktierung (vgl. Abschnitt 6.2.4) sowie der Einfluss der Trocknungsdauer auf den Widerstandswert (vgl. Abschnitt 6.2.5) betrachtet wurden. Weitergehende Untersuchungen beinhalteten die Reaktion des Materials auf thermische Wechselzyklen (vgl. Abschnitt 6.2.6) und unter Beaufschlagung mit einer elektrischen

Last (vgl. Abschnitt 6.2.7). Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen bewertet (vgl. Abschnitt 6.2.8). Gegenüber dem vom Hersteller vorgegebenen Parametersatz wurde der Druckprozess für die Erzeugung der Probekörper nicht geändert.

### 6.2.2 Verarbeitbarkeit mit dem Multimaterialmodul

Die Zielgröße der Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit war die Abgabe eines konstanten Massenstroms. Zu ihrer Analyse wurde mit unterschiedlichen, standardisierten Dosiernadeln (Innendurchmesser 0,25, 0,33 und 0,41 mm) und unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Dispenserkolbens Leitklebstoff in eine Aufschale abgegeben und nach 30 Sekunden wurde die Masse des Leitklebstoffs mit einer Waage (Kern KB 120-3N) bestimmt. Zeitabhängige Einflüsse auf den Massenstrom, beispielsweise ein möglicher Druckaufbau im Multimaterialmodul, konnten durch die gewählte Dosierzeit gering gehalten werden. Die Versuche wurden pro Parameter jeweils dreimal durchgeführt. Erst ab einem Innendurchmesser von 0,41 mm konnte ein konstanter Materialfluss erzeugt werden. Für Dosiernadeln mit Innendurchmesser kleiner oder gleich 0,33 mm ergaben sich temporäre Abbrüche bei der Materialabgabe.

Ausgehend von einem inkompressiblen Fluid ohne Lufteinschlüsse lässt sich der theoretische maximale Volumenstrom  $Q$  nach OTHMAN (2005) berechnen:

$$Q = r_{\text{Kolben,innen}}^2 \cdot \pi \cdot v_K \quad (\text{Gl. 6-1})$$

mit

$v_K$ :                    Geschwindigkeit des Dispenserkolbens  
 $r_{\text{Kolben,innen}}$ :    Innenradius der Spritze

Die Auswertung der Versuche mit einer Dosiernadel mit einem Innendurchmesser von 0,41 mm liefert eine lineare Abhängigkeit des Massenstroms von der Geschwindigkeit des Kolbens (vgl. Abbildung 6-1). Der maximale Massenstrom kann problemlos mit der konstanten Dichte des Materials und dem theoretischen Volumenstrom berechnet werden (vgl. Gl. 6-1).

Die Schwankungen lagen bei  $\pm 0,4$  mg/s bis 1,0 mg/s, was im Mittel einer relativen Abweichung von acht Prozent entspricht. Mehrere Messreihen zeigten stets den linearen Zusammenhang, variierten aber im Ordinatenabschnitt. Abweichungen zwischen dem berechneten und den experimentell ermittelten Massenströmen können auf variierende Werte der dynamischen Viskosität des Leitklebstoffs und

somit auf Reibungseffekte zwischen der Flüssigkeit und den Wänden zurückgeführt werden.

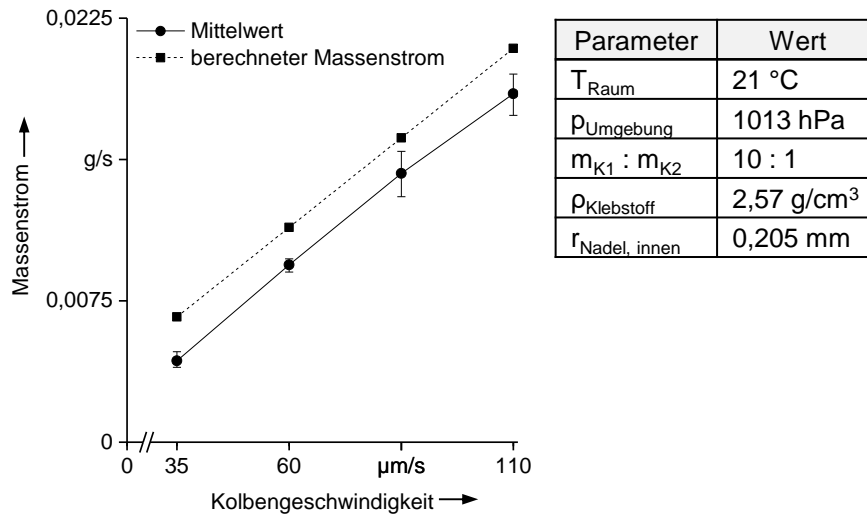


Abbildung 6-1: Massenstrom unter Einsatz einer Dosiernadel mit einem Innendurchmesser von 0,41 mm.

### 6.2.3 Verhalten auf der Pulverbettoberfläche

Zur Identifikation des Verhaltens des Leitklebstoffs auf einem Pulverbett wurde zunächst eine Leiterbahn auf einer PMMA-Pulverbettoberfläche erzeugt. Als Referenzmaterial diente eine Probe mit einer Leiterbahn auf einer Plexiglasplatte, die mit der gleichen Leitklebstoffmischung und identischen Auftragsparametern hergestellt wurde.

Nach einer Trocknungsphase bei Raumtemperatur weist das Pulverbett unterhalb des Leitklebstoffs eine lokale Verfärbung des Pulvermaterials auf. Nähere Untersuchungen des Randbereiches mit einem Rasterelektronenmikroskop (Hitachi TM-3030Plus Tabletop SEM) verdeutlichen, dass das im Leitklebstoff enthaltene Epoxidharz teilweise in das poröse Pulverbett eindringt und dort aushärtet. Die Leiterbahnen auf der Plexiglasplatte haben im Vergleich zu den Leiterbahnen auf dem Pulverbett einen deutlich breiteren Randbereich, der auf ein Zerfließen des Epoxidharzes auf der Oberfläche hinweist.

Abbildung 6-2 zeigt die SEM-Aufnahmen der Leiterbahnen sowohl auf der Plexiglasplatte (links) als auch auf dem PMMA-Bauteil (rechts). Eine EDX-Analyse ergab, dass in Leiterbahnen auf einer Plexiglasoberfläche ca. drei Mal so viel und auf einer PMMA-Oberfläche ca. zehn Mal so viel Silber wie Kohlenstoff (entspricht dem Anteil von Epoxidharz) vorhanden war.

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

Auch optisch ist die höhere Packungsdichte der Silberpartikel bei der auf einer Pulverbettsoberfläche erstellten Leiterbahn im Vergleich zur Leiterbahn auf der Plexiglasplatte zu erkennen. Nach LI ET AL. (2010) führt eine höhere Packungsdichte der Silberpartikel zu einer Verringerung des elektrischen Widerstandes. Dies bestätigen 4-Punkt-Widerstandsmessungen, die an drei unterschiedlichen Positionen an den elektrischen Leiterbahnen beider Probekörper durchgeführt wurden. Der gemittelte spezifische Widerstand der Leiterbahn auf dem Pulverbett beträgt  $3,6 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  und auf der Plexiglasplatte  $460,9 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

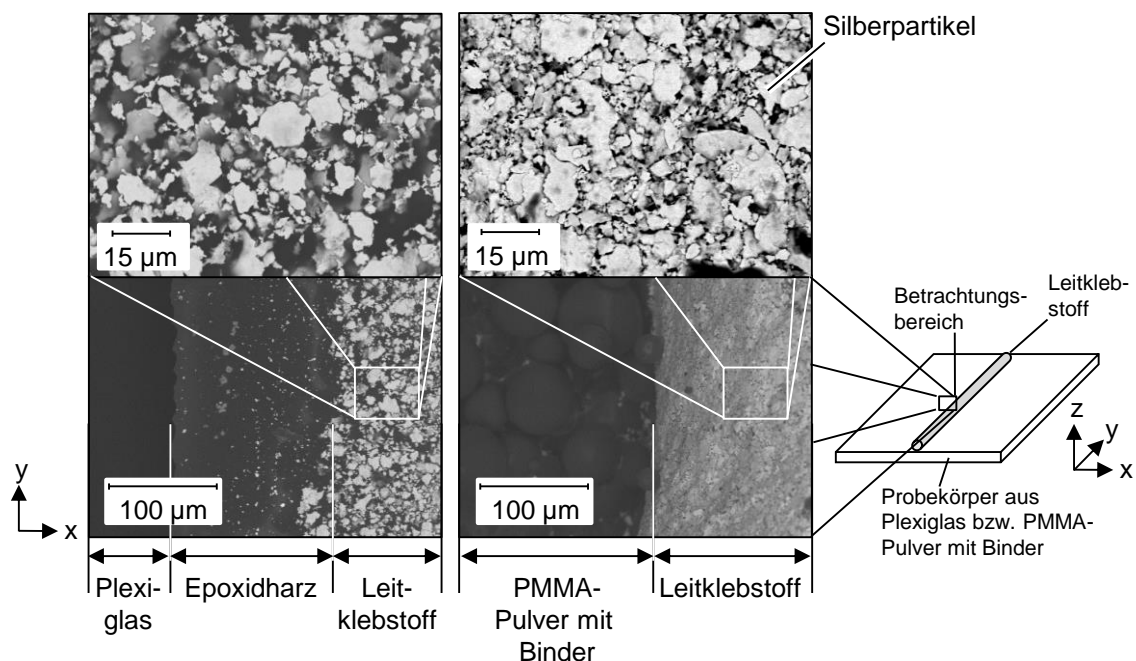


Abbildung 6-2: Messposition sowie SEM-Aufnahme der Leitklebstoffoberfläche im Randbereich; links: Leiterbahn auf einer Plexiglasplatte; rechts: Leiterbahn auf einer PMMA-Pulverbettsoberfläche

### 6.2.4 Übergangswiderstand der Ankontaktierung

Im Folgenden wird zur Klärung der Anforderung A3 die Verbindung zwischen einer Leiterbahn und einer elektrischen Komponente bewertet. Zur Ermittlung des Übergangswiderstands wurden unterschiedlich große Widerstände, deren Werte zuvor mithilfe einer 4-Punkt-Widerstandsmessung genau bestimmt wurden, mit der in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Methode in einen Probekörper integriert. Nach der Erzeugung der Leiterbahnen und einem anschließenden Trocknungsprozess bei  $40^\circ\text{C}$  über 4 Stunden hinweg im Ofen wurde der elektrische Widerstand über die Leiterbahnen anhand einer 4-Punkt-Widerstandsmessung bestimmt. Zur Berechnung des Übergangswiderstandes wird der zuvor ermittelte Wert der



elektrischen Komponente von dem gemessenen Widerstandswert subtrahiert. Zusätzlich wurden  $0,04 \Omega$  für den zuvor ermittelten Widerstand der Leiterbahn abgezogen.

Die Versuche wurden an zwei Probekörpern durchgeführt und die Messungen mindestens zweimal wiederholt. Die gemittelten Widerstandswerte sowie der Übergangswiderstand können Tabelle 6-1 entnommen werden.

*Tabelle 6-1: Übergangswiderstände für die Ankontaktierung von SMDs an die Leiterbahn eines Probekörpers*

angegebener Widerstand der Komponente in $\Omega$	ermittelter Widerstand der Komponente in $\Omega$	gemessener Widerstand in $\Omega$	Übergangswiderstand je Kontakt in $\Omega$	Toleranzabweichung je Kontakt in %
0,5	0,64	0,79	$(0,15 - 0,04)/2 = 0,055$	8,6
0,5	0,52	0,55	/	/
1,0	1,10	1,21	$(0,11 - 0,04)/2 = 0,035$	3,2
1,0	1,13	1,27	$(0,14 - 0,04)/2 = 0,05$	4,4

Der Übergangswiderstand pro Kontaktstelle beträgt im Mittel  $0,047 \Omega$ , die Messung in der zweiten Zeile wurde dabei nicht berücksichtigt. Da die gemessenen Widerstandswerte der untersuchten Komponenten selbst teilweise um mehr als 10 % vom angegebenen Wert des Herstellers abweichen, können bei einem späteren Einsatz der Komponenten, ohne vorgelagerte Ermittlung des realen Widerstandswertes, die für zwei Kontaktflächen gemittelten Toleranzabweichung des Übergangswiderstands von 10,8 % nicht eindeutig der Verbindungsstelle zugeordnet werden. Der Übergangswiderstand von einer Leiterbahn auf ein SMD kann als sehr gut bewertet und daher in den weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden.

### 6.2.5 Trocknungsdauer und Schwund

Die Trocknungsdauer des Leitklebstoffs variiert in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur. Da die mithilfe additiver Fertigungsverfahren hergestellten Probekörper nach dem Aufbauprozess für 4 Stunden bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  thermisch nachbehandelt werden müssen, wird diese Temperatur als maximaler Wert für den Sinterprozess von Leiterbahnen festgelegt. Der Trocknungsprozess wird dadurch beschleunigt (EPOXY TECHNOLOGY INC. 2015). Laut Herstellerangaben sind bei einer Temperatur von  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ca. 35 Stunden für den Trocknungsprozess notwendig.

Für die Untersuchung der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Trocknungsdauer wurden Probekörper erzeugt, in welche neben den elektrischen Leiterbahnen auch Prüfdorne für den Anschluss der Messinstrumente integriert

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

wurden. Zur besseren Ankontaktierung wurde bei der Erstellung der Leiterbahnen eine erhöhte Menge an Leitklebstoff aufgetragen. Die elektrischen Leiterbahnen hatten eine Breite von ca. 2 mm und eine Höhe von ca. 1 mm. Der elektrische Widerstand wurde über eine Distanz von 10 mm mithilfe einer 4-Punkt-Widerstandsmessung sekundlich ermittelt. Zur Überwachung der Temperatur im Probekörper wurde dort zusätzlich ein Temperatursensor TD5A der Marke *Honeywell* verbaut und die Messwerte wurden sekundlich erfasst. Die mit diesem Sensor erreichbare Genauigkeit liegt bei ca.  $\pm 2$  Kelvin. Zur Kontrolle der vom Temperatursensor gemessenen Werte wurde ein Thermometer der Firma *Fluke* mit in den Ofen gelegt. Die Messungen wurden an zwei Probekörpern durchgeführt, wobei die Reaktion des Leitklebstoffs bei beiden identisch war. Das Ergebnis einer Messung ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

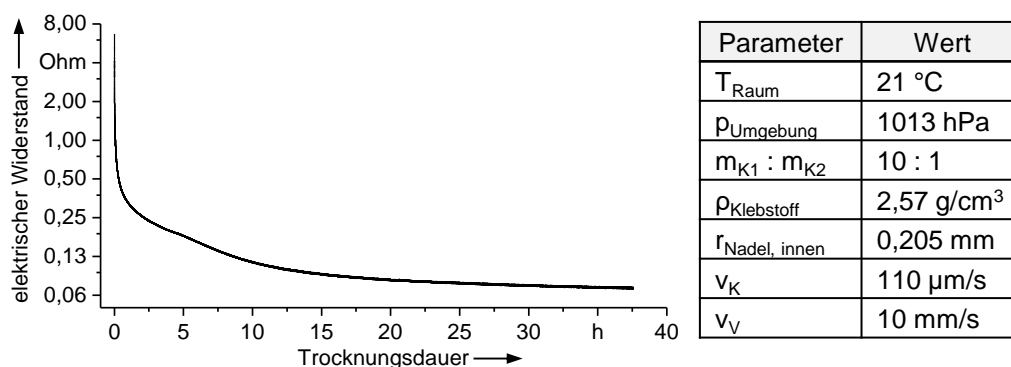


Abbildung 6-3: Änderung des elektrischen Widerstandes einer Leiterbahn über den Zeitraum der Trocknung des Leitklebstoffs

Nach 34 Stunden wurde keine wesentliche Veränderung des elektrischen Widerstandswertes gemessen. Dies stimmt mit der vom Hersteller empfohlenen Trocknungsdauer überein. Eine zusätzliche Kontrollmessung nach vier Tagen bestätigte den finalen Widerstandwert von  $0,07 \Omega$  bei einer Messlänge von 10 mm.

Zur Ermittlung des Schwindungsverhaltens durch den Trocknungsprozess wurden in einem zusätzlichen Versuch elektrische Leiterbahnen auf einer PMMA-Oberfläche erzeugt. Unter Verwendung eines Auflichtmikroskops wurden im Minutentakt über fünf Stunden photographische Aufnahmen gemacht (vgl. Abbildung 6-4). Der Probekörper härtete in dieser Versuchsreihe an der Luft aus. Die Einzelbilder wurden hinsichtlich der Änderung der Leiterbahnbreite untersucht. In den letzten Aufnahmen konnte keine wesentliche Veränderung der Oberfläche mehr identifiziert werden. Neben einer Änderung der Breite der Leiterbahn von ca. 0,01 mm fand eine sichtbare Zunahme der Oberflächenrauheit statt. Dies lässt sich mit der

Erkenntnis aus Abschnitt 6.2.2 begründen. Durch das Eindringen des Epoxidharzes in das Grundmaterial kommt es zu einer Erhöhung der Packungsdichte, was gleichzeitig zu einer rauer werdenden Oberfläche der Leiterbahn führt.

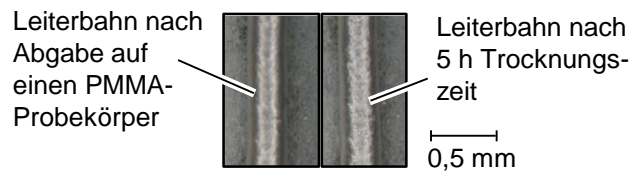


Abbildung 6-4: Aufnahmen der Leiterbahnen zur Ermittlung des Schwindungsverhaltens

Ein vergleichbarer Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und der Temperatur wurde bei den Versuchen mit einem im Probekörper verbauten SMD ermittelt. Die gemessenen Werte am Ende der Trocknungszeit (abzüglich des Wertes des eingebauten elektrischen Widerstandes) unterscheiden sich von denen ohne verbautes SMD um ca.  $0,05 \Omega$ . Diese Differenz entspricht dem ermittelten Wert für den Übergangswiderstand an den Kontaktstellen (vgl. Abschnitt 6.2.4) und lässt sich dadurch erklären.

### 6.2.6 Reaktion auf thermische Wechselzyklen

Zur Ermittlung der Reaktion des Leitklebstoffs auf Temperaturzyklen wurden die Probekörper in einem Ofen mehrmals auf ca.  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgeheizt und anschließend wieder abgekühlt. Die Temperatur sowie der elektrische Widerstand der Leiterbahn wurden entsprechend den Versuchen aus Abschnitt 6.2.5 kontinuierlich erfasst. Das Ergebnis einer Versuchsreihe ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

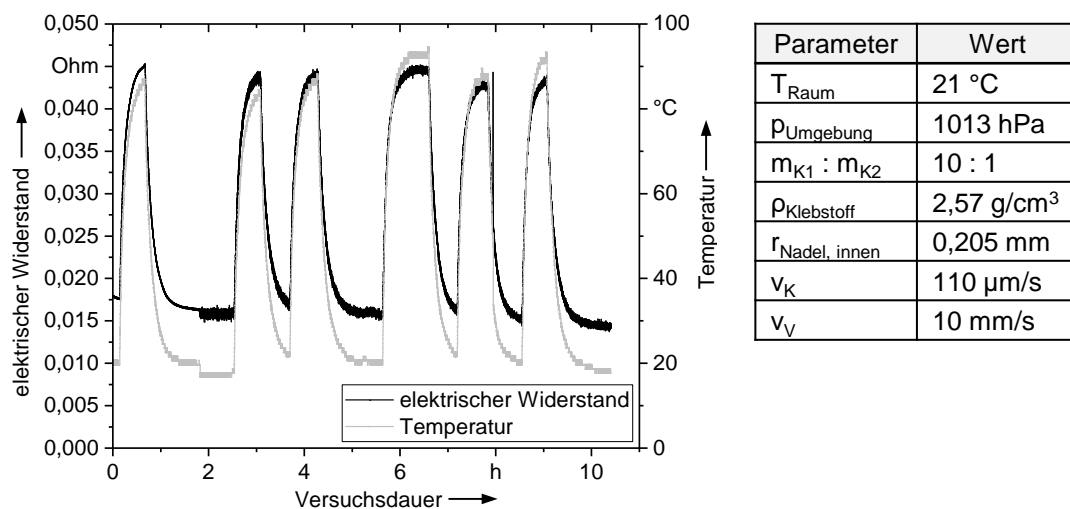


Abbildung 6-5: Verlauf des Leiterbahnwiderstandes und der Bauteiltemperatur bei einem Temperaturzyklen-Versuch

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

Ein anderes Verhalten des Leiterbahnwiderstandes konnte bei dem ersten Aufheizzyklus ermittelt werden (in Abbildung 6-5 nicht dargestellt). Der Widerstand stieg bis zu einer Temperatur von ca. 80 °C an. Bei einer weiteren Erhöhung der Temperatur begann der Widerstand zu sinken. Eine mögliche Erklärung dafür könnte eine temperaturbedingte Ausdehnung des Epoxidharzes sein, wodurch sich der Abstand zwischen den Silberpartikeln vergrößert und somit der elektrische Widerstand ansteigt. Aufgrund der Verringerung der dynamischen Viskosität bei der Haltetemperatur wird das Eindringen des Epoxidharzes in das Pulverbett begünstigt. Das Fehlen des Isolationsmaterials führt nun zu einem Anstieg der Anzahl der Kontaktpunkte der Silberpartikel und folglich zu einem Absinken des elektrischen Widerstandes. Das spezifische Verhalten beim ersten Aufheizvorgang zeigte sich auch bei dem Versuch mit einem integrierten SMD (Abbildung 6-6).

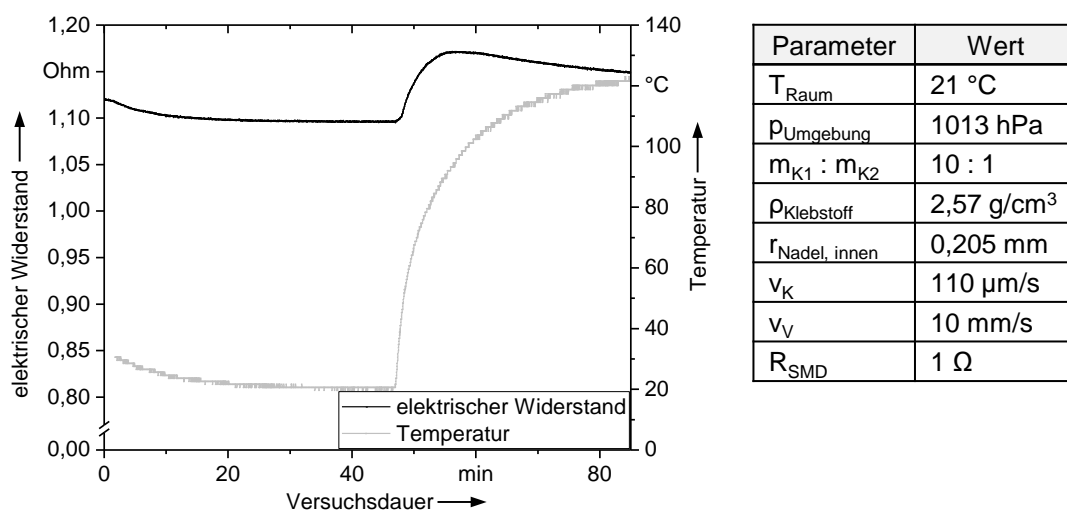


Abbildung 6-6: Verlauf des Widerstandes bei dem erstmaligen Aufheizvorgang mit einem integrierten SMD (Widerstand des SMDs = 1  $\Omega$ )

Die Differenz des elektrischen Widerstandes vor und nach den Temperaturzyklen betrug 0,001  $\Omega$  und lag somit im Rahmen des Messfehlers. Eine dauerhafte Beeinflussung des elektrischen Widerstands einer Leiterbahn nach den Temperaturzyklen war nicht erkennbar. Die gleichen Erkenntnisse ergaben sich bei den Probekörpern mit integriertem SMD. Eine Beeinflussung der Kontaktstellen durch die Wechselzyklen ist nicht ersichtlich.

Der Widerstand der Leiterbahn ist allerdings abhängig von der Temperatur. Zur genaueren Untersuchung dieses Zusammenhangs wurde der Probekörper in 20-Kelvin-Schritten von Raumtemperatur auf 100 °C bei gleichzeitiger Widerstandsmessung erwärmt (vgl. Abbildung 6-7).

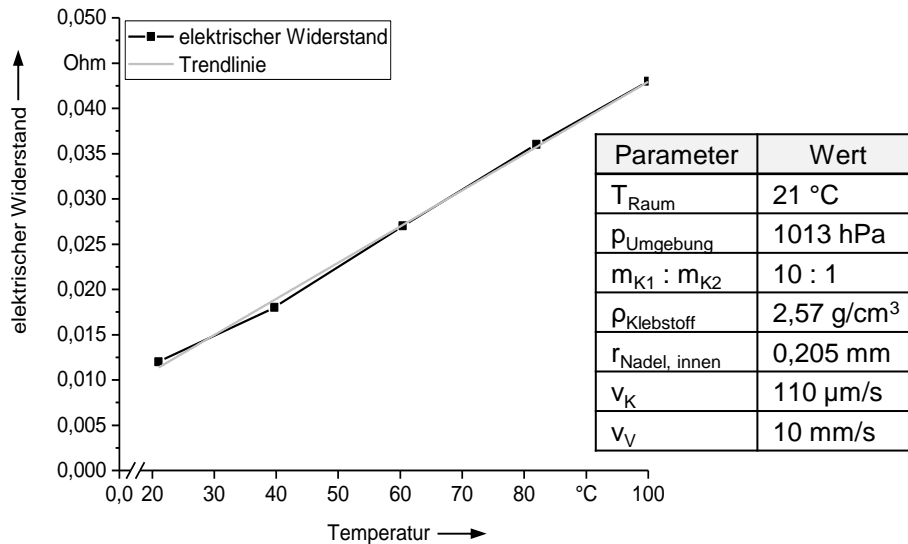


Abbildung 6-7: Widerstand einer Leiterbahn bei unterschiedlichen Temperaturen

Gemäß dem Drude-Modell (DRUDE 1900) kommt es zu einem Anstieg des elektrischen Widerstandes mit steigender Temperatur. Das Modell beschreibt die zunehmende Anzahl an Kollisionen der Elektronen mit den Gitterionen des Metalls bei steigender Temperatur und die daraus resultierende Zunahme des elektrischen Widerstandes.

Bei dem hier eingesetzten Leitklebstoff lässt sich der Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9988 durch die Gleichung 6-2 beschreiben:

$$y = 0,0004 \cdot x + 0,0031 \quad (\text{Gl. 6-2})$$

Neben den langsamen Temperaturwechselzyklen wurden auch schlagartige Temperaturänderungen vorgenommen und die Reaktion darauf untersucht. Ziel dabei war die Erzeugung von Spannungsrissen in der Leiterbahn, die aufgrund des reduzierten Anteils an Epoxidharz und der daraus folgenden verringerten Elastizität des Materials erwartet wurden. Zur Untersuchung dieses Zusammenhangs wurde ein Probekörper mehrmals auf 80 °C bis 100 °C aufgeheizt und anschließend mithilfe eines Kältesprays innerhalb weniger Sekunden auf bis zu -30 °C abgekühlt. Wie bei den vorhergehenden Versuchen wurden der elektrische Widerstand der Leiterbahn und die Temperatur sekundlich erfasst. Die dabei ermittelten Werte für den letzten Versuchszyklus mit anschließender Lagerung des Probekörpers bei Raumtemperatur können der Abbildung 6-8 entnommen werden.

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

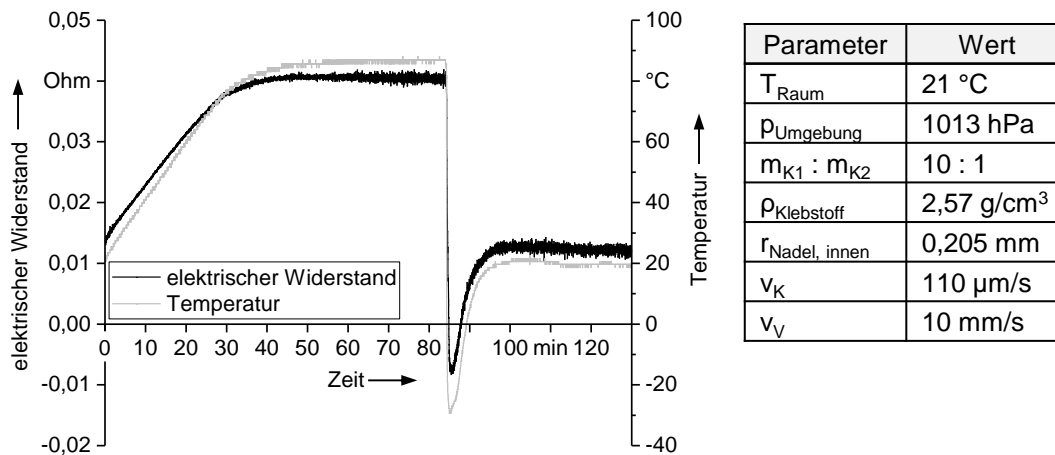


Abbildung 6-8: Ohmscher Widerstand bei schlagartigen Temperaturänderungen mit anschließender Lagerung bei Raumtemperatur

Der erfasste Wert des elektrischen Widerstandes betrug vor und nach den Temperaturbehandlungen  $0,012 \Omega$  bei einer Messlänge von 10 mm, weshalb von einer Beschädigung der Leiterbahn durch rasche Temperaturwechsel nicht auszugehen ist. Die Oberflächen der Leiterbahnen zeigten unter dem Lichtmikroskop keine Anzeichen von Spannungsrissen. Eine Beschädigung der Ankontaktierungspunkte bei den Probekörpern mit integriertem SMD konnte anhand einer optischen Kontrolle nicht festgestellt werden.

Auffällig war ein über mehrere Minuten reproduzierbar messbarer negativer Wert des elektrischen Widerstandes. Eine mögliche Ursache hierfür könnte der Seebeck-Effekt sein, der bedeutet, dass bei einer Temperaturdifferenz zwischen zwei verschiedenen elektrischen Leitern zwischen den Kontaktstellen eine elektrische Spannung entstehen kann (GROTE & FELDHUSEN 2011). Da das Material der Pins sich von dem des Leitklebstoffs unterscheidet, kann dies als Ursache für den Seebeck-Effekt vermutet werden.

### 6.2.7 Reaktion auf eine elektrische Belastung

Unter Berücksichtigung des späteren Einsatzbereichs der Werkstücke wird von Schaltungen für Kleinspannungen mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 5 Watt ausgegangen. Für die Untersuchung des Verhaltens des Leitklebstoffs unter einer elektrischen Belastung wurde mithilfe eines Probekörpers ein einfacher Schaltkreis mit Widerständen erzeugt und anschließend mithilfe eines Labornetzgeräts mit 12 V beaufschlagt. Durch die Änderung des Widerstandswertes im Labornetzgerät konnte die Stromstärke und damit die elektrische Leistung zwischen einem und fünf Watt eingestellt werden. Über den eingebauten Temperatursensor wurden die Einflüsse auf die elektrische Leiterbahn aufgezeichnet.

Ein Vergleich des elektrischen Widerstandes vor und nach den Versuchen ergab eine weitere Verringerung des Widerstandswertes um  $0,005 \Omega$  auf  $0,012 \Omega$  bei einer Messlänge von 10 mm. Eine Ursache könnte der Vorgang *elektrisches Sintern* sein, das erstmals von ALLEN ET AL. (2008) vorgestellt wurde. Dabei wachsen die Partikel des leitfähigen Stoffes aufgrund einer intrinsischen Erwärmung zusammen, wodurch der elektrische Widerstand der Leiterbahn sinkt (WERNER 2014). Temperaturänderungen der Leiterbahn während der Leistungsversuche größer 1 Kelvin konnten jedoch nicht festgestellt werden. Eine weitere Ursache für die Verringerung des Widerstandswertes könnten Messungenauigkeiten oder eine Änderung des Übergangswiderstandes an den Messspitzen sein.

Bei der Untersuchung des Probekörpers mit integriertem SMD wurde im abschließenden Versuch die Leistungsgrenze des eingebauten SMDs überschritten und dieses zerstört. Eine Aussage über eine Beeinflussung der Kontaktstellen bei einer maximalen elektrischen Belastung von 5 W kann daher nicht getroffen werden. Bei Leistungen, die unterhalb des Maximalwerts liegen, konnte bei einer elektrischen Belastung im Rahmen des üblichen Einsatzfeldes kein Einfluss auf die elektrische Komponente und auf die Leiterbahn festgestellt werden. Weiterhin kam es im vorgesehenen Arbeitsbereich zu keiner Beschädigung der Kontaktstellen.

### 6.2.8 Bewertung des Leitklebstoffs

Der ausgewählte Leitklebstoff erfüllt die Anforderungen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit sowie des Verhaltens bei thermischen und elektrischen Einflüssen. Der Nachteil von Leitklebstoffen in Bezug auf die geringe mechanische Belastbarkeit der Kontaktstellen kommt nicht zum Tragen. Aufgrund der Einbettung der SMDs und der Leiterbahnen in die Vertiefungen werden beide durch das Pulvermaterial fixiert. Dadurch wird eine relative Bewegung vermieden.

## 6.3 Eigenschaften und Bewertung des Multimaterialmoduls

Zur Ermittlung der Eigenschaften des Multimaterialmoduls bezüglich eines Einsatzes während des 3D-Druckprozesses wurden zunächst die für die Erstellung von zweidimensionalen Leiterbahnen relevanten Prozessparameter definiert. Anhand experimenteller Untersuchungen wurde dann ihr Einfluss auf die geometrischen Abmessungen der Leiterbahnen sowie auf den elektrischen Widerstand ermittelt (Abschnitt 6.3.1). Anschließend wurde die Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen analysiert. Auch hier wurden zunächst die relevanten Parameter identifiziert und ihr Einfluss auf die geometrischen Abmessungen, auf den elektrischen Widerstand und auf den Übergangswiderstand von einer horizontalen zu ei-

ner vertikalen Leiterbahn untersucht (vgl. Abschnitt 6.3.2). Eine technische Bewertung des Multimaterialmoduls erfolgt in Abschnitt 6.3.3.1. Die Probleme, die sich während der Versuche ergaben, werden in Abschnitt 6.3.3.2 und 6.3.3.3 erläutert.

### 6.3.1 Erzeugung zweidimensionaler elektrischer Leiterbahnen

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen wurden die Versuche zur Erzeugung zweidimensionaler Leiterbahnen unter Einsatz einer Dosiernadel mit einem Innendurchmesser von 0,41 mm durchgeführt.

Da der elektrische Widerstand als Zielgröße (Anforderung L1) von der Materialkonstante *spezifischer Widerstand* und den Abmessungen der Leiterbahn (Querschnittsfläche und Länge) abhängig ist, wird für die Untersuchung der Eigenschaften des Multimaterialmoduls zunächst der Fokus auf die Erzeugung von Leiterbahnen mit minimalen geometrischen Abmessungen (Anforderung L2) gelegt. Eine Bewertung der Versuchsdurchführung erfolgt in Abschnitt 6.3.3.2.

#### 6.3.1.1 Relevante Einflussparameter

Als Einflussparameter auf die Abmessungen einer Leiterbahn wurden die Abgabemethode, die Verfahrgeschwindigkeit des Gesamtsystems über die x- bzw. y-Achse des 3D-Druckers, der Abstand der Dosiernadel von der Pulverbettfläche und die Verfahrgeschwindigkeit des Kolbens und damit der abgegebene Massenstrom des Multimaterialmoduls identifiziert. Die Raumtemperatur wird als konstant und die dynamische Viskosität des Leitklebstoffs als gegeben vorausgesetzt. Die Probekörper wurden aus dem Material PolyPor-Pulver Typ A unter Einsatz des Binders PolyPor-Binder Typ A mit einem Bindereintrag von 15 % und einer Pulverschichtdicke von 150 µm erzeugt. Die Wahl der Faktorstufen für den Versuchsplan basiert auf theoretischen Berechnungen bzw. auf Erfahrungen, die im Laufe der ersten Versuche gewonnen werden konnten.

##### Abgabemethode

Verglichen wurden unterschiedliche Abgabemethoden: die sich wiederholende punktuelle Abgabe eines Leitklebstofftropfens mit einem anschließenden Verfahren der x-Achse um 1 mm und die kontinuierliche Abgabe des Materials bei gleichzeitiger Bewegung der Achse. Die dadurch erzeugten elektrischen Leiterbahnen wurden unter einem Auflichtmikroskop (Nikon SMZ1000 mit einer Kaltlichtquelle Schott KL 1500 LCD) analysiert (vgl. Abbildung 6-9).



### 6.3 Eigenschaften und Bewertung des Multimaterialmoduls

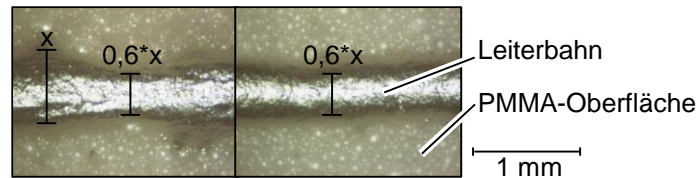


Abbildung 6-9: Vergleich der unterschiedlichen Abgabemethoden; punktuelle Abgabe mit anschließendem Versatz der Achse (links) und kontinuierliche Materialabgabe während des Verfahrens (rechts)

Die Leiterbahnen, die durch eine punktuelle Abgabe erzeugt wurden, weisen sichtbare Inhomogenitäten in der Breite auf. Diese entstehen durch eine erhöhte Materialabgabe an der Abgabeposition mit einem anschließenden Nachziehen des Leitklebstoffs, der an der Dosiernadel haftet. Dadurch werden schmälere Verbindungen zwischen zwei Abgabepunkten erzeugt. Die Leiterbahn mit einer kontinuierlichen Abgabe des Materials weist hingegen eine vergleichsweise homogene Breite auf. Diese Methode wurde daher für die folgenden Untersuchungen präferiert.

#### Verfahrensgeschwindigkeit des Gesamtsystems

Für diese Einflussgröße wurden im Rahmen einer Voruntersuchung Leiterbahnen mit unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten der Anlagenachsen erzeugt und anschließend optisch hinsichtlich der Homogenität der Materialabgabe bewertet. Dabei kam es ab einer Verfahrensgeschwindigkeit der x-Achse von 60 mm/s zu sichtbaren Schwingungen des Multimaterialmoduls und damit zu inhomogenen Leiterbahnen. Weiterhin war bei höheren Geschwindigkeiten der Massenstrom des Leitklebstoffs nicht ausreichend, wodurch Lücken in der Leiterbahn entstanden. Eine stabile Abgabe konnte bis zu einer Geschwindigkeit von 40 mm/s erreicht werden, die damit als Obergrenze definiert wurde. Als weitere Faktorstufen wurden Geschwindigkeiten von 10 mm/s, 20 mm/s und 30 mm/s ausgewählt.

#### Abstand zum Pulverbett

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Abstand der Dosiernadel zur Pulverbett-oberfläche variiert. Eine visuelle Beurteilung der Versuchsergebnisse ergab, dass Abstände  $< 1$  mm keinen maßgeblichen Einfluss auf die Abmessungen der Leiterbahn haben. Da dieser Einflussfaktor jedoch von OTHMAN (2005) als relevant eingestuft wurde, wurde er dennoch in die Untersuchung mit einbezogen. Für die Faktorstufenwahl wurde auf Literaturwerte (OTHMAN 2005) von 0,3 mm, 0,5 mm und 0,7 mm zurückgegriffen.

#### Kolbengeschwindigkeit

Aufgrund der Reibungskraft zwischen dem Leitklebstoff und der Spritzen- bzw. Dosiernadelwand ist der maximal erreichbare Volumenstrom  $i_{max}$  durch die

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

---

Schubkraft des Antriebs  $F_S$  begrenzt. Ausgehend von einer homogenen Flüssigkeit bei einer stationären Strömung lässt sich unter Verwendung des Hagen-Poiseuille-Gesetzes der maximal erreichbare Volumenstrom mit folgender Gleichung berechnen:

$$i_{max} = \frac{\pi}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{p_1 - p_\infty}{l_{Nadel}} \cdot r_{Nadel,innen}^4 \quad (Gl. 6-3)$$

mit

$i_{max}$ :	maximaler Volumenstrom
$\eta$ :	dynamische Viskosität des Leitklebstoffs
$p_1 - p_\infty$ :	Druckunterschied
$l_{Nadel}$ :	Länge der Aussaugnadel
$r_{Nadel,innen}$ :	Innenradius der Aussaugnadel

Der maximal erreichbare Druckunterschied in der Spritze lässt sich mithilfe der Schubkraft des Schrittmotors berechnen (OTHMAN 2005):

$$p_1 - p_\infty = \frac{F_S}{r_{Kolben,innen}^2 \cdot \pi} \quad (Gl. 6-4)$$

mit

$F_S$ :	Schubkraft des Motors
$r_{Kolben,innen}$ :	Innenradius des Kolbens

Der maximale Volumenstrom bei der maximalen dynamischen Viskosität des eingesetzten Leitklebstoffs (1600 mPas) beträgt damit  $8,07 \text{ mm}^3/\text{s}$ , woraus sich durch die Gleichung 6-5 eine maximale Kolbengeschwindigkeit  $v_K$  von ca.  $110 \text{ }\mu\text{m/s}$  berechnen lässt:

$$v_K = \frac{i_{max}}{r_{Kolben,innen}^2 \cdot \pi} \quad (Gl. 6-5)$$

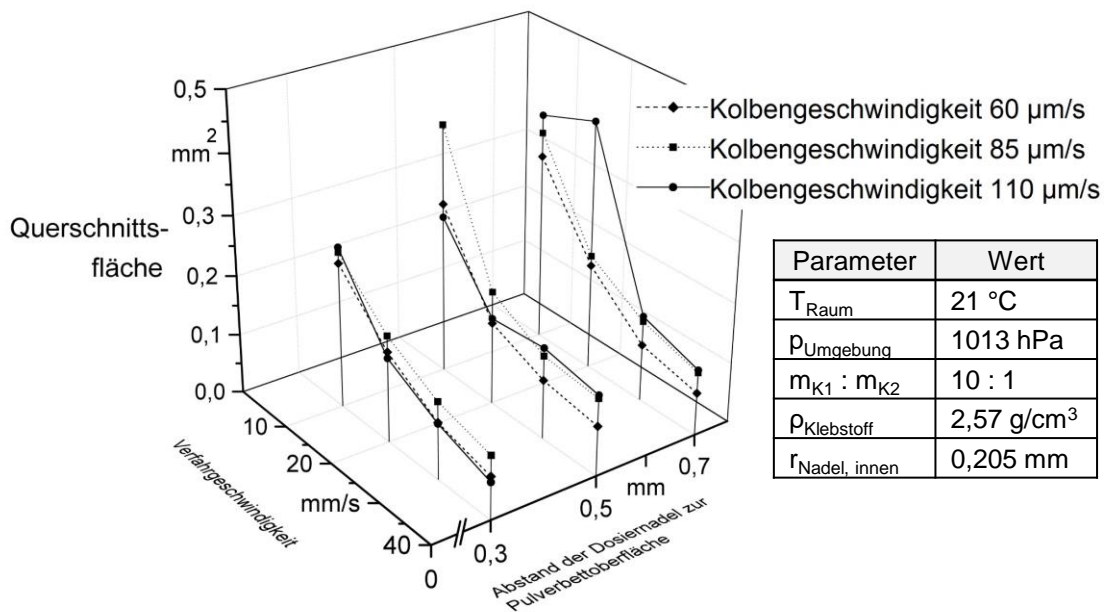
Als Faktorstufen für die Geschwindigkeit des Dispenserkolbens wurden daher  $60 \text{ }\mu\text{m/s}$ ,  $85 \text{ }\mu\text{m/s}$  und  $110 \text{ }\mu\text{m/s}$  ausgewählt.

Für jede der drei Kolbengeschwindigkeiten wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan (siehe Anhang Abschnitt 10.3) erstellt, um eine eindeutige Erfassung der Einflüsse der Parameter zu ermöglichen und Wechselwirkungen zwischen den Parametern zu erfassen.

### 6.3.1.2 Abmessungen der Leiterbahnen

Die Leiterbahnen wurden direkt nach dem Prozessschritt der Binderabgabe auf das noch feuchte Pulverbett abgelegt. Die Probekörper wurden anschließend aus dem Baufeld entnommen und einem Sinterprozess von 24 Stunden Dauer in einem Ofen bei 40 °C unterzogen. Da das PMMA-Material nahezu transparent ist, wurden die Probekörper mit Wasserlack eingefärbt, um so bei der Vermessung mit einem Lasermikroskop eine Transmission und eine Reflexion des Laserstrahls zu vermeiden.

Für die Ermittlung der Abmessungen der Leiterbahnen wurde das Lasermikroskop VK-9710K der Firma *KEYENCE Deutschland GmbH* mit einer Auflösung von  $1 \text{ nm}^2$  eingesetzt. Die Fläche der Leiterbahn wurde durch die Berechnung des Integrals zwischen den Rändern des Höhenprofils der Leiterbahn ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-10 dargestellt.



*Abbildung 6-10: Abhängigkeit der Querschnittsfläche einer Leiterbahn vom Abstand zur Pulverbettfläche, der Kolbengeschwindigkeit sowie der Verfahrensgeschwindigkeit*

Die Leiterbahnen auf den Probekörpern zeigen bei Kolbengeschwindigkeiten von  $60 \mu\text{m/s}$  und  $85 \mu\text{m/s}$  eine vergleichbare Abhängigkeit der Querschnittsflächen von den Prozessparametern. Haupteinflussfaktor ist die Verfahrensgeschwindigkeit der Anlagenachse. Außerdem haben die Kolbengeschwindigkeit und die damit verbundene Zunahme des Massenstroms einen entscheidenden Einfluss auf die Abmessungen der Leiterbahn.

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

Wie bereits durch die Vorversuche indiziert, hat der Abstand der Dosiernadel zur Pulverbettoberfläche keinen Einfluss auf die Abmessungen. Die kleinste Querschnittsfläche wurde bei einer Kolbengeschwindigkeit von  $60 \mu\text{m/s}$  und einer Verfahrgeschwindigkeit von  $40 \text{ mm/s}$  mit einem gemittelten Wert von  $0,072 \text{ mm}^2$  gemessen. Die an dieser Position bestimmte Breite der Leiterbahn beträgt  $0,49 \text{ mm}$ , die Höhe beträgt  $0,24 \text{ mm}$  (vgl. Abbildung 6-11).

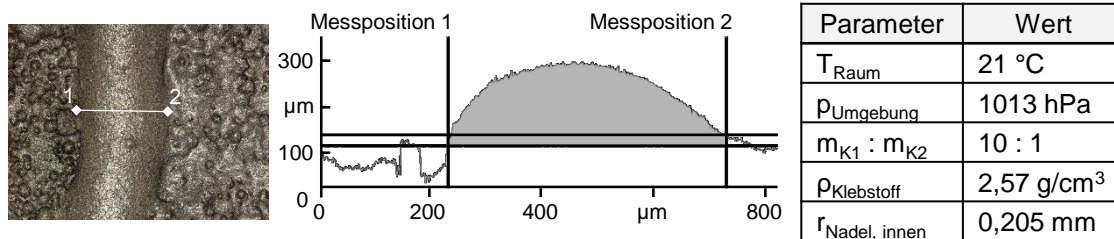


Abbildung 6-11: Abmessungen einer elektrischen Leiterbahn, die mit einer Kolbengeschwindigkeit von  $60 \mu\text{m/s}$  und einer Verfahrgeschwindigkeit von  $40 \text{ mm/s}$  erstellt wurde

Eine seitliche Aufnahme eines Probekörpers verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Verfahrgeschwindigkeit und der Querschnittsfläche (vgl. Abbildung 6-12). Bei zunehmender Geschwindigkeit bei der Materialabgabe verkleinert sich der Querschnitt der Leiterbahnen auf der Pulverbettoberfläche (vgl. gepunktete Umrandung der Leiterbahnen).

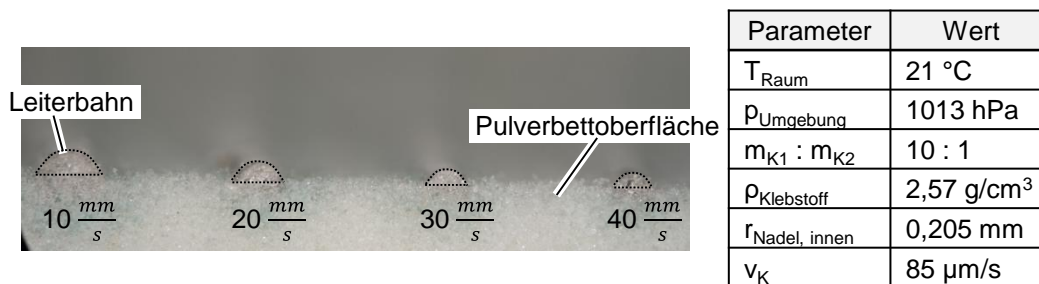


Abbildung 6-12: Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Leiterbahn von der Verfahrgeschwindigkeit

Ein abweichendes Verhalten ergab sich bei der maximal berechneten Kolbengeschwindigkeit von  $110 \mu\text{m/s}$ . Hier zeigten sich neben einer Abhängigkeit der Querschnittsfläche vom Abstand der Dosiernadelspitze von der Pulverbettoberfläche auch Unregelmäßigkeiten im Massenstrom (vgl. Abbildung 6-10).

### 6.3.1.3 Elektrischer Widerstand

Der elektrische Widerstand wurde nach der optischen Vermessung der Leiterbahnen anhand einer 4-Punkt-Widerstandsmessung unter Einsatz eines Multimeters (Firma *Keithley Instruments GmbH*, Modell 2010) ermittelt. Eine Messvorrichtung gewährleistete die Einhaltung eines definierten Messabstandes. Jede Messung wurde an drei unterschiedlichen Positionen durchgeführt, um so über lokale Einflussfaktoren zu mitteln. Die gemittelten Werte des elektrischen Widerstandes und des von den Abmessungen der Leiterbahn abhängigen spezifischen Widerstandes lassen sich aus Tabelle 6-2 ablesen.

Werden die elektrischen Widerstandswerte der Leiterbahnen unabhängig von deren geometrischen Abmessungen betrachtet, können keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen dem Widerstand und der Kolbengeschwindigkeit identifiziert werden. Der Abstand zwischen der Dosiernadelspitze und dem Pulverbett hat ebenfalls keinen Einfluss. Jedoch kam es bei einer steigenden Verfahrgeschwindigkeit des Gesamtsystems zu einer Abnahme des elektrischen Widerstandes der Leiterbahnen, ausgenommen bei einer Kolbengeschwindigkeit von 110  $\mu\text{m/s}$ .

*Tabelle 6-2: Gemittelte elektrische und spezifische Widerstände in Abhängigkeit von der Kolben- und der Verfahrgeschwindigkeit (Vergleichswert spez. Widerstand Silber als Festkörper = 0,0158  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )*

		Widerstand in $\Omega$			spezifischer Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$		
		Kolbengeschwindigkeit $v_K$			Kolbengeschwindigkeit $v_K$		
		60 $\mu\text{m/s}$	85 $\mu\text{m/s}$	110 $\mu\text{m/s}$	60 $\mu\text{m/s}$	85 $\mu\text{m/s}$	110 $\mu\text{m/s}$
Verfahrgeschwindigkeit $v_V$	10 mm/s	0,50	0,28	0,28	12,09	8,59	7,77
	20 mm/s	0,32	0,26	0,18	4,41	4,37	5,11
	30 mm/s	0,26	0,25	0,39	2,23	3,04	4,43
	40 mm/s	0,19	0,24	0,27	1,26	2,50	2,59

Der mithilfe der Querschnittsfläche der Leiterbahnen berechnete spezifische Widerstand erreichte in dieser Versuchsreihe einen Mittelwert von 4,8  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  bei einer Standardabweichung von  $\pm 3,8 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  und lag damit teilweise unterhalb der vom Hersteller angegebenen Werte. Eine Erklärung könnte der beschriebene Effekt des Einsickerns des Epoxidharzes in das Pulverbett sein, wodurch die Partikeldichte im Leitklebstoff ansteigt und der spezifische Widerstand sinkt (vgl. Abschnitt 6.2.3).

### 6.3.2 Erzeugung dreidimensionaler elektrischer Leiterbahnen

Zielgröße waren neben den Abmessungen und den elektrischen Widerständen auch die Übergangswiderstände von den horizontalen zu den vertikalen Leiterbahnen. Der Fokus der Untersuchungen lag zunächst auf den erzielbaren geometrischen Abmessungen. Eine Bewertung der Versuchsdurchführung erfolgt in Abschnitt 6.3.3.3.

#### 6.3.2.1 Relevante Einflussparameter

Als Einflussparameter auf die Abmessungen der dreidimensionalen Leiterbahnen wurden der Durchmesser der Dosiernadel zur Erzeugung der vertikalen Strukturen, die Beschaffenheit des Grundkörpers, die Geschwindigkeit des Dispenserkolbens sowie die Geschwindigkeit, mit der die Nadel vertikal aus dem Pulverbett herausgezogen wird, identifiziert. Die Raumtemperatur und die dynamische Viskosität des Leitklebstoffs wurden als konstant betrachtet. Die Probekörper wurden aus dem Material PolyPor-Pulver Typ A unter Einsatz des Binders PolyPor-Binder Typ A mit einem Bindereintrag von 15 % und einer Schichtdicke von 150  $\mu\text{m}$  erzeugt.

##### Durchmesser der Dosiernadel

Im Rahmen von Vorversuchen wurden Dosiernadeln mit Innendurchmessern von 0,25 mm, 0,33 mm, 0,41 mm, 0,51 mm und 0,71 mm eingesetzt. Bei Nadeln mit einem Innendurchmesser von 0,25 mm kam es aufgrund des Einstechvorgangs häufig zu einem Verschluss der Öffnung durch Pulverpartikel. Bei einem Innendurchmesser von 0,33 mm war dies nicht der Fall, jedoch kam es neben einem unregelmäßigen Massenstrom bei der Ermittlung des Widerstandes der dreidimensionalen Leiterbahnen oft zu fehlenden Messwerten, was auf eine fehlende Ankontaktierung hindeutet. Daher kann von keiner zuverlässigen Materialabgabe ausgegangen werden. Ab einem Innendurchmesser von 0,71 mm ist der Eindringwiderstand, den das Pulverbett der Dosiernadel entgegensetzt, zu groß, was sich in den Versuchen durch eine Verschiebung des Bauteils im Baufeld bemerkbar machte. Als am besten geeignete Dosiernadel wurde die Nadel mit einem Innendurchmesser von 0,41 mm bei einem Außendurchmesser von 0,71 mm identifiziert und im weiteren Verlauf eingesetzt.

##### Beschaffenheit des Grundkörpers

Die Beschaffenheit des Grundkörpers, in dem eine vertikale Leiterbahn erzeugt werden soll, ist abhängig vom Ausgangsmaterial, dem Binderanteil und der Zeit zwischen der Binderabgabe und dem Prozessschritt des Einstechens. Diese Faktoren beeinflussen maßgeblich die Festigkeit des Körpers und bestimmen somit den

### 6.3 Eigenschaften und Bewertung des Multimaterialmoduls

---

Eindringwiderstand. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Einstichstelle nicht mit Binder zu benetzen und so den Widerstand zu minimieren.

Ausgehend von der Anforderung, keine Veränderungen des ursprünglichen Druckprozesses vornehmen zu müssen (Anforderung A2), wurden die Faktoren *Ausgangsmaterial* und *Bindermenge* nicht verändert. Während des Prozesses kann auf den *Einstichzeitpunkt* sowie auf die *Binderabgabe an der Einstichstelle* Einfluss genommen werden. Vorversuche ergaben, dass ein vollständig mit Binder benetzter Körper das Eindringen des Werkzeugs erschwert (vgl. Abschnitt 4.2.5) und mit Binder benetzte Pulverrückstände trotz Überdruck in der Dosiernadel nicht oder nur mit hohem Kraftaufwand gelöst werden können. In den Versuchen wurden folglich die Einstichstellen beim Druckprozess nicht mit Binder benetzt. Lokal fehlendes Bindermaterial an den Einstichstellen hat nur marginale Auswirkungen auf die Gesamtfestigkeit des Körpers (siehe Anforderung A9).

Zur Ermittlung des Einflussfaktors *Einstichzeitpunkt* wurden im Rahmen eines Vorversuchs in einem Probekörper vertikale Leiterbahnen in verschiedenen Zeitabständen nach der Binderabgabe ( $t$ : 0, 10, 20 und 30 Minuten) erzeugt. Da die Herstellungsdauer des Probekörpers ca. 15 Minuten betrug, unterlagen die ersten Schichten bereits 15 Minuten länger der chemischen Verfestigungsreaktion. Die Probekörper wurden nach der Erstellung der vertikalen Leiterbahnen getrocknet und anschließend bis zur Mitte der vertikalen Leiterbahn angeschliffen. Die optische Vermessung fand an drei Stellen mithilfe eines Stereomikroskops MBS-10 der *Aktiengesellschaft Fabrik für Optische Gläser Lytkarino* mit einem Okular mit Messskala und einem Kreuztisch statt. Die gemessenen Leiterbahndurchmesser an definierten Positionen, gemittelt über drei Proben, können der Abbildung 6-13 entnommen werden.

Bereits nach einer Verweildauer von 10 Minuten konnte ein erhöhter Eindringwiderstand festgestellt werden, wodurch der Probekörper in das Pulverbett gedrückt wurde und die Nadelspitze nicht bis zur unteren Messstelle vordringen konnte. Der Eindringwiderstand steigt bei zunehmendem Anteil des Bindermaterials, das aus dem umliegenden Druckbereich in die Einstichstelle infiltriert. Die an der Atmosphäre beschleunigte Polymerisation des Materials hat eine Verfestigung der Einstichstelle zur Folge, wodurch bereits nach 30 Minuten ein Eindringen mit der Dosiernadel nicht mehr möglich war und daher nicht in Abbildung 6-13 dargestellt wird. Die Erzeugung von vertikalen Leiterbahnen muss daher direkt nach der Binderabgabe erfolgen.

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

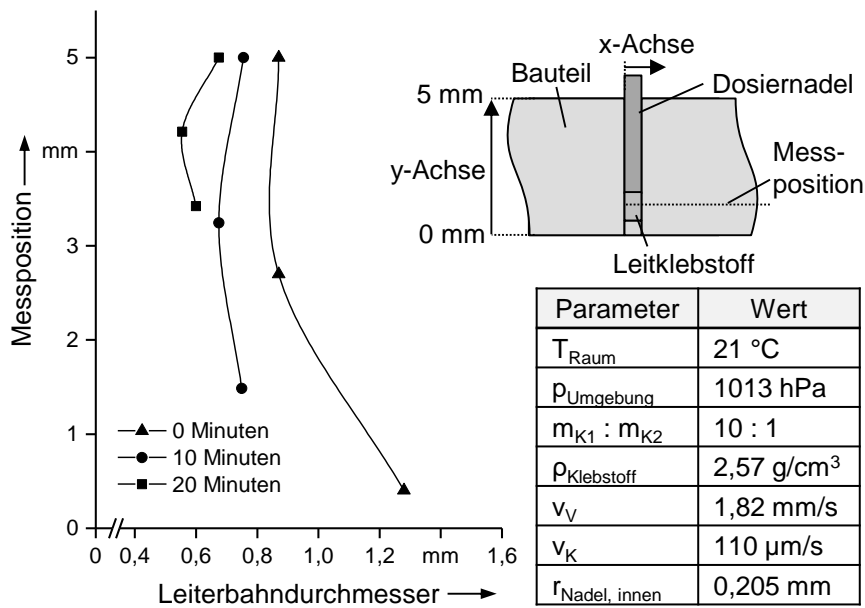


Abbildung 6-13: Gemessener Durchmesser der vertikalen Leiterbahnen, die mit einer Dosiernadel mit einem Innendurchmesser von 0,41 mm bei einer Kolbengeschwindigkeit von 110 µm/s, nach 0, 10 und 20 Minuten Wartezeit nach der Erzeugung des Probekörpers hergestellt wurden

### Herausziehgeschwindigkeit

Der Einfluss der Geschwindigkeit, mit der die Nadel relativ zum Bauteil im Pulverbett bei gleichzeitiger Abgabe von leitendem Material bewegt wird, wurde bereits bei der Erstellung von horizontalen Leiterbahnen als relevant für die geometrischen Abmessungen der vertikalen Leiterbahnen identifiziert (vgl. Abschnitt 6.3.1.1). Wie bereits in Abschnitt 5.6 beschrieben, konnte die Geschwindigkeit, mit der die Nadel vertikal aus dem Bauteil herausgezogen wird, nicht variiert werden. Die durch Messungen ermittelte Geschwindigkeit betrug 1,82 mm/s.

### Kolbengeschwindigkeit

Die für die Abgabe des Leitklebstoffs notwendige Kolbengeschwindigkeit lässt sich anhand des Volumenstroms berechnen. Das Volumen des vertikalen Kanals (Höhe  $h_v = 5$  mm) unter Einsatz einer Dosiernadel mit einem Innendurchmesser von 0,41 mm (Außendurchmesser = 0,71 mm) berechnet sich mit:

$$V = r_{\text{Nadel, außen}}^2 \cdot \pi \cdot h_v \quad (\text{Gl. 6-6})$$

Bei einer definierten Herausziehgeschwindigkeit der Dosiernadel von 1,82 mm/s ergibt sich somit ein notwendiger Volumenstrom  $Q$  von 0,72 mm<sup>3</sup>/s. Mithilfe der Gleichung 6-5 berechnet sich daraus eine theoretische Kolbengeschwindigkeit von ca. 9 µm/s. Aufgrund fehlender Erfahrungen bei der Erzeugung von vertikalen



## 6.3 Eigenschaften und Bewertung des Multimaterialmoduls

Leiterbahnen wurden, zur Sicherstellung eines hinreichenden Materialflusses, bei den Versuchen in Anlehnung an die Maximalwertberechnung in Abschnitt 6.3.1.1 bewusst deutlich höhere Kolbengeschwindigkeiten von  $60 \mu\text{m/s}$ ,  $80 \mu\text{m/s}$  und  $110 \mu\text{m/s}$  gewählt.

Bei der Versuchsdurchführung wurden zur Vereinfachung der Erzeugung einer Ankontaktierung die innenliegenden horizontalen Kanäle mit einer Breite von  $1 \text{ mm}$  erstellt. Dies erhöhte die Wahrscheinlichkeit, dass durch das Einstechverfahren die innenliegenden horizontalen Bahnen getroffen wurden. Zur Absicherung der folgenden Ergebnisse wurden sechs Versuche (jede Kolbengeschwindigkeit doppelt) mit je zwei Wiederholungen durchgeführt.

### 6.3.2.2 Abmessung der Leiterbahnen

Die Abmessungen der innenliegenden vertikalen Leiterbahnen wurden anhand von CT-Aufnahmen ermittelt (vgl. Abbildung 6-14).

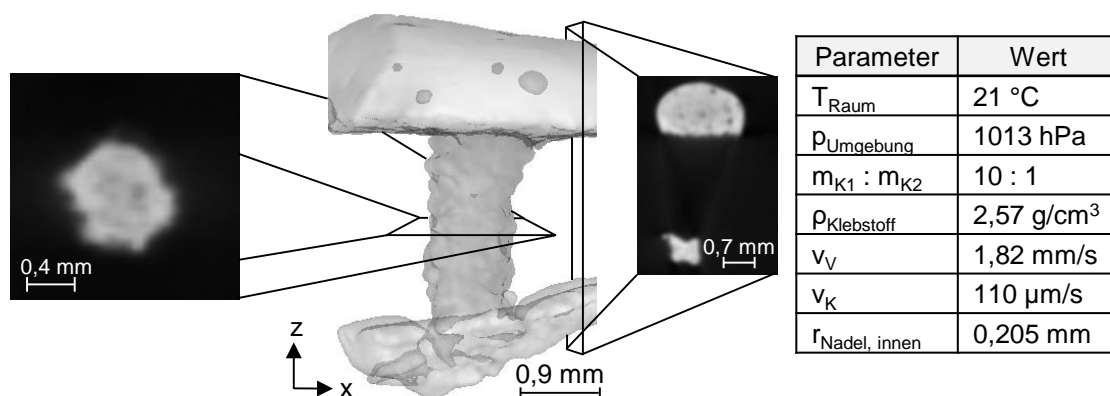


Abbildung 6-14: Darstellung einer vertikalen Leiterbahn mit den erzielten Querschnittsflächen der horizontalen und vertikalen Leiterbahnen

Die vertikalen Strukturen haben unabhängig von der Kolbengeschwindigkeit eine annähernd zylindrische Form mit einem Durchmesser von etwa  $0,95 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ . Damit liegen die Werte über dem Außendurchmesser der Dosiernadel von  $0,71 \text{ mm}$ . Dies ist der im Vergleich zur berechneten hohen Kolbengeschwindigkeit und damit der gesteigerten Materialabgabe geschuldet, die das umliegende Pulver verdrängt und den Durchmesser des Kanals vergrößert. Die Oberflächen der Leiterbahnen deuten auf eine Anpassung des Leitklebstoffs an die Pulveroberfläche des Kanals hin.

Die horizontalen Leiterbahnen weisen abhängig von ihrer Position im Probekörper eine charakteristische geometrische Form auf. Die in das Pulverbett eingebetteten

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

Leiterbahnen haben einen näherungsweise rechteckigen, die auf der Bauteiloberfläche liegenden Strukturen einen halbkreisförmigen Querschnitt. Dies bestätigt die Hypothese, dass sich die innenliegenden Leiterbahnen an die Form der erzeugten Kanäle anpassen.

### 6.3.2.3 Elektrischer Widerstand

Zur Ermittlung des elektrischen Widerstandes wurden drei Probekörpern (Pulvermaterial PolyPor-Pulver Typ A, Bindermaterial PolyPor-Binder Typ A, Bindereintrag 15 % der Pulvermasse, Schickdicke 150  $\mu\text{m}$ ) aufgebaut (Probekörper 1 bis 3) und für jede Kolbengeschwindigkeit pro Probekörper zwei vertikale Leiterbahnen erzeugt. Mithilfe von 4-Punkt-Widerstandsmessungen wurden die elektrischen Widerstände der vertikalen Leiterbahnen gemessen, siehe folgende Tabelle.

Tabelle 6-3: Elektrische Widerstände der vertikalen Leiterbahnen

Kolbengeschw. in $\mu\text{m/s}$	Probekörper 1 Widerstand in $\Omega$	Probekörper 2 Widerstand in $\Omega$	Probekörper 3 Widerstand in $\Omega$
60	5,3	0,53	1,9
60	1,8	0,07	nicht messbar
80	0,02	0,03	0,04
80	0,03	0,05	0,08
110	0,04	0,06	0,04
110	0,03	0,03	0,06

Die Versuche mit einem Widerstand über 0,1  $\Omega$  weisen in den CT-Aufnahmen eine unzureichende Verbindung der vertikalen zur innenliegenden horizontalen Leiterbahn sowie vermehrte Einschlüsse in den vertikalen Leiterbahnen auf (vgl. Abbildung 6-15).

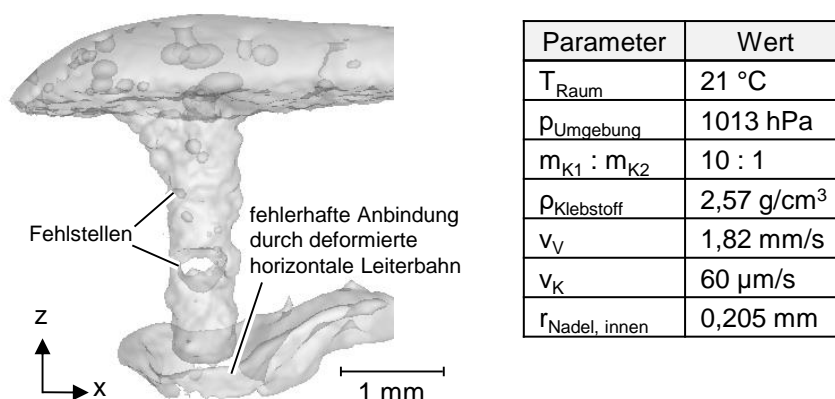


Abbildung 6-15: Fehlerhafte Anbindung der vertikalen Leiterbahn an die untere horizontale Leiterbahn sowie prozessbedingte Lufteinschlüsse (dunkle Bereiche). (Probekörper 2, Wert 1)

### 6.3 Eigenschaften und Bewertung des Multimaterialmoduls

Da hohe Widerstandswerte ausschließlich bei einer Kolbengeschwindigkeit von  $60 \mu\text{m/s}$  auftraten, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass bei dieser Geschwindigkeit die Dauer zwischen dem Druckaufbau in der Spritze und dem Zeitpunkt der Materialabgabe zu hoch war bzw. die Dosiernadel zu früh angehoben wurde. Dadurch wurde wenig bis kein Leitklebstoff im Anfangsbereich der vertikalen Leiterbahn abgegeben. Eine zuvor experimentell ermittelte Wartezeit vom Start der Kolbenbewegung bis zum Materialfluss von ca. 3,0 Sekunden wurde bei den Versuchen bereits berücksichtigt. Nicht nur das fehlende leitfähige Material, sondern auch eine Deformation der unteren horizontalen Leiterbahn durch das Einstecken der Dosiernadel war zu erkennen (vgl. Abbildung 6-15). Dies führte zu einer zusätzlichen Verschlechterung der Verbindungsstelle.

Ein Vergleich der CT-Aufnahmen der unterschiedlichen vertikalen Leiterbahnen am Beispiel des Probekörpers 2 gibt Aufschluss über die Schwankungen des elektrischen Widerstandes. Die Leiterbahn, die bei einer Kolbengeschwindigkeit von  $60 \mu\text{m/s}$  hergestellt wurde (vgl. Abbildung 6-16 links), weist sowohl horizontal als auch vertikal eine Vielzahl an Fehlstellen (dunklere Bereiche) auf. Ob es sich dabei um Lufteinschlüsse oder um Pulverrückstände handelt, konnte durch die CT-Aufnahmen nicht eindeutig geklärt werden. Unter Berücksichtigung der Form der Fehlstellen ist von Lufteinschlüssen auszugehen. Mit Zunahme der abgegebenen Materialmenge verringerte sich die Anzahl der Fehlstellen, bis eine nahezu fehlerfreie vertikale Leiterbahn vorlag (vgl. Abbildung 6-16 rechts).

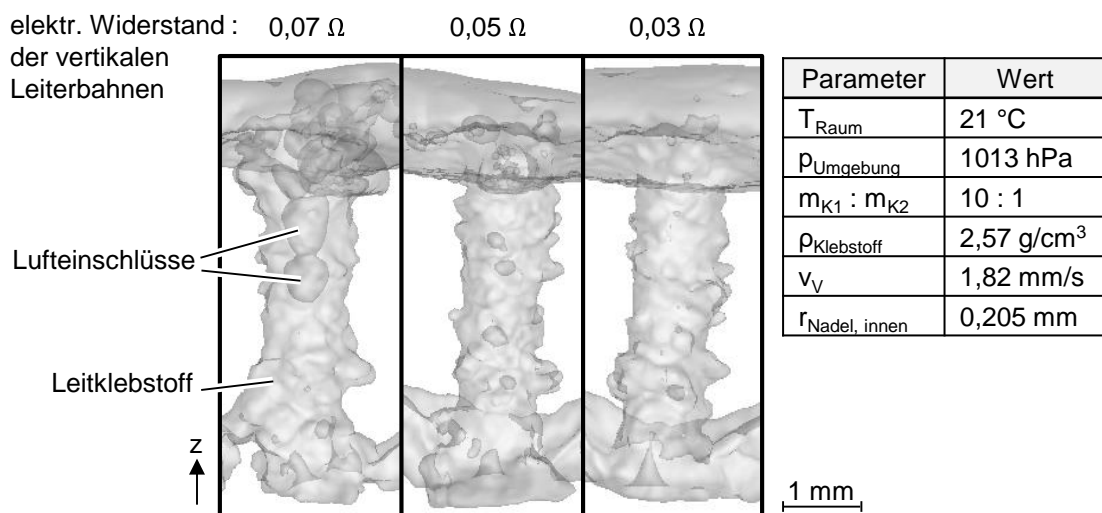


Abbildung 6-16: CT-Aufnahmen der vertikalen Leiterbahnen mit den ermittelten Widerstandswerten. Probekörper 2, Zeile 2 (links), Zeile 4 (mittig) und Zeile 6 (rechts)

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

Zur Sicherstellung eines ausreichenden Materialflusses ist für die Erstellung von vertikalen Leiterbahnen mit dem aktuellen Versuchsaufbau eine Kolbengeschwindigkeit von  $110 \mu\text{m/s}$  vorzusehen.

### 6.3.2.4 Übergangswiderstand

Neben der Ermittlung des elektrischen Widerstands ist der Übergangswiderstand von einer horizontalen zu einer vertikalen Leiterbahn eine wichtige Kenngröße für den Gesamtwiderstand. Da die leitfähigen Strukturen im Werkstück integriert sind, können die Übergangswiderstände nicht direkt gemessen werden. Daher wurde für jeden Probekörper die im Folgenden beschriebene Methode unter Einsatz des ermittelten spezifischen Widerstandes angewendet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der spezifische Widerstand pro Probekörper unterschiedlich, aber innerhalb einer horizontalen bzw. vertikalen Leiterbahn einer Probe identisch ist.

Anhand von 4-Punkt-Widerstandsmessungen wurden zunächst die elektrischen Widerstände der horizontalen unteren und oberen Leiterbahn (vgl. Abbildung 6-17/1) sowie der vertikalen Leiterbahn (vgl. Abbildung 6-17/2) gemessen. Anhand der über CT-Aufnahmen ermittelten Querschnittsflächen und der Messlängen der Leiterbahnen wurden deren spezifischen Widerstände  $\rho_h$  und  $\rho_v$  berechnet. Anschließend wurden entsprechend der Messanordnung 3.1 bzw. 3.2 (vgl. Abbildung 6-17) die elektrischen Widerstände der oberen bzw. der unteren horizontalen Leiterbahn bis zum Ende der vertikalen Leiterbahn gemessen.

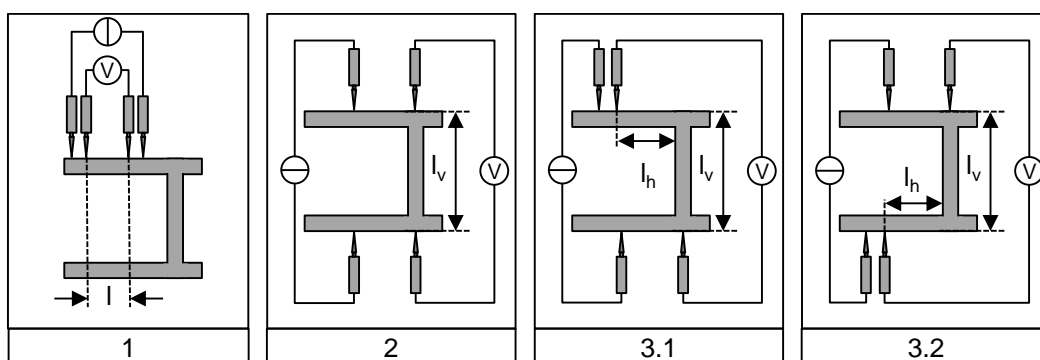


Abbildung 6-17: Messanordnungen für die Bestimmung des Übergangswiderstandes von einer horizontalen zu einer vertikalen Leiterbahn

Die mithilfe der ermittelten spezifischen Widerstandswerte berechneten Soll-Widerstände für die horizontalen und vertikalen Leiterbahnen wurden anschließend von dem tatsächlich gemessenen Wert subtrahiert, um den Übergangswiderstand zu erhalten:

### 6.3 Eigenschaften und Bewertung des Multimaterialmoduls

$$R_{Ueber} = R_{3.x} - \left( \rho_v \cdot \frac{l_v}{A_v} + \rho_h \cdot \frac{l_h}{A_h} \right) \quad (Gl. 6-7)$$

mit

- $R_{Ueber}$ : Übergangswiderstand
- $R_{3.x}$ : Widerstand aus der Messung 3.x
- $\rho_v$ : spezifischer Widerstand der vertikalen Leiterbahn
- $\rho_h$ : spezifischer Widerstand der horizontalen Leiterbahn
- $l_v$ : vertikale Messlänge
- $A_v$ : Querschnittsfläche der vertikalen Leiterbahn
- $l_h$ : horizontale Messlänge
- $A_h$ : Querschnittsfläche der horizontalen Leiterbahn

Die berechneten Übergangswiderstände sowohl für die obere als auch für die sich im Bauteil befindende untere Verbindungsstelle können Abbildung 6-18 entnommen werden. Die Ergebnisse bei einer Kolbengeschwindigkeit von 60  $\mu\text{m/s}$  wurden aufgrund der oft fehlerhaften Anbindungen nicht berücksichtigt. Die in Abbildung 6-18 eingetragenen Übergangswiderstände im negativen Bereich sind durch Messschwankungen bei den Einzelmessungen oder auch durch einen veränderten Übergangswiderstand durch das mehrfache Einstechen mit den Messspitzen begründet. Dadurch kann das Berechnungsergebnis aus Gleichung 6-7 negative Werte annehmen.

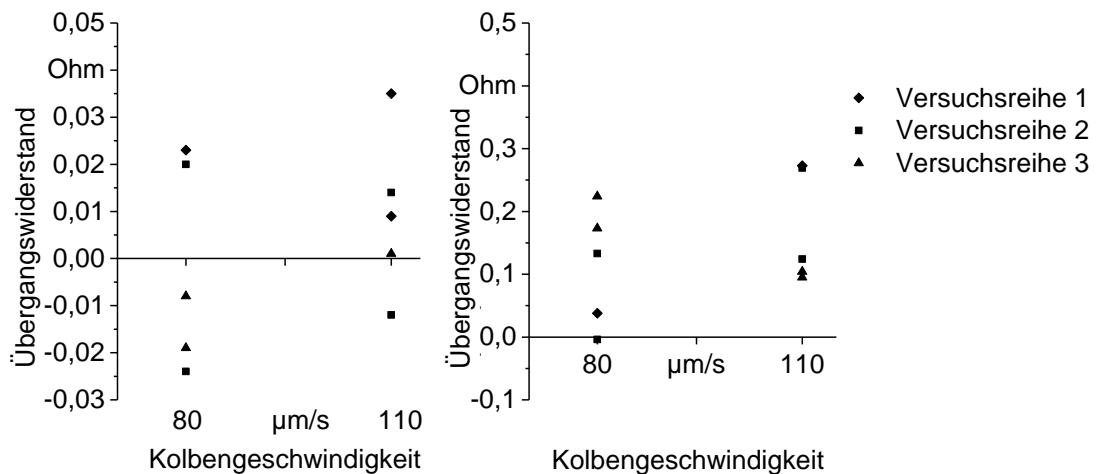


Abbildung 6-18: Berechnete Übergangswiderstände der oberen (links) und unteren (rechts) Verbindungsstellen

Die Ergebnisse können aufgrund von Messschwankungen lediglich als eine Näherung für den realen Wert des Übergangswiderstandes angesehen werden. Dennoch lässt ein Vergleich der unterschiedlichen Übergangswiderstände erkennen, dass die Werte für die obere Verbindungsstelle tendenziell geringer sind als die Werte

für die untere Verbindungsstelle. Dies kann durch die erwähnten Fehlstellen in den innenliegenden Übergangsbereichen erklärt werden (vgl. Abschnitt 6.3.2.3). Außerdem kam es bei der Erzeugung der oberen horizontalen Leiterbahnen durch die Dosiernadel zu einer Vermischung des Leitklebstoffs mit den Enden der vertikalen Leiterbahnen. Dies führte zu einer Verringerung der Anzahl der Fehlstellen. Zur Minimierung des Übergangswiderstandes müssen Fehlstellen wie Lufteinschlüsse vermieden werden und eine Vermischung des Materials der vertikalen Leiterbahn mit der horizontalen Leiterbahn ist anzustreben.

### **6.3.3 Bewertung der Versuchsdurchführung**

#### **6.3.3.1 Technische Probleme**

Das entwickelte Multimaterialmodul wies bei der Abgabe des Leitklebstoffs Schwankungen im Hinblick auf den Startzeitpunkt der Materialabgabe und des Massenstroms auf. Dies kann eine Vielzahl an Ursachen haben.

Ein für den Einsatz des Subprozesses relevanter Einflussfaktor ist dabei das Ausgangsmaterial. Der 2K-Leitklebstoff wurde vor der Verarbeitung manuell vermengt und anschließend in die Spritze des Multimaterialmoduls gefüllt. Die dynamische Viskosität des Leitklebstoffs schwankt je nach Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Mischungsverhältnis und Verarbeitungszeitpunkt. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die Eigenschaften des leitfähigen Materials bei jeder Versuchsreihe geringfügige Unterschiede aufwiesen. Dies hat einen Einfluss auf das Verhalten des Leitklebstoffs bei der Erzeugung der Leiterbahnen. Weiterhin können durch den Mischvorgang Unregelmäßigkeiten (z. B. Luftblasen) im Material entstehen, die wiederum den Materialfluss beeinflussen. Zur Sicherstellung von nahezu konstanten Materialeigenschaften wurde vor den jeweiligen Versuchen der Massenstrom experimentell ermittelt und mit dem Soll-Wert verglichen. Erst bei einer guten Übereinstimmung wurden die Versuche durchgeführt.

Eine kurzzeitige Unterbrechung der Materialabgabe war beim Einsatz des entwickelten Multimaterialmoduls nicht möglich, weil eine verzögerte Materialabgabe nach dem Start sowie ein Nachfließen des Leitklebstoffs nach dem Stopp der Kolbenbewegung nicht zu vermeiden waren. Ausschlaggebend für die verzögerten Reaktionen sind elastische Verformungen des Druckkolbens bzw. des dort angebrachten Gummistopfens und der Kunststoffspritze selbst. Letztgenannter Effekt wurde bereits von OTHMAN (2005) beschrieben. Durch die elastische Dehnung der Spritze kann ein Spalt zwischen der Dichtung und der Innenwand entstehen, wodurch der Druck in der Spritze nachlässt und es zu einer ungleichmäßigen Materialabgabe kommen kann.

Neben dem Multimaterialmodul hatte zudem dessen Befestigung in der Versuchsanlage einen maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften der Leiterbahnen. Aufgrund des geringen Platzangebotes konnte das Modul nicht adäquat montiert werden, wodurch es bei der berechneten maximalen Verfahrgeschwindigkeiten zu Schwingungen kam. Durch die Auswahl geringerer Verfahrgeschwindigkeiten konnten die Einflüsse durch Schwingungen vermieden werden.

Einen zusätzlichen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hat auch die eingesetzte Messmethode. Durch das Ansetzen der Kontaktnadeln an den Leiterbahnen für die 4-Punkt-Widerstandsmessungen kann es zu einer Verformung und damit zu einer Beeinflussung der Kontaktstellen kommen, was sich auf die gemessenen Widerstandswerte auswirkt. Zur Verringerung dieses Einflusses auf die Ergebnisse wurden die Messungen mehrmals wiederholt und jeweils der Mittelwert gebildet.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der beschriebenen Einflussfaktoren auf die Leiterbahnerzeugung näher beschrieben.

### 6.3.3.2 Erzeugung zweidimensionaler Leiterbahnen

Die größten Probleme bei der Erstellung von zweidimensionalen Leiterbahnen war die unpräzise Start- und Endposition der Materialabgabe durch das Multimaterialmodul. Da die Zeitdauer, die bis zum Fließen des Materials notwendig war, von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst wird und daher nicht exakt bestimmt werden konnte, wurde die translatorische Bewegung erst nach einem sichtbaren Materialaustritt gestartet. Dadurch bildeten sich am Start- und am Endpunkt Anhäufungen von Leitklebstoff, wodurch für aussagekräftige Ergebnisse nur der mittlere Bereich der Leiterbahn in die Auswertung mit einbezogen wurde. Hier konnte von einem konstanten Materialfluss ausgegangen werden.

### 6.3.3.3 Erzeugung dreidimensionaler Leiterbahnen

Der Effekt der ungleichmäßigen Materialabgabe hatte auch auf die Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen einen gravierenden Einfluss. Dies zeigte sich bei der Erstellung der vertikalen Leiterbahnen mit einer Kolbengeschwindigkeit von  $60 \mu\text{m/s}$  (vgl. Abbildung 6-15). Trotz einer bereits berücksichtigten Wartezeit nach dem Start der Kolbenbewegung konnte bei diesen Geschwindigkeiten häufig leitfähiges Material nicht rechtzeitig abgegeben werden, was zu Fehlstellen in der Anbindung zu den horizontalen Leiterbahnen führte. Ein Anhaften von Pulverpartikeln an der Nadelspitze verstärkte eine verzögerte Materialabgabe zusätzlich. Der Effekt des Nachfließens nach Beendigung der Kolbenbewegung führte an den Enden der vertikalen Leiterbahnen zu Materialanhäufungen. Dies hatte einen

negativen Einfluss auf die Abmessungen der oberen horizontalen Leiterbahnen, wodurch die Gefahr eines Kontaktes mit dem Beschichter bestand.

Ein weiteres Problem bei der Erzeugung der vertikalen Leiterbahnen zeigte sich durch den Einstechvorgang. Da die Dosiernadeln bei einem zu geringen Nadel-durchmesser biegsam sind, kann es durch das Verdrängen der Pulverkörner zu einem Versatz der Nadelspitze kommen, wodurch die horizontale Leiterbahn im Pulverbett nicht mehr getroffen wird. Bei der Erzeugung der elektrischen Leiterbahnen im Probekörper existierte in der aktuellen Umsetzung keine Möglichkeit, die Position der Nadelspitze im Pulverbett zu überwachen. Daraus ergab sich ein gewisses Risiko, dass die Erzeugung einer Verbindungsstelle erfolglos blieb. Aus diesem Grund wurden bei den Versuchen die innenliegenden horizontalen Leiterbahnen verbreitert und damit die Wahrscheinlichkeit einer Anbindung erhöht. Weiterhin ist in den CT-Aufnahmen ersichtlich, dass das Durchdringen der horizontalen Leiterbahnen mit der Nadel zu einer Deformation der horizontalen Leiterbahn führt.

Bei den Untersuchungen wurde außerdem festgestellt, dass die Durchmesser der vertikalen Leiterbahnen nicht den theoretisch berechneten Werten entsprachen (vgl. Abschnitt 6.3.2.2). Weiterhin weisen die vertikalen Leiterbahnen trotz variierender Kolbengeschwindigkeit nahezu den gleichen Durchmesser auf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass ein Teil der Materialanhäufung auf der Probenoberfläche in den vertikalen Kanal nachgeflossen ist und dieser so nachträglich gefüllt wurde.

### 6.3.3.4 Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass unter Einsatz eines Leitklebstoffs zwei- und dreidimensionale Leiterbahnen erzeugt werden können. Probleme ergaben sich aufgrund der nicht beständigen Eigenschaften des 2K-Leitklebstoffs bzw. durch dessen Verarbeitung mit dem prototypisch umgesetzten Multimaterialmodul.

## 6.4 Eigenschaften und Bewertung des Unterdruckmoduls

Zur Ermittlung der Eigenschaften des Unterdruckmoduls für den Einsatz beim 3D-Druckprozess wurden zunächst die Vertiefungen hinsichtlich ihrer Abmessungen und möglicher Pulverrückstände untersucht. Dazu wurden die für die Ausprägung relevanten Parameter identifiziert und deren Einfluss anhand von Versuchen analysiert (Abschnitt 6.4.1). Weiterhin wurde untersucht, ob das Modul für den



Handhabungsprozess von ausgewählten SMDs geeignet ist (Abschnitt 6.4.2). Abschließend werden die bei den Versuchen ermittelten Restriktionen des Moduls beschrieben (Abschnitt 6.4.3).

### 6.4.1 Erzeugung von Vertiefungen

Pulverrückstände in den Vertiefungen oder an den Randbereichen (vgl. Abbildung 6-19), die bei ihrer Erzeugung mithilfe des Unterdruckmoduls entstehen können, sind zu vermeiden, da sie die weiteren Prozessschritte beeinflussen können.

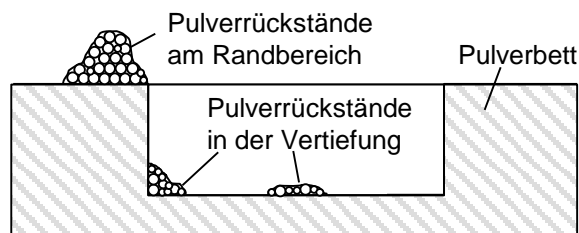


Abbildung 6-19: Darstellung von Pulverrückständen in Vertiefungen bzw. am Randbereich

Die Aufgabe der Pulverentfernung lässt sich unterteilen in die Subprozesse *Erzeugung von Kavitäten* und *Erzeugung von Kanälen*. In die Kavitäten werden die elektrischen Komponenten integriert, die Kanäle werden später mit Leitklebstoff gefüllt. Folgende Parameter sind aufgabenunabhängig und werden daher zunächst allgemein beschrieben.

#### Beschaffenheit des Grundkörpers

Wie bereits beim Prozess zur Erzeugung von dreidimensionalen Leiterbahnen sind auch bei der Erzeugung von Vertiefungen keine Veränderungen des ursprünglichen Druckprozesses vorzunehmen (Anforderung A2). Die Probekörper wurden mit dem Material PolyPor-Pulver Typ A und dem PolyPor-Binder Typ A (15 Masseprozent Binderanteil) bei einer Schichtdicke von 150  $\mu\text{m}$  erzeugt. Die Vorversuche (Abschnitt 4.2.4) zeigten, dass eine prozesssichere Entfernung des Pulvermaterials möglich ist, wenn die Bereiche nicht mit Binder bedruckt wurden. Die Abmessungen der Vertiefungen sind aufgrund der Kapillareffekte und des einsetzenden chemischen Verfestigungsprozesses abhängig von der Zeit zwischen dem Druckprozess und der Erzeugung der Kavität. Zur Ermittlung des Zeiteinflusses auf die Abmessungen wurden bei einem Probekörper die Kavitäten 20, 60 und 90 Minuten nach dem Binderauftrag in der letzten Schicht unter Einsatz der Ausaugstrategie 0z#12341e0 (vgl. Abbildung 5-12) erzeugt (vgl. Abbildung 6-20).

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

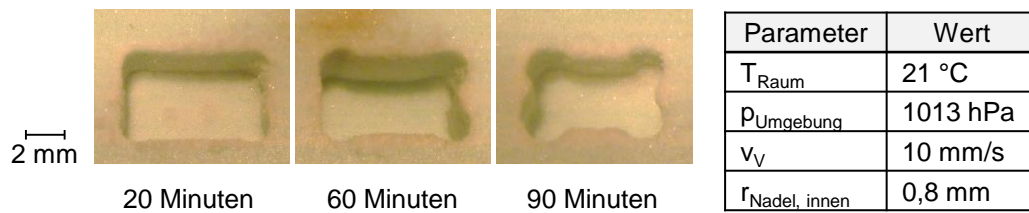


Abbildung 6-20: Abmessungen der Kavität in Abhängigkeit der Wartedauer bis zur Pulverentfernung

Deutlich zu erkennen sind Abweichungen der Ist- von der Soll-Geometrie, die durch die Verfestigung des Materials sowie durch der einsetzenden prozessbedingten Schwindung verursacht sind. Weiterhin steigt mit zunehmender Reaktionszeit und damit der zunehmenden Verfestigung des Materials die Gefahr einer Verschiebung des zu drückenden Bauteils während des Aussaugprozesses. Die Vertiefungen sollten daher unmittelbar nach dem Binderauftrag erzeugt werden.

### Überdruck an der Venturi-Düse

Abhängig vom Überdruck kann an der Venturi-Düse ein Unterdruck zwischen 0,1 bar und 0,85 bar eingestellt werden (FESTO 2014). Der dadurch erzeugte Luftmassenstrom an der Aussaugnadel entfernt die Pulverkörner aus dem Pulverbett. Strömungsverluste durch den Pulverabscheider und die Unterdruckschläuche verringern den Luftmassenstrom an der Nadelspitze. Da der Luftmassenstrom nicht ermittelt werden konnte, wird in den folgenden Darstellungen der anliegende Überdruck als Referenzwert herangezogen. Vorversuche mit unterschiedlichen Werten für den Überdruck ergaben, dass bereits ab einem Wert von 1 bar der Luftmassenstrom ausreichend war, um das Pulvermaterial prozesssicher zu entfernen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass bei allen Überdruckwerten ein Absaugen des Pulvermaterials gewährleistet ist.

Abhängig davon, ob mithilfe des Unterdruckmoduls eine Kavität oder ein Kanal erzeugt werden soll, ergaben sich zusätzliche, prozessspezifische Anforderungen, die in den jeweiligen Abschnitten 6.4.1.1 und 6.4.1.2 beschrieben werden. Einflussgrößen wie die Raumtemperatur sowie das Material der Aussaugnadel können als konstant angesehen werden und wurden nicht näher betrachtet.

### 6.4.1.1 Erzeugung von Kavitäten

Das Ziel war nicht die Erzeugung von Kavitäten mit minimalen Abmessungen, sondern die reproduzierbare Generierung von Vertiefungen ohne Pulverrückstände (vgl. Abbildung 6-19), in denen SMDs ohne Kontakt zu den Wänden abgelegt werden können. Neben den bereits genannten Faktoren sind weitere maßgebliche

Einflussfaktoren die Aussaugstrategie, die Verfahrensgeschwindigkeit des Moduls sowie das eingesetzte Werkzeug.

### Aussaugstrategie

Für die Erzeugung von Kavitäten, bei der eine größere Pulvermenge pro Fläche im Vergleich zu den Kanälen entfernt werden muss, wurden zwei unterschiedliche Aussaugmethoden untersucht. Bei der ersten Methode werden zunächst die Eckpunkte der rechteckigen Vertiefung von Pulver befreit. Das Werkzeug wird an der Startposition bis knapp über dem Boden der Kavität bei anliegendem Unterdruck abgesenkt. Anschließend wird die Aussaugnadel entsprechend der programmierten Aussaugstrategie zur nächsten Position bewegt. Das Pulver wird dabei von der Wand abgeschert, fällt zum Boden der Vertiefung und wird von dort abgesaugt. Bei größeren Kavitäten ist es erforderlich, dass der Aussaugvorgang wiederholt wird, um das Pulver möglichst vollständig zu entfernen. Ein Versatz des zu druckenden Bauteils im Pulverbett aufgrund eines Kontaktes mit der Nadel war bei den Versuchen nicht zu beobachten. Eine Verschiebung des Bauteils ist von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig, so z. B. von der Verfahrensgeschwindigkeit sowie der Größe und Form des zu druckenden Bauteils und seine Lage im Pulverbett. Um eine Verschiebung im Pulverbett sicher zu vermeiden, können anhand der zweiten Methode die Krafteinflüsse durch einen schichtweisen Abtrag des Pulvermaterials verringert werden. Dabei wird das Aussaugwerkzeug bei anliegendem Unterdruck sukzessive in Schritten der Länge 1 mm abgesenkt und die Kavität bei jedem Schritt entsprechend der definierten Aussaugstrategie abgefahren. Die abschließende Bewertung der Kavitäten zeigte bei beiden Methoden keine Pulverrückstände in den Vertiefungen.

### Verfahrensgeschwindigkeit

Die Verfahrensgeschwindigkeit des Unterdruckmoduls wurde über die Geschwindigkeit der x- und y-Achse eingestellt. Bei zu hohen Werten bestand jedoch die Gefahr, dass es zu einer Verschiebung des zu druckenden Bauteils im Bauraum kam. Zur Reduzierung der Einflussfaktoren und damit zur Verringerung des Risikos wurde bei den Versuchen zur Erzeugung von Kavitäten das Werkzeug mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/s verfahren.

### Aussaugwerkzeug

Zur Erzeugung von Kavitäten wurde eine Nadel mit einem Innendurchmesser von 1,6 mm (Außendurchmesser 1,8 mm) eingesetzt. Ein Einsatz dünnerer Nadeln mit einer geringeren Steifigkeit erhöht das Risiko einer Verbiegung des Werkzeugs bei Wandkontakt.

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

### Länge und Breite der Kavität

Durch das rechteckige Profil der SMDs bedingt der Einsatz eines runden Werkzeugs einen Spalt mit der Breite  $o$ . Dieser berechnet sich in Abhängigkeit vom Außenradius des Aussaugwerkzeugs  $r_{Nadel,außen}$  nach Abbildung 6-21 mit:

$$o = r_{Nadel,außen} \cdot (1 - \cos 45^\circ) \quad (Gl. 6-8)$$

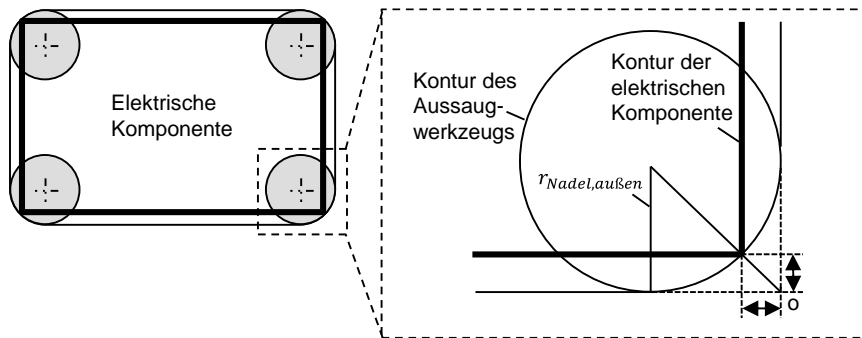


Abbildung 6-21: Breite des Spalts in Abhängigkeit vom Nadelaußendurchmesser

Bei dem hier verwendeten Aussaugwerkzeug beträgt die berechnete Spaltbreite 0,264 mm pro Seite. Die Kavität muss demnach um 0,528 mm länger und breiter sein als die zu integrierende elektrische Komponente.

Auf der Basis der berechneten Abmessungen wurden mehrere Versuche zum Einlegen eines SMDs durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Kavitäten mit unterschiedlichen Spaltbreiten erzeugt und anschließend die entsprechende Komponente darin integriert. Dabei zeigte sich, dass die berechneten Spaltbreiten nicht ausreichend groß waren. Dies kann durch den eintretenden Schwund des Bauteils im Pulverbett aufgrund der einsetzenden chemischen Reaktion begründet werden. Ein Einlegen der Komponente war erst ab einer Breite von 0,7 mm kontaktfrei möglich.

In Abbildung 6-22 sind die Versuche mit einer Spaltbreite von 0,35 mm und 0,4 mm zum Vergleich dargestellt:

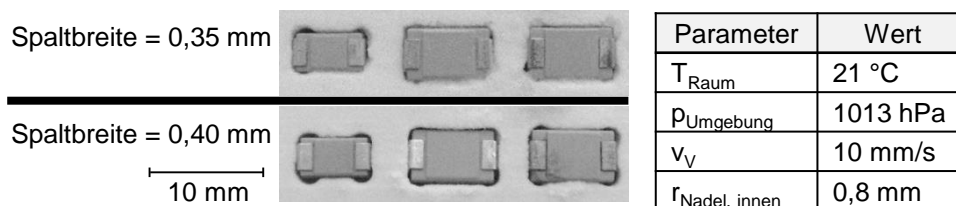


Abbildung 6-22: Probekörper der experimentellen Versuche zur Ermittlung der minimalen Spaltbreite

Durch den Einsatz eines eckigen Werkzeugs könnte der Spalt reduziert oder sogar überflüssig werden, eine entsprechende Nadelform konnte jedoch nicht bezogen werden.

### Tiefe der Kavität

Damit eine Kollision des Beschichters mit der eingelegten Komponente vermieden wird, muss die Kavität so tief ausgelegt werden, dass das SMD maximal bündig mit der Pulverbettsoberfläche abschließt. Anhand einer Versuchsreihe wurde die minimal notwendige, komponentenspezifische Tiefe ermittelt. Dabei wurden Kavitäten mit unterschiedlichen Tiefen in einem Probekörper erzeugt und die Ergebnisse nach einem Trocknungsprozess optisch bewertet. Obwohl die Tiefe der Kavität nicht wie ihre Länge und Breite von der Form des Aussaugwerkzeugs beeinflusst wird, wurde eine zusätzliche Vertiefung der Kavität um 0,8 mm notwendig, damit die SMDs exakt mit der obersten Bauteilschicht abschlossen. Mögliche Ursachen werden in Abschnitt 6.4.3.1 erläutert.

Um eine Kollision und damit eine Zerstörung des Bauteils zu vermeiden, sollte die Kavität um zusätzliche 0,2 mm vertieft werden. Dies ermöglicht eine prozesssichere Integration der elektrischen Komponenten unterhalb der obersten Schicht. Abbildung 6-23 zeigt die Versuchsergebnisse mit den unterschiedlichen Veränderungen der Tiefe.

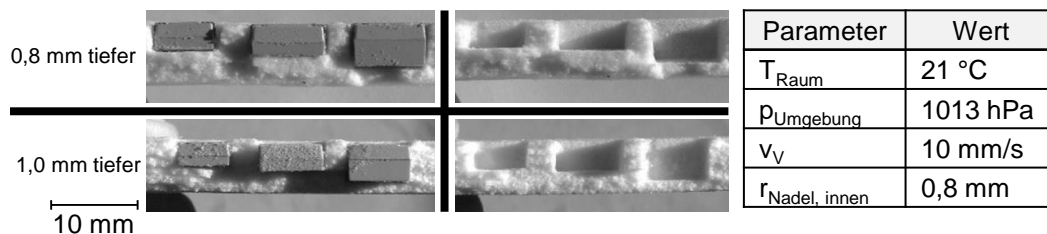


Abbildung 6-23: Probekörper der experimentellen Versuche zur Ermittlung der minimalen Aussaugtiefe.

### 6.4.1.2 Erzeugung von Kanälen

Anders als bei den Kavitäten ist das Ziel bei der Erzeugung von Kanälen, deren Abmessungen (Breite und Tiefe) zu minimieren. Durch eine schrittweise Wiederholung des Aussaugprozesses neben dem zuvor erzeugten Kanal lassen sich größere Kanäle leicht herstellen. Der Kanal gibt maßgeblich die Form (Breite und Höhe) der zu erzeugenden elektrischen Leiterbahn vor. Entsprechend der Leiterbahnanforderung L2 (vgl. Abschnitt 2.8.3) müssen Kanäle mit einer Querschnittsfläche von mindestens  $0,196 \text{ mm}^2$  erzeugt werden können.

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

---

Als zusätzliche Einflussparameter wurden die Breite des Aussaugwerkzeugs sowie die Verfahrgeschwindigkeit des Unterdruckmoduls identifiziert. Die Tiefe der Kanäle konnte durch die Positioniergenauigkeit der zusätzlich integrierten z-Achse beeinflusst werden.

Die Auswahl der Faktorstufen für die einzelnen Parameter basierte auf theoretischen Berechnungen sowie auf den Erfahrungen, die während der Vorversuche gesammelt werden konnten.

### Breite des Aussaugwerkzeugs

Die Breite des Aussaugwerkzeugs definiert die Breite des Kanals und hat damit einen maßgeblichen Einfluss auf die geometrischen Abmessungen der Leiterbahn.

Für die Erzeugung von Kanälen, die anschließend mit Leitklebstoff gefüllt werden, war es das Ziel, die minimal erreichbare Breite zu ermitteln. Da sich die Nadeln mit einem Außendurchmesser von unter 1 mm verbogen und zudem zum Verstopfen durch das Pulvermaterial neigten, wurden für die Untersuchungen Nadeln mit einem Außendurchmesser von 1,6 mm eingesetzt. Um dennoch Kanäle mit einer geringeren Breite erzeugen zu können, wurden mithilfe des additiven Fertigungsverfahrens *Laserstrahlschmelzen* Werkzeugadapter mit unterschiedlich breiten Werkzeugen hergestellt, die auf die Nadelenden gesteckt werden konnten. Diese waren zudem an der Spitze gebogen, um den Transport der Pulverkörner zur Nadelöffnung zu vereinfachen. Eine schematische Darstellung der Pulverentfernung sowie eines additiv gefertigten Aufsatzes zeigt Abbildung 6-24.

Aufgrund von Fertigungstoleranzen beim LBM-Prozess kam es zu Abweichungen bei den Ist-Maßen der Werkzeugbreite. Eine manuelle Nachbearbeitung war wegen der Filigranität und damit der Gefahr, diese zu verbiegen, nicht möglich. Die gemessenen Breiten des Werkzeugs lagen bei 0,20 mm, 0,32 mm, 0,42 mm und 0,47 mm. Das Spektrum an Werkzeugen war für die Versuche ausreichend, da aufgrund der vorliegenden Pulverkornverteilung (vgl. Abschnitt 2.3) und eines maximalen Pulverkorndurchmessers von 0,20 mm die Erzeugung von Kanälen mit einer Breite  $< 0,20$  mm nicht sichergestellt werden kann. Breitere Kanäle können durch die streifenweise Abfahrt des Kanals erzeugt werden.

## 6.4 Eigenschaften und Bewertung des Unterdruckmoduls

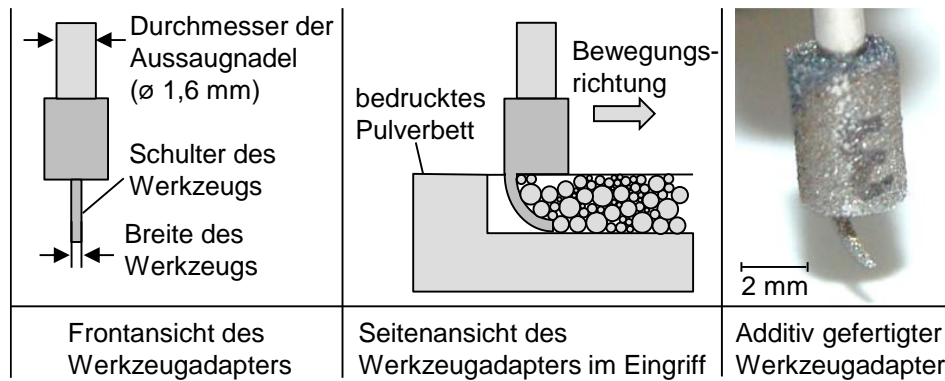


Abbildung 6-24: Funktionsweise und schematische Darstellung eines Werkzeugadapters für die Erzeugung von Kanälen (links und Mitte) sowie eines mittels LBM gefertigten Werkzeugadapters (rechts)

### Verfahrensgeschwindigkeit des Unterdruckmoduls

Die Verfahrensgeschwindigkeit des Unterdruckmoduls definiert die Geschwindigkeit der Erzeugung einer Vertiefung und hat somit einen wesentlichen Einfluss auf die Fertigungszeit. Der Parameter hat zudem Auswirkungen auf die Menge an Restpulver im Kanal, da bei einer zu hohen Geschwindigkeit das Pulvermaterial nicht mehr adäquat entfernt werden kann. Eine zu hohe Verfahrensgeschwindigkeit kann auch dazu führen, dass es zu einer Verschiebung des zu druckenden Bauteils im Baufeld kommt.

Für den Abtransport des Pulvers wurde das Prinzip der Flugförderung eingesetzt, bei dem die Pulverkörner in einem Luftstrom transportiert werden. Zur Berechnung der maximalen Verfahrensgeschwindigkeit wurde von ideal glatten Kugeln ausgegangen (siehe Abschnitt 2.3). Druckverluste bei der Förderung aufgrund von Stößen und Reibung zwischen den Pulverkörnern konnten daher vernachlässigt werden. Die maximale Verfahrensgeschwindigkeit  $v_{max}$  berechnet sich mit:

$$v_{max} = \frac{i_{max}}{b_{Lippe} \cdot t_{Eintauch}} \quad (Gl. 6-9)$$

mit

- $i_{max}$ : maximaler Volumenstrom
- $b_{Lippe}$ : Breite des Lippenadapters
- $t_{Eintauch}$ : Eintauchtiefe in das Pulverbett

Der maximale Volumenstrom lässt sich durch:

$$i_{max} = \frac{\dot{m}_{Pulver_{max}}}{\rho_{Pulver}} \quad (Gl. 6-10)$$

mit

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

---

$\dot{m}_{Pulver,max}$ : maximaler Pulvermassenstrom  
 $\rho_{Pulver}$ : Dichte der Pulverpartikel

ermitteln. Unter der Annahme, dass bei der Flugförderung der transportierte Massenstrom der Partikel dem Fünffachen des Luftmassenstroms  $\dot{m}_{Luft}$  entspricht (Mittelwert aus der Tabelle von KRAUME (2012)), folgt:

$$i_{max} = \frac{\dot{m}_{Luft} \cdot 5}{\rho_{Pulver}} \quad (Gl. 6-11)$$

Zur Ermittlung des Luftmassenstroms wurde der Normvolumenstrom (Volumenstrom bei  $p = 1013,25$  hPa und  $T = 21$  °C) am Eingang und am Ausgang der Venturi-Düse mithilfe eines Strömungssensors SS 30.300 der Firma *SCHMIDT Technology GmbH* gemessen.

Mithilfe der Kenntnis von Druck und Gastemperatur konnte die Normvolumenmessung in einen tatsächlichen Volumenstrom umgerechnet werden. Das Ergebnis verdeutlicht, dass lediglich ein minimaler Unterdruck von wenigen mbar an der Aussaugnadel anliegt, wodurch sich in dieser Berechnung der Normvolumenstrom ( $i_{Norm}$ ) und der tatsächliche Volumenstrom gleichsetzen lassen. Der Luftmassenstrom berechnet sich daher mit:

$$\dot{m}_{Luft} = \frac{i_{Norm}}{60} \cdot \rho_{Luft} \quad (Gl. 6-12)$$

Mit einer Luftdichte von  $1,2041$  kg/m<sup>3</sup> und einem Überdruck an der Venturi-Düse von 1 bar ergibt sich ein minimaler Luftmassenstrom von 0,02 g/s. Anhand der Dichte des Pulvers von  $1,18$  g/cm<sup>3</sup> und einer angenommenen maximalen Stegbreite des Aussaugwerkzeugs von 0,47 mm berechnet sich mit Gleichung 6-9 bei einer Eintauchtiefe von 1 mm eine maximale Verfahrgeschwindigkeit von 184,9 mm/s.

Der theoretisch berechnete Wert ließ sich bei der experimentellen Validierung nicht anwenden, da es ab einer Geschwindigkeit von 60 mm/s zu sichtbaren Schwingungen des Unterdruckmoduls kam, was die Versuchsergebnisse verfälschte. Weiterhin konnten Verluste durch den Pulverabscheider und die Druckschläuche nicht in der Berechnung berücksichtigt werden, wodurch von einem geringeren realen Luftmassenstrom auszugehen ist. Für die Versuchsreihen wurden daher Verfahrgeschwindigkeiten von 10 mm/s, 20 mm/s, 40 mm/s und 60 mm/s untersucht.



### **Breite der Kanäle**

Zur Ermittlung der Breite der Kanäle bei den Aussaugversuchen wurden vier Probekörper mit je sieben nebeneinanderliegenden Kanälen erzeugt. Das Pulvermaterial wurde mithilfe des Aussaugmechanismus direkt nach dem Binderauftrag entfernt, um Einflüsse durch eine Infiltration des Binders in die nicht bedruckten Bereiche sowie durch eine einsetzende Schwindung des Materials zu unterbinden. Zur Vermeidung eines Kontakts der Schulter des Werkzeugs mit den Wänden der Kanäle wurden in der CAD-Datei die Kanäle mit einer Breite und einer Höhe von je 1 mm erzeugt. Ein Nachrutschen des nicht verfestigten Pulvers in die Kanäle während des Auspackprozesses wurde durch eine erneute Benetzung der Oberfläche mit Binder nach dem Prozessschritt der Kanalerzeugung verhindert. Die Probekörper wurden anschließend lackiert und mit dem Lasermikroskop vermessen. Pro Kanal wurde die Breite an drei verschiedenen Stellen ermittelt und daraus der Mittelwert gebildet. Der Versuchsplan sowie die Messergebnisse können der Tabelle in Abschnitt 10.4 entnommen werden.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse ergab, dass die Faktoren *Überdruck an der Venturi-Düse* (variiert wurde zwischen Werten von 1 bar und 6 bar) und dem damit steigenden Luftmassenstrom an der Aussaugnadel und die *Verfahrgeschwindigkeit* keinen Einfluss auf die Abmessungen der Kanäle haben. Lediglich die Breite des Werkzeugadapters stellt einen beeinflussenden Faktor dar. Auffallend ist die bei allen Probekörpern gemessene Verringerung der Kanalbreite um durchschnittlich 0,07 mm zur eigentlichen Lippenbreite, was auf eine Bauteilschwindung zurückzuführen ist. Die mit diesem Versuchsaufbau minimale erzielbare Breite eines Kanals betrug 0,13 mm mit einer Standardabweichung von 0,03 mm.

### **Tiefe der Kanäle**

Die elektrischen Leiterbahnen dürfen nicht in Kontakt mit dem Auftragsmechanismus kommen, da dies zu einer mechanischen Beeinflussung und somit zur Zerstörung der Leiterbahn bzw. des Pulverbetts führen würde.

Aufgrund einer fehlenden Möglichkeit zur Referenzierung der Spitze des Werkzeugs zur Pulverbettoberfläche konnte die minimale Kanaltiefe nur näherungsweise ermittelt werden. Dafür wurde zunächst die z-Achse mit dem Modul soweit abgesenkt, bis ein für das Auge sichtbarer Kanal bei der Bewegung der x-Achse erzeugt wurde. Anschließend wurde die z-Achse in 10- $\mu$ m-Schritten angehoben und durch eine translatorische Verfahrbewegung ein Kanal erzeugt. Dieser Schritt wurde so oft wiederholt, bis das Werkzeug nicht mehr sichtbar im Eingriff war. Anschließend wurden die Probekörper lackiert und mit dem Lasermikroskop analysiert. Die Einzelergebnisse der Messungen können der Tabelle in Abschnitt

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

10.4 entnommen werden. Die Versuche ergaben eine minimal mögliche Aussaugtiefe von 0,11 mm im Mittel bei einer Standardabweichung von 0,014 mm.

Zur Ermittlung der maximalen Tiefe der Kanäle wurden mehrere Probekörper mit unterschiedlichen Kanälen erzeugt. Zur Minimierung der Scherkräfte wurde das Pulvermaterial in Schritten der Länge 1 mm mithilfe des gebogenen Aussaugwerkzeugs abgetragen, bis es zu einer Verschiebung des Körpers im Pulverbett kam. Die ohne eine Prozessbeeinträchtigung maximal erreichbare Kanaltiefe lag bei ca. 4,1 mm. Eine mögliche Begründung für diese Grenze wird in Abschnitt 6.4.3.2 geliefert.

### Pulverrückstände am Randbereich

Pulverrückstände in den Kanälen waren bei den Versuchen nicht erkennbar. Pulverreste an den Rändern der Vertiefungen (vgl. Abbildung 6-19) müssen ebenfalls vermieden werden, da nicht sichergestellt werden kann, dass es dadurch zu keiner Beeinflussung des anschließenden Beschichtungsvorgangs kommt.

Hierfür wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan (siehe Tabelle in Abbildung 6-25) für unterschiedliche Verfahrgeschwindigkeiten und mit unterschiedlichen Werten für den Überdruck an der Venturi-Düse erstellt. Die Probekörper wurden anschließend bewertet. Die geringsten Pulverrückstände konnten bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 60 mm/s identifiziert werden. Die Höhe des Überdrucks hatte hingegen keinen Einfluss. Tendenziell konnte eine Verbesserung der Pulverentfernung bei zunehmender Verfahrgeschwindigkeit festgestellt werden (vgl. Abbildung 6-25).

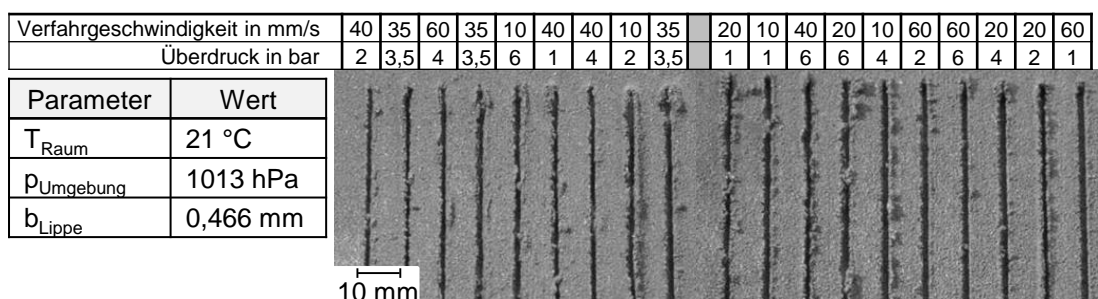


Abbildung 6-25: Darstellung von zwei Versuchsplatten zur Bewertung der Pulverrückstände am Randbereich (vgl. Abbildung 6-19) und mit den jeweiligen Versuchsparametern

### 6.4.2 Handhabung von elektrischen Komponenten

Neben der Erzeugung von Vertiefungen ist ein weiteres Einsatzgebiet des Unterdruckmoduls die Handhabung von unterschiedlichen elektrischen Komponenten.

## 6.4 Eigenschaften und Bewertung des Unterdruckmoduls

Diese müssen für die Transportvorgänge durch einen anliegenden Unterdruck am Greifer fixiert werden. Die dabei auftretenden Kräfte ( $F_G$ ) berechnen sich nach HESSE (2011) über die vereinfachte Gleichung 6-13 beim Heben mit waagrechter Saugfläche:

$$F_G = \frac{v\%}{100} \cdot A_{Nadel,innen} \cdot \frac{1}{S} \quad (Gl. 6-13)$$

mit

$v\%$ :	prozentuales Vakuum
$S$ :	Sicherheitsfaktor
$A_{Nadel,innen}$ :	Innenfläche der Nadel

Die Saugspitze der hier verwendeten Nadel war weder nachgiebig noch gewölbt, weshalb sich die Saugfläche anhand der Kreisfläche berechnet:

$$A_{Nadel,innen} = r_{Nadel,innen}^2 \cdot \pi = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi \quad (Gl. 6-14)$$

Aufgelöst nach dem Durchmesser des Saugers und eingesetzt in Gleichung 6-13 ergibt sich:

$$D = \sqrt{\frac{F_G \cdot S}{\frac{v\%}{100} \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)}} \quad (Gl. 6-15)$$

Zur Ermittlung der auftretenden Kräfte wurden die unterschiedlichen Lastfälle betrachtet: das Heben und Senken des SMDs mithilfe der z-Achse (Lastfall 1) sowie eine Bewegung in x- und y-Richtung (Lastfall 2). Die Lastfälle berechnen sich nach HESSE (2011) mit:

$$F_1 = S_z \cdot m \cdot (g + a_{z,max}) \quad (Gl. 6-16)$$

$$F_2 = m \cdot (S_z \cdot g + S_{xy} \cdot a_{xy,max} \cdot \frac{1}{\mu}) \quad (Gl. 6-17)$$

mit

$m$ :	Masse
$g$ :	Fallbeschleunigung
$a_{z,max}$ :	maximale Beschleunigung der z-Achse
$a_{xy,max}$ :	maximale Beschleunigung der x-Achse und der y-Achse
$S_z$ :	Sicherheitsfaktor für Bewegung in z-Richtung
$S_{xy}$ :	Sicherheitsfaktor für Bewegung in x-Richtung und y-Richtung
$\mu$ :	Reibbeiwert

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

---

Bei einer maximalen Beschleunigung der z-Achse von  $2,5 \text{ m/s}^2$  (FESTO 2008) und einer Masse der größten angenommenen elektrischen Komponenten von  $0,452 \text{ g}$  sowie einem Sicherheitsfaktor von 2 berechnet sich eine mindestens einzuhaltende Festhaltekraft  $F_1$  von  $0,011 \text{ N}$ . Für die Beschleunigung der x-Achse und der y-Achsen wird aufgrund fehlender Angaben ein Richtwert für elektrische Spindelantriebe von  $6,0 \text{ m/s}^2$  (HESSE 2011) gewählt. Als Reibbeiwert wird 0,5 eingesetzt, der die Verhältnisse auf einer trockenen und glatten Oberfläche beschreibt. Der Sicherheitsfaktor für die vertikale Bewegung wird mit 4 definiert, wodurch sich eine Festhaltekraft  $F_2$  von  $0,031 \text{ N}$  berechnet. Wird die größere Festhaltekraft  $F_2$  in Gleichung 6-16 eingesetzt und von einem praxisüblichen Vakuum von 50 % ausgegangen (HESSE 2011), berechnet sich daraus ein minimaler Durchmesser des Saugers von  $1,270 \text{ mm}$ . Zum Transportieren der SMDs wurde daher eine Nadel mit einem Innendurchmesser von  $1,6 \text{ mm}$  (Bezeichnung TE714150PK von *Oki Metcal*) verwendet.

Der notwendige Überdruck an der Venturi-Düse wurde anhand einer experimentellen Versuchsreihe ermittelt. Die Komponenten wurden bei unterschiedlichen Drücken von einer definierten Position aufgenommen und mit maximaler Beschleunigung und Geschwindigkeit der Achsen bewegt, um sie zum Schluss wieder auf der Ausgangsposition abzulegen. Dadurch konnte bestimmt werden, ob und bei welchem Schritt es zu einem Verrutschen kam. Die Ergebnisse der Versuche werden im Anhang (Abschnitt 10.5) dargestellt.

Der notwendige Unterdruck variiert entsprechend Größe und Masse der Komponenten. Die größte Komponente im Betrachtungsraum benötigte einen minimalen Betriebsdruck von  $0,8 \text{ bar}$ . Mit einem Sicherheitsfaktor von 2 ergibt sich ein Überdruck von  $1,6 \text{ bar}$ , was bei der Kennlinie der verwendeten Venturi-Düse einen negativen Überdruck von  $\Delta p = -0,22 \text{ bar}$  und somit nach DIN 28400 (1990) einem Vakuum von 22 % entspricht.

### 6.4.3 Bewertung der Versuchsdurchführung

#### 6.4.3.1 Erzeugung von Kavitäten

Für die Breite und Länge der Kavität ist ein Spalt vorzusehen. Die Tiefe der Kavität muss ebenfalls angepasst werden. Die Vertiefung sollte, um einen Kontakt der elektrischen Komponente mit dem zu druckenden Bauteil bzw. mit der Beschichterklinge zu vermeiden, bei einer Nadel mit einem Außendurchmesser von  $1,6 \text{ mm}$  mindestens  $0,8 \text{ mm}$  betragen. Erklärungen für die Notwendigkeit eines Spalts sind

der bereits erwähnte Bauteilswund aufgrund der chemischen Verfestigungsreaktion und mögliche Ungenauigkeiten bei der Positionierung der elektrischen Komponenten sowie des Aussaugwerkzeugs.

Im Hinblick auf die Tiefe der Kavität kann ein zusätzlicher Effekt zu einer notwendigen Anpassung führen. Pulverkörner, die mithilfe des Aussaugmechanismus nicht vollständig entfernt werden konnten, führen zu einer lokalen Änderung der Tiefe der Kavität, was ein Aufliegen des SMDs zur Folge hat. Neben einer unpräzisen Pulverentfernung können die Rückstände auch durch eine ungenaue Positionierung verursacht werden. Der sich daraus ergebende Kontakt zwischen dem SMD und der Wand der Kavität kann zu einem Abscheren des Pulvers führen, das sich anschließend am Boden der Kavität sammelt. Eine zusätzliche Vergrößerung des Spalts der Kavität verringert den Effekt, jedoch entsteht dadurch ein größerer Graben zwischen der Komponente und der Wand der Kavität, der wieder mit Pulvermaterial gefüllt werden muss.

### 6.4.3.2 Erzeugung von Kanälen

Eine verlässliche Bewertung kann lediglich bezüglich der Breite der Kanäle vorgenommen werden, da die x-Achse und die y-Achsen zum Baufeld referenziert werden konnten und somit definierte Bedingungen bei der Erzeugung der Kanäle vorherrschten. Eine Referenzierung des Aussaugwerkzeugs zur Pulverbettoberfläche in z-Richtung war nicht möglich, sodass bereits bei der Positionierung Ungenauigkeiten entstehen konnten.

Die Breite der erzeugten Kanäle wies zur Werkzeugbreite eine konstante Abweichung von ca. 0,07 mm auf. Ursachen hierfür können der Schwund durch den bereits einsetzenden Verfestigungsprozess oder auch Messungenauigkeiten sein. Da die Probekörper direkt nach der Kanalerzeugung entnommen wurden und daher nicht vollständig ausgehärtet waren, konnten die Pulveranhaftungen an der Unterseite des Bauteils nicht vollständig entfernt werden, ohne dieses zu zerstören. Eine weitere Fehlerquelle stellte das eingesetzte gebogene Werkzeug dar.

Die beobachtbare Verschiebung des Bauteils ab einer Kanaltiefe von 4,1 mm kann nicht durch einen Kontakt des Verbindungselements des Werkzeugadapters mit dem Pulverbett begründet werden, da die Höhe des Werkzeugs 5 mm beträgt. Eine Erklärung für diese Grenze könnte die zwischen der Wand der Kavität und der gebogenen Spitze vorherrschende Reibungskraft sein, die ab einer Kanaltiefe von 4,1 mm groß genug sein könnte, um den Probekörper zu verschieben.

### 6.4.3.3 Schlussfolgerung

Unter Berücksichtigung des mittleren Pulverkorndurchmessers von 60  $\mu\text{m}$  liegt die Abweichung der Kanalbreite von ca. 0,07 mm innerhalb der technischen Grenzen des Prozesses. Eine Kontrolle, ob ein Pulverkorn gelöst und somit abgesaugt worden ist oder aber durch das Aussaugwerkzeug verdrängt wurde, ist aktuell nicht möglich. Die minimal erreichte Tiefe war ca. 0,11 mm und liegt damit unterhalb der prozessspezifischen Pulverschichtdicken von 0,15 mm.

Das entwickelte Unterdruckmodul weist eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf. Sowohl die Erzeugung von Vertiefungen als auch der Transport von elektrischen Komponenten konnten mit diesem Modul prozesssicher umgesetzt werden.

## 6.5 Bewertung des Gesamtsystems

Zur Bewertung der Zielerreichung des Gesamtsystems wurden die Versuchsergebnisse aus Abschnitt 6.2 bis 6.4 anhand der in Abschnitt 2.8 definierten Anforderungen bewertet (Übersicht Tabelle 6-4 auf S. 150).

### **Anforderung A1 „Schaltung im Bauteil“:**

Die entwickelten Subprozesse ermöglichen die Integration von zweidimensionalen und dreidimensionalen Schaltungen in ein Werkstück (vgl. Abschnitt 6.3.1 und 6.3.2). Anhand von verschiedenen Probekörpern wurde die Umsetzbarkeit belegt. Die Probekörper besaßen lediglich Ankontaktierungspunkte für die Messtechnik an der Werkstückoberfläche. Durch den Einsatz von Akkumulatoren in das Werkstück könnten auch vollständig integrierte Schaltungen erzeugt werden. Die Anforderung kann somit vollständig erfüllt werden.

### **Anforderung A2 „Erweiterung ohne Prozessbeeinträchtigung“:**

Durch die Erzeugung von Kavitäten und Kanälen (vgl. Abschnitt 6.4.1) können SMDs bzw. elektrische Leiterbahnen ohne eine Beeinträchtigung des weiteren additiven Aufbauprozesses integriert werden. Eine entsprechende Vergrößerung der Abmessung der Vertiefungen inkl. Sicherheitsfaktor ist dabei vorzusehen (vgl. Abschnitt 6.4.1.1). Nach der Integration der elektrischen Schaltung kann der Aufbauprozess weitergeführt werden, wodurch die Anforderung vollständig erfüllt wird.

### **Anforderung A3 „geeignet für pulverbettbasierten 3D-Druckprozess“:**

Das Vorgehen wurde am Beispiel des Verfahrens *3D-Drucken* erarbeitet und die Zielerreichung anhand eines Demonstrators nachgewiesen (vgl. Abschnitt 7.5).

Der Prozess ist somit für pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren geeignet und die Anforderung erfüllt.

### **Anforderung A4 „geringe Anzahl an zusätzlichen Modulen“:**

Für die Prozesse *Erzeugung von Vertiefungen* (vgl. Abschnitt 6.4.1) sowie *Handhabung von elektrischen Komponenten* (vgl. Abschnitt 6.4.2) kann das gleiche Modul eingesetzt werden. Dadurch beschränkt sich die anlagentechnische Erweiterung auf lediglich zwei Module, ein Unterdruckmodul (vgl. Abschnitt 0) und ein Multimaterialmodul (vgl. Abschnitt 5.3). Eine weitere Reduzierung der Modulanzahl kann mit den aktuell eingesetzten Materialien nicht erfolgen. Die Anforderung einer geringen Anzahl an zusätzlichen Modulen kann somit als erfüllt angesehen werden.

### **Anforderung A5 „sicheres Arbeiten“:**

Eine Gefährdung der Bedienperson durch die Prozesserweiterungen konnte nicht identifiziert werden. Da beide Module automatisiert betrieben werden können (vgl. Abschnitt 5.5), ist der Prozess bei geschlossener Anlage durchführbar. Der eingesetzte Leitklebstoff stellt keine gesundheitliche Gefährdung dar. Die Anforderung gilt als erfüllt.

### **Anforderung A6 „Umsetzbarkeit während des Aufbauprozesses“:**

Die Prozesserweiterungen und die notwendigen Module wurden dergestalt entwickelt, dass eine Durchführung der Arbeitsschritte während des Aufbauprozesses in der Anlage möglich ist (vgl. Abschnitt 4.4 und 5.5). Eine Entnahme der bereits gedruckten Struktur für zusätzliche Prozessschritte ist somit nicht notwendig. Die Anforderung ist erfüllt.

### **Anforderung A7 „konstante Prozesstemperatur“:**

Die Erzeugung der elektrischen Schaltung erfolgte durch den Einsatz eines bei Raumtemperatur aushärtenden Leitklebstoffs (vgl. Abschnitt 4.2.3.3). Eine Erhöhung der Temperatur während des erweiterten 3D-Druckprozesses war nicht notwendig. Der Aufbauprozess wird daher durch den Prozess der Erzeugung der elektrischen Leiterbahnen nicht beeinflusst und die Anforderung A7 ist erfüllt.

### **Anforderung A8 „Vermeiden einer mechanischen Beeinflussung“:**

Eine Beeinflussung des Aufbauprozesses durch die Erweiterungen wurde weitestgehend vermieden. Wird für die Erzeugung von Kavitäten ein Spalt zwischen der Wand und der elektrischen Komponente von 1 mm gewählt, kommt es bei der Integration von elektrischen Komponenten zu keinem Kontakt mit der Wand der Kavität und somit zu keiner mechanischen Beeinflussung (vgl. Abschnitt 6.4.1.1). Die Erzeugung von Vertiefungen erforderte jedoch einen Kontakt zwischen dem Werkzeug und dem Pulverbettmaterial, führte aber während der Versuche unter

Einhaltung der ermittelten spezifischen Grenzen zu keinem Versatz der Probekörper. Bei der Erzeugung von vertikalen Leiterbahnen kam es durch den Vorgang des Einstechens der Dosiernadel in das Pulverbett ebenfalls zu einem Kontakt zwischen der Dosiernadel und dem Bauteil (vgl. Abschnitt 4.2.5 und 6.3.2). Gesah dies direkt nach dem Prozessschritt der Binderabgabe, kam es zu keiner signifikanten Beeinflussung des Bauteils. Eine kontaktfreie Herstellung von elektrischen Schaltungen ist mit der in Abschnitt 4.4 dargestellten Methode aktuell nicht umsetzbar. Die zusätzlichen Schritte zur Erzeugung von elektrischen Schaltungen führten unter Einhaltung der spezifischen Rahmenbedingungen zu keinem Prozessabbruch. Die Anforderung wurde daher teilweise erfüllt.

### **Anforderung A9 „gleichbleibende Werkstückeigenschaften“:**

Zur Erzeugung von Vertiefungen wurde das zu entfernende Pulver nicht mit Binder benetzt. Der dadurch geringere Binderanteil im zu druckenden Bauteil führt zu einer Schwächung des Grünlings. Eine weitere Beeinflussung ergibt sich durch die mehrmalige Unterbrechung des Aufbauprozesses, wodurch die chemische Aushärtereaktion beschleunigt wird und es zu einer mangelhaften Anbindung der Folgeschichten kommen kann. Dies konnte durch das Einbringen der doppelten Bindermenge in der Schicht nach der Prozessunterbrechung ausgeglichen werden. Eine Infiltration des Grünlings, z. B. durch Epoxidharz, gleicht die Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften durch fehlendes Bindermaterial, aufgrund der zusätzlichen Prozessschritte der elektrischen Funktionsintegration, aus, da das Infiltrationsmaterial maßgeblich für die erreichbaren Materialeigenschaften verantwortlich ist. Der erweiterte Prozess zur *Integration von elektrischen Schaltungen* benötigt eine mehrmalige Unterbrechung des Aufbauprozesses. Durch eine Anpassung des Folgeschrittes konnten Prozessabbrüche vermieden werden. Die Anforderung ist somit nur zum Teil erfüllt. Eine Parallelisierung der einzelnen Prozesse sowie eine technologische Weiterentwicklung der Anlage könnte diese Einflüsse minimieren.

### **Anforderung L1 „elektrischer Widerstand“:**

Die erreichten gemittelten spezifischen Widerstände erfüllen die definierten Anforderungen. Für die horizontalen Leiterbahnen konnte ein gemittelter Wert von  $4,8 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  bei einer Abweichung von  $\pm 3,8 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  (vgl. Abschnitt 6.3.1.3) und für die vertikalen Leiterbahnen ein gemittelter Wert von  $7,35 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  bei einer Abweichung von  $\pm 5,0 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  (vgl. Abschnitt 6.3.2.3) erzielt werden. Die Anforderung an den elektrischen Widerstand wird somit erfüllt.



### **Anforderung L2 „geometrische Abmessungen“:**

Die gemessene minimale Querschnittsfläche der horizontalen Leiterbahn beträgt  $0,075 \text{ mm}^2$  (vgl. Abschnitt 6.3.1.2) und liegt damit unterhalb des in den Anforderungen definierten Zielquerschnitts von  $0,196 \text{ mm}^2$ . Die Anforderung ist somit erfüllt. Unter der Annahme einer zylindrischen Form für die vertikalen Leiterbahnen berechnet sich eine minimal erreichte Querschnittsfläche von  $0,594 \text{ mm}^2$ . Sie liegt zum aktuellen Zeitpunkt noch über der definierten Grenze. Aufgrund der in Abschnitt 6.3.3.1 beschriebenen technischen Probleme des Multimaterialmoduls kann eine Verbesserung der Querschnittsfläche der vertikalen Leiterbahn z. B. durch eine Verbesserung des Moduls erreicht werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, durch ein zusätzliches Werkzeug, wie z. B. eine spitze Nadel, das Pulverbett für die Materialabgabe vorzuformen. Durch die Spitze wird das Pulver in die Randbereiche verdrängt, wodurch eine Abgabennadel mit einem Durchmesser unter  $0,41 \text{ mm}$  eingesetzt werden könnte.

### **Anforderung L3 „flexible Erzeugung der Leiterbahnen“:**

Der Einsatz einer Flüssigkeit (vgl. Abschnitt 4.2.2) sowie deren Verarbeitung durch ein NC-gesteuertes Multimaterialmodul (vgl. Abschnitt 5.5) ermöglichte die flexible Erzeugung von Leiterbahnen. Die Anforderung ist durch den Einsatz dieser Materialien erfüllt.

### **Anforderung L4 „zwei- und dreidimensionale Leiterbahnen“:**

Mithilfe des Multimaterialmoduls (vgl. Abschnitt 5.3) und der entwickelten Prozesse konnten sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Leiterbahnen während des Aufbauprozesses erzeugt werden. Die Form der elektrischen Schaltung ist daher auf horizontale (parallel zur x- bzw. y-Achse) und vertikale (senkrecht zum Pulverbett) Strukturen beschränkt. Trotz dieser Einschränkung kann die Anforderung erfüllt werden. Da die Achsen der Versuchsanlage lediglich sequenziell bewegt werden können, kann eine Erhöhung der Gestaltungsfreiheit der horizontalen Strukturen durch eine Anpassung der Anlagensteuerung hin zu einer synchronen Achsbewegung erreicht werden. Durch eine Adaption der Befestigung des Aussaugmoduls könnte das Modul zusätzlich in einen definierten Winkel zum Pulverbett gebracht werden. Die Einschränkung, vertikale Leiterbahnen nur senkrecht zum Pulverbett erzeugen zu können, wäre somit aufgehoben. Die Erzeugung von gekrümmten vertikalen Leiterbahnen ist mit dieser Methode jedoch nicht realisierbar.

### **Anforderung L5 „Ankontaktierung möglich“:**

Eine direkte Ankontaktierung an die elektrischen Leiterbahnen war unter Verwendung eines Leitklebstoffs ohne Einsatz zusätzlicher Materialien möglich. Die Anforderung kann somit erfüllt werden.

## 6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften

### Anforderung K1 „flexible Handhabung unterschiedlicher Komponenten“:

Zur Erfüllung dieser Anforderung wurden SMDs als Komponentenform ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.3.2). Sie ermöglichen aufgrund einer einheitlichen, meist rechteckigen Bauform die flexible Handhabung unterschiedlicher elektrischer Komponenten. Durch eine flächige Kontaktstelle können diese mithilfe eines gesteuerten Unterdrucksystems aufgenommen und abgelegt werden und ermöglichen zudem eine ausreichende Fixierung während des Transportvorgangs (vgl. Abschnitt 6.4.2). Diese Anforderung wird somit erfüllt.

### Anforderung K2 „prozesssichere Ankontaktierung“:

Für die Ankontaktierung von SMDs an eine mit Leitlebstoff erzeugte Leiterbahn wurde ein Prozess entwickelt, der durch das Vorsehen einer Trennwand einen Kurzschluss der Kontakte verhindert und somit eine prozesssichere Ankontaktierung gewährleistet (vgl. Abschnitt 4.3.5). Durch die Einbettung der SMDs ins Pulverbett können Relativbewegungen zwischen den Leiterbahnen und der Komponente verhindert werden, wodurch diese Anforderung erfüllt wird.

### Anforderung K3 „geringer Übergangswiderstand“:

Der erzielte Übergangswiderstand von einer elektrischen Komponente zur Leiterbahn betrug im Mittel  $0,047 \Omega$  je Kontaktstelle (vgl. Abschnitt 6.2.4) und ist somit im Vergleich zum elektrischen Widerstand der Leiterbahn bzw. den Toleranzschwankungen der elektrischen Komponenten als vernachlässigbar einzustufen. Die Anforderung nach einem geringen Übergangswiderstand ist somit erfüllt.

Folgende Tabelle stellt die Gesamtbewertung dar:

Tabelle 6-4: Bewertung der Anforderungen

Anforderung Allgemein	Erfüllungsgrad	Anforderung Leiterbahn	Erfüllungsgrad
A1	+	L1	+
A2	+	L2	+
A3	+	L3	+
A4	+	L4	+
A5	+	L5	+
A6	+		
A7	+	<b>Anforderung Komponenten</b>	<b>Erfüllungsgrad</b>
A8	o	K1	+
A9	o	K2	+
		K3	+

+ erfüllt  
o teilweise erfüllt

### **Schlussfolgerung**

Nahezu alle Anforderungen konnten durch die aufgezeigten Prozesse und Module vollständig erfüllt werden. Lediglich bei den Anforderungen A8 und A9 war eine vollständige Erfüllung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Eigenschaften der erzeugten elektrischen Schaltungen sind erwartungsgemäß nicht mit denen von Leiterplatten vergleichbar, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechend industriell hergestellt werden. Da das Ziel dieser Arbeit die Erweiterung eines additiven Prozesses um die Fertigung integrierter elektrischer Schaltungen unter Berücksichtigung der vorherrschenden Bedingungen war, kann das Ergebnis als positiv bewertet werden.

### **6.6 Zusammenfassung**

Nach der Untersuchung des Verhaltens des Leitklebstoffs bei einem Einsatz während des 3D-Druckprozesses und unter verschiedenen Belastungszuständen wurden die damit erzielbaren Eigenschaften bei der Erzeugung von zweidimensionalen und dreidimensionalen Leiterbahnen unter Einsatz des entwickelten Multimaterialmoduls untersucht. Im Fokus stand zunächst die Erzeugung von Leiterbahnen mit definierten geometrischen Abmessungen, da deren Länge und Querschnitt gemeinsam mit dem spezifischen Widerstand den elektrischen Widerstand bestimmen.

Zur Ermittlung der minimal möglichen geometrischen Abmessungen der Leiterbahnen wurden unterschiedliche Parameter identifiziert und ihr Einfluss experimentell untersucht. Als Einflussfaktoren bei der Erzeugung von zweidimensionalen Leiterbahnen konnten die Verfahrensgeschwindigkeit des Multimaterialmoduls sowie die Geschwindigkeit des Kolbens und somit die abgegebene Materialmenge ermittelt werden. Ein weiteres Kriterium für die Abmessungen der innenliegenden horizontalen Leiterbahnen ist die Form des mithilfe des Unterdruckmoduls erzeugten Kanals. Die vertikalen Verbindungselemente der dreidimensionalen Leiterbahnen hatten einen parameterunabhängigen Durchmesser. Unterschiede zwischen den vertikalen Leiterbahnen zeigten sich durch eine genauere Untersuchung mithilfe von CT-Aufnahmen in der Anzahl an Fehlstellen durch Lufteinschlüsse bzw. in den fehlerhaften Anbindungen an die horizontalen Leiterbahnen.

Neben der Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen wurde ein weiteres Modul zur Erzeugung von Kavitäten in einem Pulverbett und zum Transport von elektrischen Komponenten implementiert. Dabei wurden, wie bereits bei dem Multimaterialmodul, die relevanten Parameter ermittelt und experimentell ihr Einfluss auf die Eigenschaften der Kavitäten untersucht. Trotz einer zuverlässigen Entfernung des nicht verfestigten Pulvermaterials ergaben die Untersuchungen, dass für die

## **6 Ermittlung und Bewertung der Systemeigenschaften**

---

Erstellung von Vertiefungen eine Anpassung von Länge, Breite und Tiefe vorgesehen werden muss, um eine kontaktlose Integration von elektrischen Komponenten gewährleisten zu können. Für die Erzeugung von filigranen Kanälen wurden zudem spezielle Aussaugwerkzeuge eingesetzt. Die damit erzielbare minimale Kanalbreite betrug 0,13 mm, die minimale Kanaltiefe lag bei 0,11 mm.

Die mit diesem Versuchsaufbau erzielten Ergebnisse wurden am Ende dieses Abschnittes hinsichtlich der Erfüllung der definierten Anforderungen bewertet. Alle Anforderungen konnten ganz oder zu einem hohen Anteil erfüllt werden, eine Verbesserung des Erfüllungsgrades muss in zukünftigen Forschungsarbeiten für die Anforderungen A8 und A9 erreicht werden.

# 7 Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

## 7.1 Vorgehen im Kapitel

Im Folgenden wird eine Potenzialanalyse erläutert, mit der das Einsatzfeld der in dieser Arbeit beschriebenen neuen Technologie identifiziert wurde. Anhand eines Anwendungsbeispiels wird die Wirtschaftlichkeit des Systems bewertet (Abschnitt 7.4). Die Umsetzbarkeit des ausgewählten Beispiels wird anhand eines erweiterten Demonstrators (Abschnitt 7.5) belegt.

## 7.2 Methodenbeschreibung und -anwendung

Die Potenzialanalyse erfolgte anhand der Methode des Fraunhofer IAO (ARDILIO & LAIB 2008), da bei dieser Methode sowohl Anwendungsfelder als auch Anwendungsbeispiele generiert und bewertet werden, wodurch im Anschluss ein Herstellungskostenvergleich erfolgen kann.

Die Technologiepotenzialanalyse durchläuft drei Phasen und fokussiert primär den Markt und die betrachtete Technologie. Auch Rahmenbedingungen aus dem Umfeld, z. B. der Politik und der Gesellschaft, können berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Phasen beschrieben sowie die Ergebnisse am Beispiel des „*elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks*“ aufgezeigt.

### 7.2.1 Technologieanalyse-Phase

Das Ziel dieser Phase ist neben einer detaillierten Beschreibung der betrachteten Technologie die Identifizierung und der Vergleich mit Konkurrenztechnologien sowie die Ermittlung der Konkurrenzsituation. Dies ermöglicht der Anwenderin/dem Anwender, einen Überblick über das Technologiefeld zu erhalten, das eigene System zu bewerten und mögliche Entwicklungspotenziale abzuschätzen.

Zu Beginn der Phase wird ein zeitlicher Rahmen festgelegt, für den Aussagen getroffen werden. Üblich sind dabei Zeitfenster zwischen fünf und zehn Jahren. Die zu bewertende Technologie befindet sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und es existiert lediglich eine einzige Versuchsanlage an einem Forschungsinstitut. Eine marktreife Umsetzung erfordert daher neben der Entwicklung einer industriellen Anlage ebenso die Entwicklung der Werkstücke, die das Potenzial der Technologie nutzen. Allein für die Entwicklung einer industriellen Anlage kann von einem Zeitbedarf von sechs bis acht Jahren ausgegangen werden. Sofern

## 7 Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

---

die Werkstückentwicklung nicht parallel zur Anlagenentwicklung verläuft, verlängert sich entsprechend der zeitliche Betrachtungsrahmen.

Unterschiedliche Methoden unterstützen in der Technologieanalyse-Phase den Anwender, z. B. durch die Sammlung relevanter Funktionen und die Ermöglichung einer objektiven Bewertung bzw. eines Vergleichs. Der Fokus lag auf der Technologie des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks*. Für die Ermittlung der einzelnen Funktionen bot sich an, diese aus dem Verfahren des *3D-Drucks* sowie aus dem Bereich der Elektrotechnik abzuleiten und in einem Funktionsbaum zusammenzufügen. Ausgehend von einer marktreifen Anlagentechnik wurden aktuelle Einschränkungen der Technologie nicht berücksichtigt und es wurde ein optimales System ohne die bisher beschriebenen Hemmnisse vorausgesetzt, was im aktuellen Entwicklungsstand eine Vereinfachung darstellt. Durch die kombinierte Betrachtung der Technologien aus dem Bereich der Elektrotechnik und der additiven Fertigung ergaben sich weitere Funktionen und Potenziale. Der Funktionsbaum ist im Anhang (Abschnitt 10.6) dargestellt.

Verglichen wurde das *elektrisch-funktionsintegrierte 3D-Drucken* mit folgenden Technologien:

- Direct-Write-Technologie, bei der ein zuvor erstellter Rohling mithilfe einer der folgenden Dispensertechniken nachbearbeitet wird. Dazu gehören:
  - Micro-Dispenser
  - Inkjet
  - Aerosol-Jet
  - MAPLE-DW
  - Thermal-Spraying.
- MID-Technologie mit den Verfahren
  - Laser-Direktstrukturierung (LDS)
  - Zwei-Komponenten-Spritzguss
  - Folienhinterspritzen
  - Heißpressen
- Andere additive Fertigungstechniken, die eine elektrische Funktionsintegration ermöglichen (vgl. Kapitel 3)

Folgende Vergleichsaspekte wurden herangezogen:

- Ansatz zur Generierung der elektrischen Funktion
- Erreichbare Funktionsabdeckung
- Etablierungsgrad der Technologie
- Gestaltungsfreiheit und Funktionsüberschneidung
- Benötigte Ressourcen und Halbzeuge sowie Investitionskosten

- Prozesskette, Automatisierungsgrad
- Leistung der Verfahren hinsichtlich der Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen (Leiterbahnbreite und -höhe, elektrischer Widerstand)

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Vergleichstechnologien die Funktionen und Potenziale im Funktionsbaum nicht vollständig abdecken können. Nur unter Einsatz eines additiven Fertigungsverfahrens lassen sich die Vorteile der Individualisierung und Flexibilisierung erreichen. Die MID-Technologie sowie einzelne Verfahren der Direct-Write-Technologie sind bereits industriell etabliert, aber die Gestaltungsfreiheit der Werkstücke ist bei der Erzeugung von elektrischen Schaltungen auf die Werkstückoberfläche begrenzt. Zudem sind aufgrund der vielen notwendigen Prozessschritte die Herstellungs- und Investitionskosten hoch und lassen sich nur durch hohe Stückzahlen rechtfertigen. Bei den Ansätzen mit additiven Fertigungsverfahren ist die Anzahl der Prozessschritte geringer, da ein Großteil der Schritte in der Anlage durchgeführt werden kann. Weiterhin ist aufgrund der schichtweisen Vorgehensweise die zu beherrschende Geometrie und somit die Komplexität der Steuerung geringer einzustufen, was wiederum den Automatisierungsaufwand und somit die Kosten für die Arbeitsvorbereitung reduziert.

Die Leistung der Verfahren wurde anhand der festgelegten Bewertungskriterien, wie z. B. der Abmessungen der Leiterbahnen und deren elektrischen Widerstandes, verglichen. Werte für die einzelnen Verfahren konnten teilweise der Literatur entnommen werden, da angenommen wurde, dass der *elektrisch-funktionsintegrierte 3D-Druck* eine Kombination aus einem additiven Fertigungsverfahren und einem Direct-Write-Verfahren darstellt und somit die Leistungen vergleichbar sind. Dies ist jedoch wegen der verfahrenstechnischen Restriktionen bei den additiven Fertigungsverfahren eine stark vereinfachende Annahme. Notwendige thermische Nachbehandlungen der leitfähigen Materialien sind aufgrund des verwendeten Grundwerkstoffes oft nicht durchführbar. Weiterhin bietet die Oberfläche der additiv gefertigten Werkstücke meist keinen idealen Untergrund für die Erzeugung von leitenden Strukturen, was die geometrischen Abmessungen der Leiterbahnen beeinflusst. Daher müssen beim *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Druck* Einschränkungen hinsichtlich der Bewertungskriterien hingenommen werden.

### 7.2.2 Applikationsanalyse-Phase

In der Phase der Applikationsanalyse werden zunächst mögliche Anwendungen (Applikationen) der Technologie mithilfe von Methoden der Ideengenerierung gesammelt und anschließend hinsichtlich der Marktanforderungen bewertet. Ba-

## 7 Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

sierend auf den Ergebnissen gilt es in der darauf folgenden Potenzialermittlungs-Phase, eine Einschätzung für den prognostizierten Markt der Applikation vorzunehmen. Dabei genügt es, Aussagen über die Marktgröße und die erzielbare Absatzmenge zu treffen.

Wegen des frühen Entwicklungsstadiums des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Druckprozesses* wurde zur Durchführung einer sinnvollen Applikationsanalyse nicht davon ausgegangen, dass beliebig komplexe Schaltungen in ein Werkstück beliebiger Eigenschaften integriert werden können. Vielmehr wurde von den aktuellen Möglichkeiten und Eigenschaften des 3D-Druckprozesses mit den Erweiterungen zur Erzeugung von elektrischen Schaltungen ausgegangen. Zur Vereinfachung wurde allerdings angenommen, dass die integrierten dreidimensionalen Leiterbahnen die Eigenschaften von kommerziell erzeugten Leiterbahnen besitzen und somit zur Erfüllung der elektrischen Funktionen ausreichend sind.

Für die Generierung von Anwendungsbeispielen wurden neben dem NACE-Katalog weitere mutmaßliche Einsatzgebiete der Technologie ermittelt und als Ideenpool für Applikationen verwendet. Da die elektrischen Funktionen einen nicht leitenden Untergrund benötigen, wurde das Einsatzfeld auf Kunststoffbauteile beschränkt. Für die Identifikation von möglichen Einsatzgebieten wurde daher primär der Absatzmarkt von Kunststoffprodukten untersucht. Diese Informationen dienten als Grundlage für einen Workshop mit Experten aus dem Bereich Additive Fertigung. Identifiziert wurden 34 Anwendungen, die hinsichtlich der zu erwartenden Marktgröße und der Marge bewertet wurden (siehe Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Betrachtete Applikationen im Rahmen der Potenzialanalyse

1	Überwachungssensorik für Dämmstoffe	18	Versteckte Mikrofone
2	Heizdübel	19	Gießautomatik für Topfpflanzen
3	Temperaturlogger für die Nahrungsmittelindustrie	20	Individualisierte Rahmen für Funktionsbrillen
4	Dehnmessstreifen im Bauteil	21	Tasten für einen Piano-Lehrer
5	Verlorenes Gussmodell mit Wärmeaufzeichnung	22	Spezielle Bausteine (bspw. Lego®)
6	Architektur- und sonstige Modelle	23	Bauteile mit integrierter Elektronik für Modellbau
7	Seitenspiegelgehäuse Automobil	24	Spielzeug-Autorennbahn: Start-Ziel-Platte
8	Griffheizung für Motorräder	25	Schachbrett mit Schachcomputer
9	Werkstückträger mit Sensorik	26	Design-Lampen
10	Tiefziehwerkzeug mit Sensorik	27	Design-Wanduhr
11	Greifer mit Sensorik	28	Farbthermometer
12	Werbebeschenke mit elektrischen Funktionen	29	Prothesen, Schienen mit Sensorik
13	Shape-Memory-Aktor	30	Vibrationsband für Hörgeschädigte
14	Individueller Adapter	31	Hörgeräte
15	Lab-on-a-Chip (Analysegeräte)	32	Activity-Tracker
16	Rührwerke für biologische Reaktoren	33	Sicherheitsschlüssel
17	Sensor-Baukasten	34	Sensorverkleidung für Drohnen

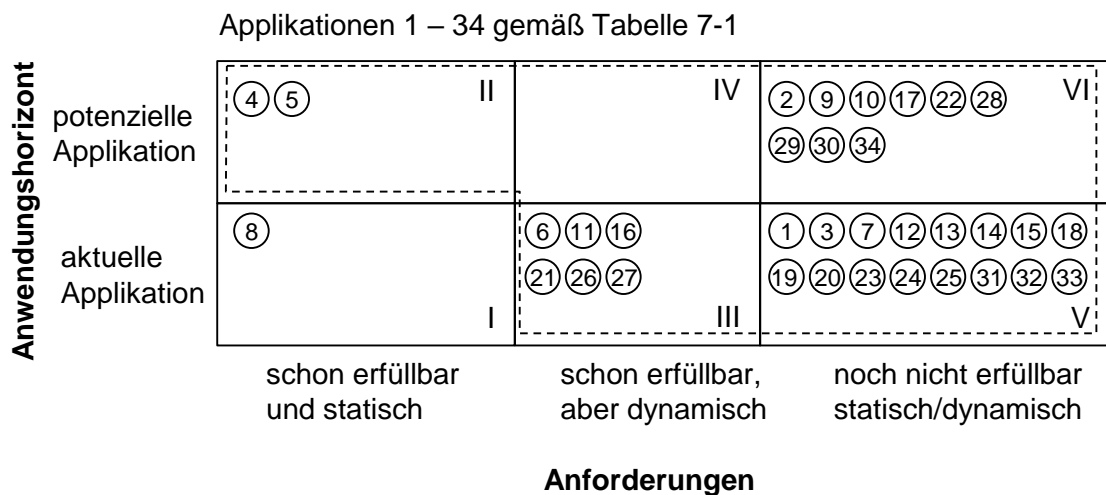


Die Beschreibung und Bewertungen der Anwendungen können dem Anhang, Abschnitt 10.8, entnommen werden.

### 7.2.3 Potenzialermittlungs-Phase

In der Potenzialermittlungs-Phase ist zu klären, ob Anwendungen identifiziert werden können, deren Anforderungen mit dem aktuellen Stand der Technologie bereits umsetzbar sind und, falls dies nicht zutrifft, welche Entwicklungen die Technologie dafür nehmen muss.

Als Grundlage für die Potenzialeinschätzung wurden die erarbeiteten Applikationen aus der vorhergehenden Phase zunächst in ein Diagramm (vgl. Abbildung 7-1) eingeordnet.



*Abbildung 7-1: Einordnung der Anwendungen für die Technologievermarktung und für die Technologieentwicklungsstrategie*

Ist eine Anwendung bereits am Markt erhältlich, handelt es sich um eine „aktuelle Applikation“, sollte die Marktreife erst in Zukunft erreicht werden, um eine „potenzielle Applikation“. Weiterhin wurden die Anforderungen in „schon erfüllbar“ und „noch nicht erfüllbar“ unterteilt. Anknüpfend daran wurde analysiert, ob sich bereits erfüllbare Anforderungen in Zukunft verschärfen könnten oder unverändert bleiben, also dynamisch oder statisch sind. Für eine zielführende Eingliederung der Anwendungen war es wichtig, anders als bei der Applikationsanalyse, alle derzeit bestehenden Einschränkungen zu berücksichtigen. Ausschlusskriterien für eine aktuelle Umsetzung waren eine benötigte Bauteilfestigkeit über 28 MPa oder ein geforderter Auflösungsbereich der filigranen Werkstückstrukturen  $\leq 100 \mu\text{m}$ . Weiterhin wurden Anwendungen nicht berücksichtigt, die einen aktuell nicht erreichbaren elektrischen Widerstand erfordern. Applikationen, die

## 7 Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

---

nicht aufgrund der genannten Kriterien ausgeschlossen werden können, wurden dahingehend bewertet, inwieweit die mit dem Verfahren *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Druckprozess* bereits erreichbaren Eigenschaften für die Anwendung der Applikation ausreichend sind. Ergeben sich Einschränkungen in der Nutzung der Applikation, wurde sie in die Kategorie „schon erfüllbar, aber dynamisch“ eingeordnet.

Die Felder I bis IV sind maßgeblich für die Technologievermarktung, während die Felder II bis VI zur Technologieentwicklung beitragen (siehe gestrichelte Markierung).

Für die Identifikation von Applikationen mit ähnlichen Anforderungsprofilen wurde die Vielzahl der Anforderungen zunächst in Hauptanforderungsbündel zusammengefasst (vgl. Anhang Abschnitt 10.7). Diese drei Hauptanforderungsbündel stellen die Achsen für ein dreiachsiges Diagramm (vgl. Abbildung 7-2) dar, in das eine Einordnung der Anwendungen erfolgte. Ähnlichkeiten zwischen den Applikationen werden dadurch sichtbar und ermöglichen die Bildung von Clustern.

Für eine zielführende Anwendung dieser Methode im Fall des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks* wurden eine Vielzahl an Nebenanforderungen an den 3D-Druck, an die elektrische Funktionsintegration und an das Material (vgl. Anhang Abschnitt 10.7) zu Hauptanforderungsbündeln (vgl. Achsbeschriftung Abbildung 7-2) zusammengefasst. Die identifizierten Applikationen wurden entsprechend den erforderlichen Eigenschaften eingeordnet und mit 0, 1 oder 2 Punkten bewertet. Kriterien, deren Nichterfüllung zum Ausschluss einer Applikation führt, erhielten 4 Punkte. Die einzelnen Bewertungen der 34 Applikationen sind im Abschnitt 10.8 dargestellt.

Die ersten beiden Cluster basieren auf den Ergebnissen in Abbildung 7-1 und repräsentieren die bereits realisierbaren Applikationen. Da die Anlagentechnik theoretisch beliebig skaliert werden kann, ergibt sich eine Notwendigkeit für eine weitere Segmentierung im Anforderungsbereich des 3D-Drucks. Applikationen 4, 8, 17, 21 und 22 sind daher Teil des Clusters „realisierbare Applikationen mit geringen und mittleren Bauraumanforderungen“ und die Applikationen 5, 6, 16 und 26 gehören zum Cluster „realisierbare Applikationen mit großen Bauraumanforderungen“.

Weitere Cluster ergaben sich aus den Applikationen, die aufgrund der Nichterfüllung verschiedener Ausschlusskriterien aktuell nicht umgesetzt werden können. Diese sind in der Abbildung 7-1 in den Feldern V und VI eingeordnet. Auch hier lassen sich Untercluster erkennen, so z. B. durch die Applikationen 2, 10 und 13, die sehr hohe Materialanforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Zugfestig-

keit, haben. Hohe Anforderungen an die elektrische Integration hat der Untercluster mit den Applikationen 30, 31, 32, 33 und 34. Hauptargumente für die hohen Punktwerte waren die hohen Anforderungen an den Leiterbahnwiderstand sowie die Notwendigkeit eines Miniaturisierungsgrades, der mit der aktuellen Technik nicht realisiert werden kann. Die weiteren Applikationen stellten geringe und mittlere Anforderungen an den 3D-Druck, an die Materialeigenschaften und an die elektrische Funktionsintegration. Wie bereits beim ersten Cluster wurde eine weitere Einteilung der Anforderungen an den 3D-Druck hinsichtlich des erforderlichen Bauraums vorgenommen. So stellen die Applikationen 9, 24, 25 und 27 höhere Anforderungen an das Verfahren *3D-Drucken*. Die Applikation 15 und 29 bilden Sonderfälle, da sie gleichzeitig bezüglich mehrerer unterschiedlicher Hauptanforderungen nicht erfüllbare Anforderungen aufwiesen.

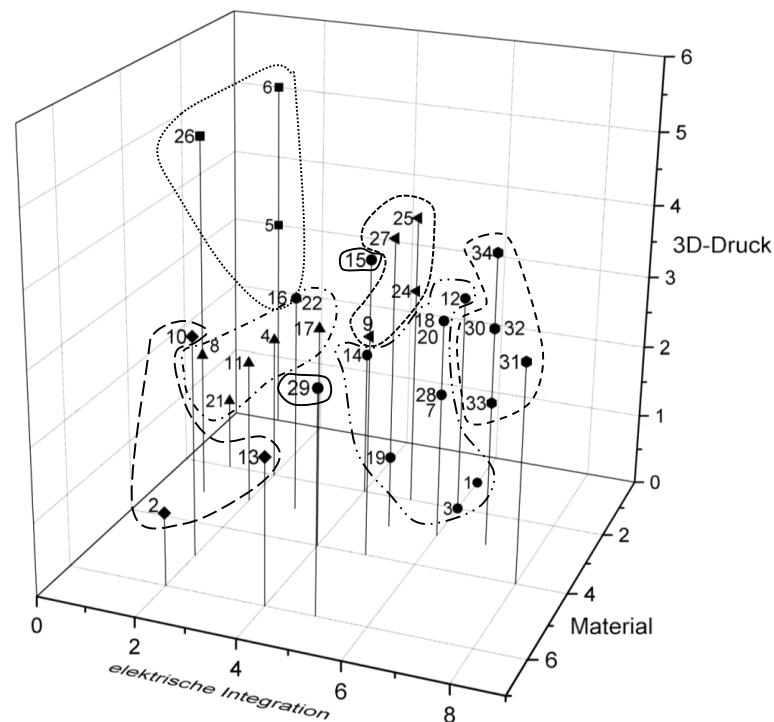


Abbildung 7-2: *Eingliederung der Applikationen nach den Hauptanforderungsbündeln sowie Darstellung der gebildeten Cluster*

Zur Identifikation relevanter Märkte wurden die Applikationen anhand der Faktoren *Marktattraktivität*, *Wettbewerbsintensität* und *Weiterentwicklungsintensität* bewertet und klassifiziert (vgl. Abschnitt 10.8). Je höher die Punktwerte in den einzelnen Faktoren waren, desto unattraktiver ist die Applikation für eine Marktumsetzung. Die Bewertungskriterien wurden wie folgt definiert:

## 7 Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

- Die **Marktattraktivität** hängt in der angewendeten Methode von der Marktgröße und der möglichen Marge ab. Für die Applikationen, die mithilfe des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks* hergestellt werden, ist eine derartige Einschätzung wenig aussagekräftig. Der Grund dafür ist, dass mit der additiven Fertigung eine Produktionstechnologie zu Grunde liegt, die besondere Vorteile (bspw. Stückzahlflexibilität, geometrische Gestaltungsfreiheiten, etc.) aufweist und daher unabhängig von der Marktgröße bei spezifischen Anwendungen sinnvoll eingesetzt werden kann. Aus diesem Grund wird die Marge höher gewichtet. Die Bewertung der Applikationen erfolgte nach dem Maßstab gemäß Tabelle 7-2:

Tabelle 7-2: Bewertungsschema für die Marktattraktivität

Bewertungskriterium		Punkte		Punkte		Punkte
<b>Marktgröße</b>	klein	0	mittel	1	groß	2
<b>Marge</b>	gering	0	mittel	2	hoch	4

- Die **Weiterentwicklungsintensität** gibt Auskunft darüber, wie viele Kenngrößen der Technologie noch verbesserungsbedürftig sind und wie weit diese von den Anforderungen der Anwendung entfernt sind. Einen Anhaltspunkt gibt bereits Abbildung 7-2, da Applikationen, die weiter vom Ursprung entfernt sind, auch einen höheren Aufwand in der Umsetzung erfordern. Da die drei Achsen unterschiedlich hohe Entwicklungshürden darstellen, werden diese mithilfe der Gleichung 7-1 entsprechend gewichtet. Sprünge in der Technologieentwicklung werden darin ebenso berücksichtigt wie die Anzahl der zurzeit nicht erfüllbaren Hauptanforderungen (*n.e.Anf.*). Der Entwicklungsbedarf (EWB) für eine Applikation ist eine dimensionslose Kennzahl und berechnet sich wie folgt:

$$EWB = \frac{M}{2} + \frac{e.I.}{2} + \frac{3D}{3} + 2 \cdot n.e.Anf. \quad (Gl. 7-1)$$

mit

- M*: Anforderungen an das Material
- e.I.*: Anforderungen an die elektrische Integration
- 3D*: Anforderungen an den 3D-Druckprozess
- n.e.Anf.*: nicht erfüllbare Hauptanforderungen

- Die **Wettbewerbsintensität** verdeutlicht, inwiefern die Anwendung nur durch die eigene Technologie bzw. auch durch Konkurrenztechnologien generiert werden kann. Applikationen, die durch kommerzielle Verfahren erzeugt werden können und somit einem hohen Wettbewerb unterliegen,

## 7.2 Methodenbeschreibung und -anwendung

werden mit 2 Punkten bewertet. Ist eine Umsetzung mit bestehenden Technologien nur teilweise oder nicht realisierbar, werden 1 Punkt bzw. 0 Punkte vergeben. Zusätzlich wurden die Potenziale des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks* berücksichtigt, indem folgende Kriterien herangezogen und mitbewertet werden:

- Möglichkeit der Individualisierung (ja: 0/ nein: 1)
- Prestigegewinn durch die Technologie (ja: 0/ nein: 1)
- Production on Demand möglich (ja: 0/ nein: 1)
- Reduzierung der Prozessschritte (bei einer Großserienproduktion) (ja: 0/ nein: 1)

Eine hohe Wettbewerbsintensität am Markt wird in Abbildung 7-2 durch einen hohen Punktwert dargestellt. Demzufolge werden positive Eigenschaften mit 0 Punkten bewertet. Der Betrachtungsraum ist unabhängig davon, ob die Applikation bereits realisierbar ist oder nicht. Dieser Aspekt wird bereits in der Weiterentwicklungsintensität berücksichtigt.

Die einzelnen Applikationen wurden bewertet (siehe Tabellen Abschnitt 10.8) und in Tabelle 7-3 klassifiziert.

*Tabelle 7-3: Klassifizierung der Applikationen anhand der Kriterien Marktattraktivität, Entwicklungsbedarf und Wettbewerbsintensität*

Einteilung für die <b>Marktattraktivität</b>	gering {M ≤ 1}	mittel {1 < M ≤ 3}	hoch {M > 3}
Applikationen	1, 2, 14, 19, 23	3, 7, 8, 10, 12, 18, 21, 22, 24, 32	4, 5, 6, 9, 11, 13, 15, 16, 17, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34
Einteilung für den <b>Entwicklungsbedarf</b>	gering {E ≤ 5}	mittel {5 < E ≤ 8}	hoch {E > 8}
Applikationen	4, 5, 6, 8, 11, 16, 17, 31, 21, 22, 26,	1, 2, 3, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 32, 33, 34	15, 29, 31
Einteilung für die <b>Wettbewerbsintensität</b>	gering {W ≤ 2}	mittel {2 < W ≤ 4}	hoch {W > 4}
Applikationen	4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 20, 26, 27, 28	7, 11, 13, 14, 17, 18, 22, 23, 25, 29, 30, 31	1, 2, 3, 15, 16, 19, 21, 24, 30, 32, 33, 34

Bei den Abschnitten *Marktattraktivität* und *Wettbewerbsintensität* wurden die Weiten der Bewertungsbereiche möglichst gleich groß gewählt. Für die Achse des Entwicklungsbedarfs wurden die Abschnitte so gewählt, dass die unterschiedlichen Entwicklungssprünge berücksichtigt werden. Gleichzeitig wurde angenommen, dass jede Applikation einer Entwicklung bedarf. Dies erzeugt aufgrund des

## 7 Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

---

Neuheitsgrades der Technologie einen unterschiedlichen Aufwand in der Umsetzung. So gibt es Potenziale, die noch nicht ausgeschöpft wurden. Andere sind theoretisch möglich, bedürfen aber eines größeren Entwicklungsaufwands, beispielsweise bei der Anlagentechnik des Verfahrens *3D-Drucken*. Die wirtschaftlich erfolgversprechendsten Applikationen liegen im Bereich mit einer hohen Marktattraktivität und einer geringen Wettbewerbsintensität. Diese Applikationen benötigen keine bzw. nur eine geringe Weiterentwicklung und sind somit maßgeblich für die aktuelle Technologievermarktung. Am besten erfüllen diese Anforderungen die Applikationen 4, 5, 6, 11 und 26 und diese weisen somit das größte Potenzial für eine Vermarktung auf.

Werden die Applikationen im Detail betrachtet, kann abgeleitet werden, dass diese zunächst im Bereich der Modelle und Prototypen sowie der Kleinserienfertigung des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks* ihre Hauptanwendungen finden, auch wenn der aktuell noch hohe elektrische Widerstand der Leiterbahnen ein Hemmnis darstellt. Dieser Wert sollte durch eine Weiterentwicklung der Technologie verringert werden.

Bei Applikationen mit fehlender *Marktattraktivität* oder einer hohen *Wettbewerbsintensität* handelt es sich um tendenziell unattraktive Anwendungen. Sie gilt es, gemeinsam mit weiteren angrenzenden Anwendungen näher zu betrachten und je nach strategischer Relevanz einen Technologiestrategieprozess zu entwickeln, um die *Marktattraktivität* der Applikation zu steigern bzw. sich von der Konkurrenz durch individuelle Alleinstellungsmerkmale abzuheben. Folgende Entwicklungsziele lassen sich davon ableiten:

- **Leiterbahnwiderstand:**  
Der elektrische Widerstand der Leiterbahnen muss für eine Realisierung der Applikationen verringert werden. Dies kann beispielsweise durch eine Verbesserung der Abgabetechnik, eine Verbesserung der Oberfläche oder durch ein neues Pulver-Binder-System erreicht werden.
- **Miniaturisierung:**  
Die Abmessungen der aktuellen elektrischen Schaltungen sind für einige Applikationen noch zu groß, wodurch das Potenzial der Technologie nicht vollständig genutzt werden kann. Eine Miniaturisierung der Schaltungen ist somit anzustreben.
- **Optische Eigenschaften:**  
Die optischen Eigenschaften der Komponenten aus dem 3D-Druckprozess decken nicht die Anforderungen der Applikationen ab, die hauptsächlich durch Design charakterisiert sind. Neben dem Fehlen farbiger Komponenten entspricht die Oberflächenqualität weder optisch noch haptisch den

Wünschen der Kunden. Materialentwicklungen sowie Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung sollten untersucht werden.

- **Material:**

Die Temperatureigenschaften des Materials stellen bei den entwickelten Applikationen kein Hindernis dar, da diese meist bei Raumtemperatur angewendet werden. Entwicklungspotenzial wird in der aktuell noch geringen mechanischen Festigkeit des Ausgangsmaterials gesehen, was den Einsatz der Technologie stark einschränkt. Weitere Material-Binder-Kombinationen mit einer höheren mechanischen Festigkeit bzw. die Erstellung von zu hundert Prozent dichten Werkstücken sollten daher angestrebt werden.

Einen Vorteil stellt die breite Fächerung der Applikationen in den unterschiedlichen Branchen (Medizintechnik, Design, Greiftechnik etc.) dar. Eine Weiterentwicklung der Technologie in einem Bereich generiert einen Multiplikatoreffekt, der die Anwendung in anderen Bereichen ermöglicht, wodurch die Technologie schnell Verbreitung finden kann.

### 7.3 Applikationsbeispiel

Die mit der neuen Technologie umsetzbare Applikation 11 „Greiffinger mit Sensorik“ wurde im Hinblick auf eine wirtschaftliche Bewertung näher betrachtet (vgl. Abbildung 7-3).

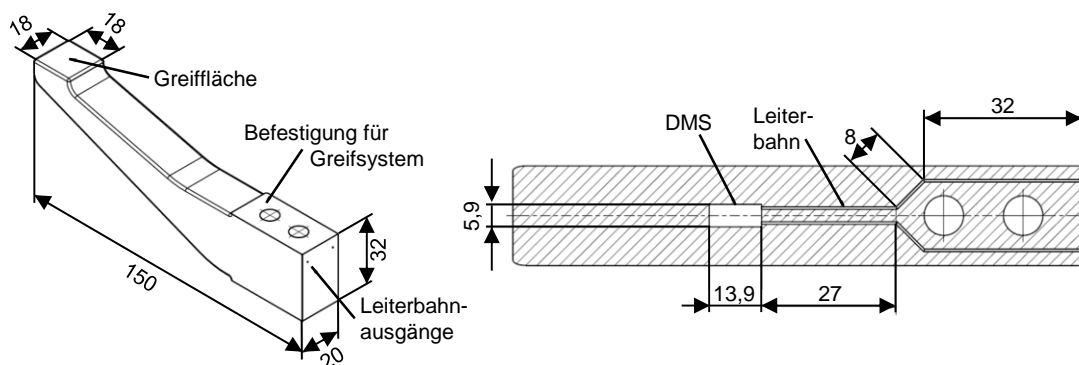


Abbildung 7-3: Beispiel eines Greiffingers (links) mit integriertem Dehnungsmessstreifen (DMS) (Schnitt rechts); alle Angaben in mm

Ein industrieller Einsatz dieser Applikation existiert bereits (SENGÜL ET AL. 2010). Zum Beispiel ermöglicht ein Kraftsensor im Bauteil die statische und dynamische Überwachung der Griffkraft und die regelmäßige Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Greifers. Die Messung der Kräfte erfolgt in der Regel bei nicht taktile Greifern über die Last der Motoren, die den Greifer öffnen und schließen. Da

dadurch kein Rückschluss auf die anliegende Kraft je Finger gezogen werden kann, bietet die Applikation dank ihrer Sensorik den Vorteil einer gleichmäßigen Krafteinwirkung auf das zu greifende Objekt und somit eine schonende Handhabung. Außerdem können die Messwerte an den einzelnen Fingern genutzt werden, um Komponenten zu greifen, deren genaue Lage und/oder Form unbekannt ist. Durch den Eingriff in die Steuerung kann der Roboter entsprechend nachgeführt und so die Greifposition angepasst werden. Die Kraftsensoren ermöglichen zudem eine Kollisionserkennung im Greifbereich, um einen frühzeitigen Ausfall des Greifers zu verhindern.

Die Herstellung der Greifer mithilfe additiver Fertigungsverfahren ermöglicht es, sie einfach und kostengünstig an die Form des zu greifenden Objekts anzupassen. Durch eine Erweiterung des Greifers mit einem innenliegenden Kraftsensor (z. B. Dehnungsmessstreifen) sowie mit elektrischen Leiterbahnen für die Anschlüsse lässt sich ein mit Sensorik erweiterter Greifer erzeugen. Wegen der innenliegenden elektrischen Schaltungen kann eine hygienische Handhabung realisiert werden, was vor allem für die Verarbeitung von Lebensmitteln relevant ist.

### 7.4 Wirtschaftliche Bewertung

Für die wirtschaftliche Bewertung wurden die Kosten eines additiv gefertigten Greifers mit integrierten elektrischen Funktionen mit einer Variante verglichen, die durch ein Spritzgussverfahren und mit einem an der Oberfläche aufgebrachtene Dehnungsmessstreifen hergestellt wurde. Für die Ermittlung der Kosten wurde die Maschinenstundensatzrechnung, beschrieben in REINHART (2013), angewendet. Eine Integration der Elektronik in das spritzgegossene Werkstück wäre möglich. Da dazu aber mehrteilige Spritzgusswerkzeuge benötigt werden, was hohe Kosten verursacht, wurde lediglich eine Aufbringung der Sensorik auf die Bauteiloberfläche mit einer Anbindung über Kabel betrachtet. Zur Nachvollziehbarkeit der Berechnung sind die Daten und Annahmen im Anhang (Abschnitt 10.9) hinterlegt.

Einer näheren Betrachtung unterzogen wurde nur die Herstellung des Greifers, nicht die des Greifmechanismus, da es sich um eine Funktionserweiterung eines konventionellen Greifers handeln soll. Auch die Kalibrierung des Systems sowie die Entwicklung des Regelungsalgorithmus wurden nicht berücksichtigt. Für die Abschätzung der Fertigungskosten des Greifers bei Verwendung der additiven Fertigungsverfahren wurde von einer industriellen Anlage vom Typ *voxeljet VX 1000* ausgegangen. Kennzahlen für die Berechnung der Kosten zur Erstellung der elektrischen Funktionen wurden von der Versuchsanlage übernommen. Eine Aufstellung der Materialkosten (Tabelle 10-4) verdeutlicht, dass diese bei der Variante *elektrisch-funktionsintegrierter 3D-Druck* deutlich höher sind als bei der Variante



mit Spritzgussverfahren. Dies liegt an den höheren Kosten für die speziell auf das Verfahren *3D-Drucken* abgestimmten Materialien gegenüber den Kosten der beim Spritzguss eingesetzten Standardmaterialien.

Für die variablen Kosten beim Verfahren *3D-Drucken* wurden folgende Arbeitsschritte berücksichtigt:

- $MSS_{3D\text{-Drucker}}$ : Fertigung der Bauteile mit elektrischen Funktionen
- $MSS_{\text{Entpacken}}$ : Entpacken der Bauteile
- $MSS_{\text{Ofen}}$ : Aushärten der Bauteile im Ofen
- $MSS_{\text{Strahlen}}$ : Strahlen zur Erzielung einer besseren Oberfläche
- $MSS_{\text{Infiltrieren}}$ : Infiltrieren zur Festigkeitssteigerung
- $MSS_{\text{Reinigen}}$ : Entfernen von überschüssigem Epoxidharz

Im Vergleich fallen folgende Kosten bei der Herstellung mithilfe des Spritzgusses an:

- $MSS_{\text{Spritzguss}}$ : Herstellung der Bauteile
- $MSS_{\text{DMS}}$ : Anbringen des DMS
- $MSS_{\text{Löten}}$ : Anlöten der Kabel
- $MSS_{\text{Kleben}}$ : Fixieren der Kabel mit Klebeband

Die variablen Kosten sind bei der Herstellung im Spritzgussverfahren und bei anschließender manueller Erweiterung durch einen DMS deutlich geringer als die vollständige Fertigung durch das additive Fertigungsverfahren. Dafür entfallen durch den Einsatz des Verfahrens *3D-Drucken* die Einmalkosten, da keine Spritzgusswerkzeuge benötigt werden. Außerdem ist der Aufwand für die Arbeitsvorbereitung (AV) deutlich geringer. Zusätzlich Kosten können folglich eingespart werden. Für die Montage der DMS an den spritzgegossenen Werkstücken werden Montageanleitungen und dementsprechende Arbeitsplätze benötigt. Dies erzeugt zu den Herstellungskosten weitere Sonderfertigungskosten im Vergleich zum 3D-Druck. Die AV-Kosten konnten aufgrund mangelnder Datengrundlage nur abgeschätzt werden. Folgende Kosten für beide Varianten wurden für die Berechnung verwendet:

## 7 Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Tabelle 7-4: Gegenüberstellung der Kosten

Stückkosten Variante 1 (3D-Druck)		Stückkosten Variante 2 (Spritzguss)	
var. Materialkosten	13,52 €	var. Materialkosten	7,65 €
var. Fertigungskosten	2,71 €	var. Fertigungskosten	0,52 €
var. Herstellungskosten	16,23 €	var. Herstellungskosten	8,17 €
Werkzeugkosten	0 €	Werkzeugkosten	15.000 €
AV-Kosten	200 €	AV-Kosten	1.500 €

Für die Bewertung beider Verfahren wurde eine Break-Even-Analyse durchgeführt. Die Kosten und die Erlöse weisen dabei einen linearen Verlauf in Abhängigkeit von der Stückzahl auf. Die Anzahl der Bauteile pro Bauauftrag beim additiven Fertigungsverfahren lag unter Einsatz einer Industrieanlage vom Typ *voxeljet VX 1000* bei 157 Stück. Die benötigte Zeit zum Wechseln des Baubehälters wurde bei der Berechnung mit berücksichtigt. Der Break-Even-Punkt beschreibt die kritische Ausbringungsmenge, bei der beide Verfahren gleich liegen. Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung wird in Abbildung 7-4 veranschaulicht.

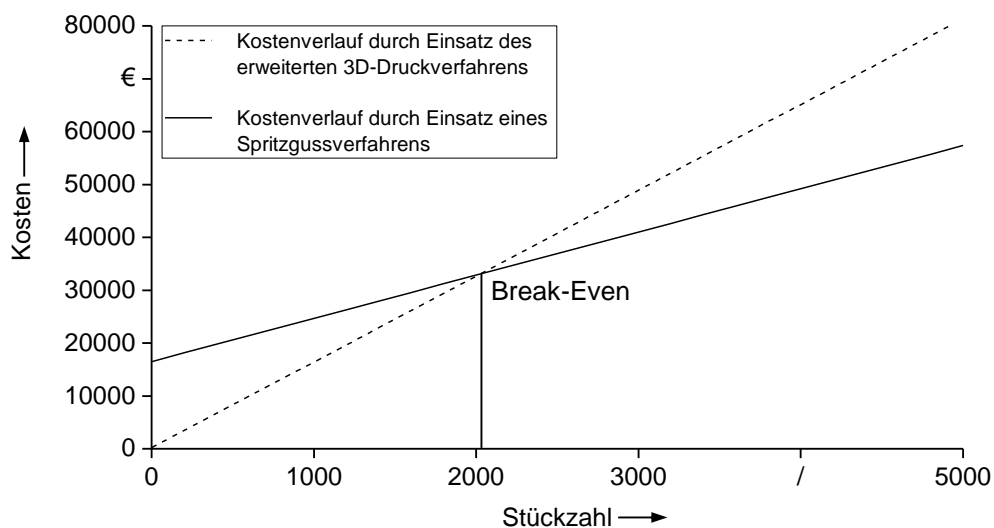


Abbildung 7-4: Break-Even-Analyse der Produktionskosten für den Greifer mit DMS

Bei den getroffenen Annahmen ist bis zu einer Ausbringungsmenge von 2022 Stück die Herstellung des Greifers mithilfe des erweiterten additiven Fertigungsverfahrens kostengünstiger. Die Analyse bestätigt die Hypothese, dass die Technologie des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks* aktuell in erster Linie für Sonderanfertigungen bzw. Kleinserienproduktionen relevant ist. Gerade bei der

gewählten Applikation der Greiftechnik bei stark variierenden zu greifenden Produkten konnte daher ein interessantes und vielversprechendes Anwendungsgebiet gefunden werden.

### 7.5 Umsetzung am Beispiel eines Demonstrators

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse führten zur Auswahl eines Greifwerkzeugs mit innenliegendem Dehnungsmessstreifen (DMS) als Demonstratorbauteil. Für den Demonstrator sollte kein bestehender Sensor eingelegt werden, sondern dieser sollte mithilfe des Multimaterialmoduls während des Prozesses erstellt werden.

Das Prinzip des DMS besteht darin, dass bei einer Biegung der Greifbacken sich die Länge und der Querschnitt der Leiterbahn und somit der elektrische Widerstand ändern, was Rückschlüsse auf die vorherrschende Belastung ermöglicht. Abbildung 7-5 stellt den Demonstrator dar.

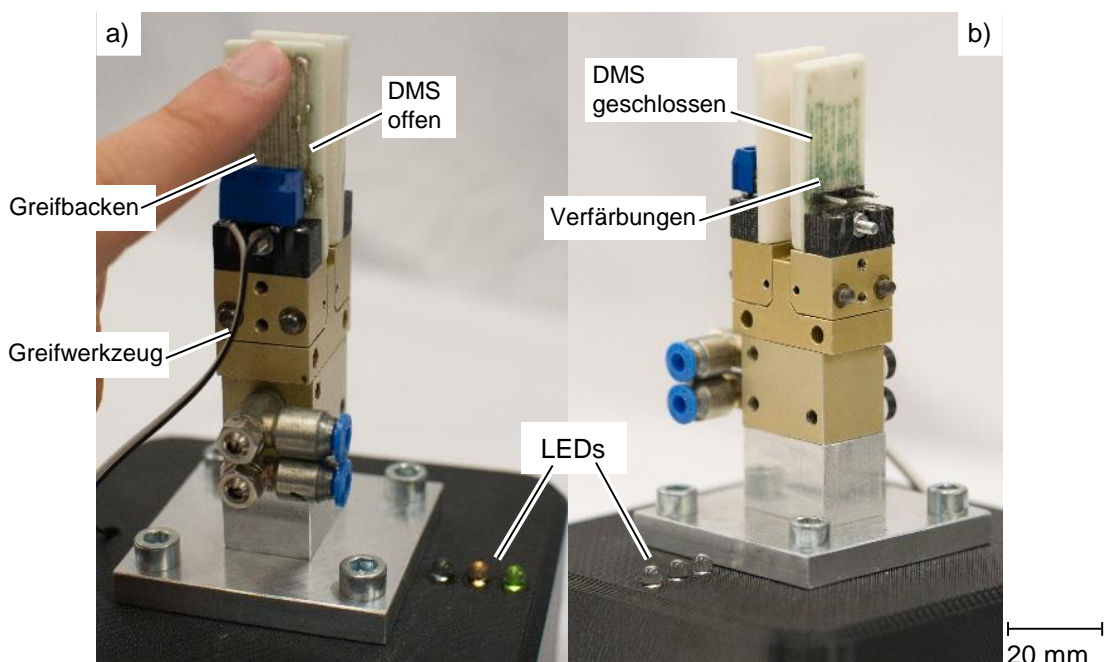


Abbildung 7-5: Demonstratorbauteil: Plattengreifer mit integrierten Dehnungsmessstreifen; a) nicht bedeckter DMS (offen) im Funktionsversuch, b) integrierter DMS (geschlossen)

Zur Verringerung der Komplexität des Demonstrators wurden die Greifbacken ohne vertikale Leiterbahnen erzeugt. Für die Herstellung des Demonstrators wurde zunächst ein quaderförmiger Grundkörper gedruckt, mit dem Unterdruckmodul eine Kavität erzeugt und anschließend wurden mithilfe des Multimaterialmoduls

mäanderförmige Leiterbahnen abgelegt. Anschließend wurde der additive Aufbauprozess fortgeführt. Die Werkstücke befanden sich nach dem Bauprozess 24 Stunden lang im Pulverbett und wurden im Anschluss bei 40 °C 4 Stunden lang im Ofen thermisch nachbehandelt. Zur Darstellung der Funktionsfähigkeit wurde ein Einplatinencomputer eingesetzt, der den Widerstandswert sekundlich erfasst und bei steigenden Werten und somit bei zunehmender Biegung der Greifer LEDs in den Farben grün, gelb und rot aufleuchten lässt.

Die Verfärbungen in Abbildung 7-5 b) weisen auf die innenliegenden Leiterbahnen hin und entstehen durch die Infiltration des porösen Materials mit dem im Leitklebstoff enthaltenen Epoxidharz.

### 7.6 Zusammenfassung

Für die Potenzialanalyse wurde eine dreistufige Methode eingesetzt, die im Anschluss durch eine wirtschaftliche Bewertung ergänzt wurde.

In der ersten Phase wurde die entwickelte Technologie des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Druckprozesses* detailliert beschrieben und mit bestehenden Konkurrenztechnologien (Direct-Write-Verfahren, MID-Technologie und andere additive Fertigungstechnologien) verglichen. Speziell im Bereich der Individualisierung und Flexibilisierung haben additive Fertigungstechnologien mit erweiterter elektrischer Funktionsintegration entscheidende Vorteile gegenüber den anderen Technologien.

In der zweiten Phase wurden durch eine systematische Analyse möglicher Einsatzgebiete und Absatzmärkte sowie anhand einer Expertenbefragung 34 mögliche Applikationen identifiziert, die in der dritten Phase hinsichtlich der Marktanforderungen bewertet wurden. Ziel war die Identifikation von Anwendungen mit einer hohen Marktattraktivität bei gleichzeitig geringem Entwicklungsbedarf sowie einer geringen Wettbewerbsintensität. Dabei konnten aus den 34 Applikationen fünf identifiziert werden, die bereits ein großes Potenzial für eine Vermarktung aufweisen. Basierend auf dem Ergebnis der Potenzialanalyse wurde am Beispiel eines Greifers mit integriertem Dehnungsmessstreifen zunächst eine wirtschaftliche Bewertung durchgeführt und es wurden die Herstellungskosten mit den Kosten beim Einsatz eines Spritzgussverfahrens verglichen. Durch den Wegfall der hohen Fixkosten für die Werkzeugherstellung ist das Verfahren des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks* für Kleinserien die kostengünstigere Alternative. Die Umsetzung des ausgewählten Beispiels erfolgte anhand eines erweiterten Demonstrators. Im abschließenden Kapitel 8 werden die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst.

## 8 Schlussbetrachtung

### 8.1 Zusammenfassung

Die Forderung des Marktes nach kundenindividuellen, innovativen Produkten mit zunehmender Funktionalität und die Beschleunigung der Produktentwicklung bedeuten große Herausforderungen für Unternehmen, wenn sie sich erfolgreich gegenüber Mitbewerbern durchzusetzen wollen. Additive Fertigungsverfahren erfüllen diese Forderungen zum überwiegenden Teil. Ein Vorteil der additiven Verfahren ist die Möglichkeit der Funktionsintegration. Die Aufgabe dieser Arbeit lag in der Erforschung der Möglichkeiten zur Integration von einfachen elektrischen Schaltungen in additiv gefertigte Werkstücke am Beispiel eines pulverbettbasierten 3D-Druckprozesses.

In Kapitel 2 wurde zunächst eine Analyse des Verfahrens *3D-Drucken* durchgeführt. Dazu gehören neben dem additiven Aufbauprozess auch die relevanten Eigenschaften des eingesetzten Material- und Bindersystems, eine Übersicht über die technischen Werkstückeigenschaften sowie die mit diesem Verfahren erreichbaren Potenziale und verbundenen Einschränkungen in einer industriellen Anwendung. Weiterhin wurden entsprechend der Zielsetzung eine einfache elektrische Schaltung ausgelegt und die notwendigen Eigenschaften der elektrischen Leiterbahnen ermittelt. Basierend auf diesen Grundlagen und der Zielsetzung wurden Anforderungen an die zu entwickelnden Prozesserweiterungen identifiziert.

Kapitel 3 beinhaltet den aktuellen Stand der Forschung und Technik in den Bereichen der *Leiterbahnerzeugung* sowie der *Integration von elektrischen Komponenten* in ein Werkstück. Zur Einschränkung des weiten Betrachtungsfeldes wurden nur Ansätze in Kombination mit einem additiven Fertigungsverfahren betrachtet. Trotz der Vielzahl solcher Ansätze ließ sich ein Handlungsbedarf ableiten, der die Notwendigkeit dieser Arbeit verdeutlicht.

Kapitel 4 konzentrierte sich auf die Entwicklung verschiedener Prozesse für die Zielerreichung. Dabei wurden die zwei Hauptbereiche, um die der Druckprozess des Verfahrens *3D-Drucken* erweitert werden muss, identifiziert: die *Integration von elektrischen Leiterbahnen* und die *Integration von elektrischen Komponenten*. Anhand der definierten Anforderungen wurden für beide Subsysteme Prozesse erarbeitet und deren prinzipielle Umsetzbarkeit anhand von Vorversuchen belegt. Dabei stellte sich bei der Erzeugung der Leiterbahnen heraus, dass aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit Leitklebstoffe eingesetzt werden müssen. Diese sickern nicht in das Pulverbett ein und bilden eine zusammenhängende elektrische Leiterbahn auf der Bauteiloberfläche. Für die weiteren Untersuchungen wurde ein

## 8 Schlussbetrachtung

---

Leitklebstoff eingesetzt, der gleichzeitig zur Ankontaktierung von elektrischen Komponenten, z. B. SMDs, an die Leiterbahnen verwendet werden kann. Der Einsatz dieses Materials erforderte jedoch die Erzeugung von Kanälen im Pulverbett, um die Leiterbahnen unterhalb der obersten Pulverschicht zu platzieren und somit einen Kontakt des leitfähigen Materials mit dem Beschichter zu vermeiden. Für die Erzeugung der Vertiefungen musste daher ein zusätzlicher Prozess zur *Erzeugung von Kavitäten* entwickelt werden. Ein Unterdrucksystem stellte nach Analyse unterschiedlicher Wirkprinzipien das am besten geeignete Verfahren dar, um loses Pulvermaterial definiert aus einem Pulverbett zu entfernen. Nach einer Analyse unterschiedlicher Greiftechniken ergab eine Bewertung, dass das Unterdrucksystem auch für die Handhabung der elektrischen Komponenten die beste Methode ist. Somit konnten zwei geforderte Funktionen mit einem System abgedeckt werden. Die zusätzlichen Prozesse wurden abschließend in einem neuen Gesamtprozessmodell dargestellt.

Nachdem die Prozesse für die Zielerreichung entwickelt worden waren, galt es in Kapitel 5, die für die Umsetzung relevanten Module zu konzipieren und die Versuchsanlage entsprechend technisch zu erweitern. Nach der Beschreibung des bestehenden Versuchsstandes und der detaillierten Aufnahme der zusätzlichen Prozessschritte anhand von Funktionsmodellen wurde die hard- und softwaretechnische Umsetzung der Module beschrieben. Für die Abgabe des Leitklebstoffs wurde ein Dispensersystem, für die lokale Entfernung von Pulverpartikeln sowie zum Transport der SMDs ein Unterdrucksystem entwickelt. Die Steuerung erfolgt teilautomatisiert mithilfe von NC-Sprachbefehlen.

Die Systeme wurden in Kapitel 6 im Hinblick auf die erreichbaren Eigenschaften untersucht. Es wurde zunächst das Verhalten des leitfähigen Materials auf der Bauteiloberfläche sowie dessen Reaktion auf thermische und elektrische Belastungen analysiert. Eine Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur konnte festgestellt werden, auch wenn diese nach Rückführung auf die Umgebungstemperatur zu keiner Beeinträchtigung der Leiterbahn führte. Eine Beaufschlagung der Leiterbahn mit einer elektrischen Leistung von max. 5 W führte zu keiner Veränderung ihrer Eigenschaften. Nach der Untersuchung des Materials wurde die Erzeugung von zwei- und dreidimensionalen Leiterbahnen näher untersucht. Dazu wurden zunächst jeweils die für die Erzeugung relevanten Parameter identifiziert und im Rahmen von Versuchsplänen variiert, um ihren Einfluss auf die Abmessungen der Leiterbahn sowie auf den elektrischen Widerstand zu ermitteln. Als maßgebliche Einflussfaktoren auf zweidimensionale Leiterbahnen konnten die Geschwindigkeit der Achsenbewegung und die Kolbengeschwindigkeit identifiziert werden. Bei vertikalen Leiterbahnen bestand die Herausforderung in der Ankontaktierung an die innenliegende horizontale Leiterbahn. Beim dazu

notwendigen Einstechvorgang wurde eine Deformation der horizontalen Leiterbahn festgestellt, was den Übergangswiderstand am unteren Knotenpunkt verschlechterte. Die Ankontaktierung von elektrischen Komponenten konnte ohne Einschränkungen reproduzierbar durchgeführt werden. Die Ergebnisse sowie beide Module wurden in Kapitel 6 zum Schluss des jeweiligen Abschnitts kritisch bewertet. Dabei wurde auf Schwierigkeiten während der Versuchsdurchführung eingegangen und mögliche Erklärungen für deren Auftreten gegeben, die im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten detailliert untersucht werden müssen.

Anhand einer Potenzialanalyse wurden in Kapitel 7 mögliche Einsatzgebiete der neuen Technologie identifiziert. Anhand einer wirtschaftlichen Bewertung konnte belegt werden, dass eine Erweiterung des 3D-Druckprozesses um eine Möglichkeit zur Integration von elektrischen Funktionen bereits im jetzigen frühen Entwicklungsstadium potenzielle Anwendungsgebiete hat, bei denen eine sinnvolle Einsatzmöglichkeit gegeben ist. Anhand eines Demonstrators, Greifbacken für einen Parallelgreifer mit innenliegendem Dehnungsmessstreifen, wurde die Praktikabilität des *elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Druckprozesses* nachgewiesen.

## 8.2 Ausblick

Die Integration von elektrischen Schaltungen in ein 3D-gedrucktes Werkstück eröffnet neue Anwendungsgebiete für die additive Fertigung. Gerade der Ansatz, komplexe Schaltungen in Werkstücke ohne deren Teilung zu integrieren, bietet Chancen und Möglichkeiten, die aktuell noch nicht in vollem Umfang erfasst werden können. Die Betrachtung des aktuellen Standes der Forschung und Technik verdeutlicht, dass es bereits viele Aktivitäten im Bereich der Erzeugung elektrischer Schaltungen auf einer Bauteiloberfläche gibt. Die Kombination mit einem additiven Fertigungsverfahren ist aktuell lediglich Bestandteil von Forschungsaktivitäten und bietet ebenfalls noch zahlreiche Herausforderungen für Forscherinnen und Forscher.

Eine Herausforderung stellt die Verbesserung der Erzeugung von elektrischen Leiterbahnen dar. Der aktuelle Ansatz weist einige Nachteile auf, so z. B. die im industriellen Vergleich hohen Widerstandswerte sowie die noch zu großen Abmessungen, wodurch der zusätzliche Arbeitsschritt der Kanalerzeugung eingesetzt werden muss, was sich negativ auf die Herstellungszeit auswirkt. Neue Forschungsgebiete könnten sich mit neuen Materialien (Pulver/Binder und leitfähige Materialien) beschäftigen, um diese Nachteile in Zukunft auszugleichen. Zur Verringerung des elektrischen Widerstandes wäre es vorstellbar, eine punktuelle thermische Nachbehandlung des leitfähigen Materials in den Aufbauprozess zu integrieren. Erste vielversprechende Ergebnisse auf Grünlingen stellten HOERBER

## 8 Schlussbetrachtung

---

ET AL. (2014) vor. Eine Erhöhung der Packungsdichte der Pulverkörner könnte zudem den Einsatz von niedrigviskosen leitfähigen Materialien ermöglichen. Ein weiterer interessanter Ansatz wäre es, die Eigenschaften des Pulverbetts lokal zu beeinflussen, um somit ein Einsickern niedrigviskoser Flüssigkeiten zu unterbinden. Beide Ansätze würden die Erzeugung von Leiterbahnen mit geringeren geometrischen Abmessungen ermöglichen.

Für einen industriellen Einsatz wäre zudem die Entwicklung eines Überwachungssystems notwendig. Dieses müsste in der Lage sein, beim regulären Aufbauprozess sowohl den Bindereintrag als auch die Pulverschichtdicke und bei der Erzeugung der elektrischen Schaltungen die Abgabe des leitenden Materials und das Einlegen der elektrischen Komponenten zu überwachen und gegebenenfalls regelnd einzugreifen. So könnten Fehler bei der Materialabgabe sowie bei der Positionierung der Komponenten vermieden und damit die Prozesssicherheit gesteigert werden.

Bei der Erstellung der Arbeit ergaben sich weitere Potenziale und Einsatzbereiche der entwickelten Technologien, die in weiteren Forschungsarbeiten ebenfalls untersucht werden müssen. So wurden in einem Vorversuch in die Kavitäten Gewindemuttern aus Metall integriert, bevor der Aufbauprozess fortgesetzt wurde. Nach der thermischen Nachbehandlung und dem anschließenden Entfernen des losen Pulvermaterials konnte eine mechanische Verbindungsstelle in einem Kunststoffbauteil erzeugt werden. Im Vergleich zu Gewinden, die direkt in das Kunststoffmaterial (infiltriert mit Epoxidharz) eingebracht wurden, konnte durch den Einsatz einer Gewindemutter die Zugkraft verdoppelt werden. Ein weiterer Ansatz sah die Integration eines Kohlenstofffaserbündels zur Erzeugung von langfaserverstärkten Kunststoffen vor. Die Bündel wurden im Vorversuch manuell eingelegt und der Aufbauprozess wurde anschließend fortgeführt. Die mit Epoxidharz infiltrierten Probekörper hatten eine um 27 Prozent höhere Zugfestigkeit als Vergleichsproben ohne Faserverstärkung. Die detaillierten Ergebnisse wurden in GLASSCHROEDER ET AL. (2015) veröffentlicht.

Mit der vorliegenden Arbeit wurden Grundlagen geschaffen, um in einem pulverbettbasierten 3D-Druckprozess elektrische Schaltungen sowohl in einer Schicht als auch schichtübergreifend zu erzeugen. Die Umsetzbarkeit und die Funktionsfähigkeit wurden an einer Vielzahl von Probekörpern und an einem Demonstrator belegt. Dennoch verdeutlichen die Ergebnisse, dass in dieser Technologie mehr Potenzial steckt als aktuell realisiert werden kann. Speziell die Kombination des aufbauenden additiven Fertigungsverfahrens mit einem subtraktiven Verfahren (Pulverentfernung mit dem Unterdruckmodul) ist ein zukunftssträchtiger Ansatz, der eine Vielzahl an Möglichkeiten bietet und den Einsatzbereich dieser Technologie erweitern wird.



## 9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-44642-595-8.

AGUILERA ET AL. 2013

Aguilera, E.; Ramos, J.; Espalin, D.; Cedillos, F.; Muse, D.; Wicker, R.; MacDonald, E.: 3D Printing of Electro Mechanical Systems. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 24th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 12.-14. August 2013.

ALLEN ET AL. 1986

Allen, G. L.; Bayles, R. A.; Gile, W. W.; Jesser, W. A.: Small particle melting of pure metals. Thin Solid Films 144 (1986) 2, S. 297-308.

ALLEN ET AL. 2008

Allen, M. L.; Aronniemi, M.; Mattila, T.; Alastalo, A.; Ojanpera, K.; Suhonen, M.; Seppa, H.: Electrical sintering of nanoparticle structures. Nanotechnology 19 (2008) 17, S. 175-201.

AMEND ET AL. 2013

Amend, P.; Niese, B.; Schmidt, M.: Erzeugung funktionaler Schaltungsträger aus Hochtemperaturharz durch Kombination von Additiver Fertigung und ADDI-MID-Technologie. In: Schmidt, M.; Roth, S. et al. (Hrsg.): LEF 2013, 16. LEF Seminar „Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik“. Fürth, 05.-06. März. Bamberg: Meisenbach 2013, S. 253-264. ISBN: 978-3-87525-343-6.

AMEND ET AL. 2010

Amend, P.; Pscherer, C.; Rechtenwald, T.; Frick, T.; Schmidt, M.: A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology. Physics Procedia (2010) 5, S. 561-572.

ANSORGE ET AL. 2010

Ansorge, F.; Ifland, D.; Baar, C.; Heumann, K.; Stigler, T.; Lang, K.-D.: Produktion im Mikro- und Nanobereich auf Basis von generativen Herstelltechnologien. productronic 30 (2010) 11, S. 52-55.

ANSYS INC. 2011A

ANSYS Inc.: ANSYS-14.0 Help: ANSYS CFX-Solver Modeling Guide.

ANSYS INC. 2011B

ANSYS Inc.: ANSYS-14.0 Help: ANSYS CFX-Solver Theory Guide.

ANSYS INC. 2013

ANSYS Inc.: ANSYS-15.0 Help: ANSYS ICEM CFD User's Manual.

ARDILIO & LAIB 2008

Ardilio, A.; Laib, S.: Technologieanalyse. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Fokus Technologie. München: Hanser 2008, S. 175-216. ISBN: 978-3-446-41793-9.

ATHREYA ET AL. 2009

Athreya, S.; Kalaitzidou, K.; Das, S.: Processing and Properties of Carbon Black-Filled Electrically Conductive Nylon-12 Nanocomposites produced by Selective Laser Sintering. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 20th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, August 2009.

BAEHR & KABELAC 2012

Baehr, H. D.; Kabelac, S.: Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. 15. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-24161-1.

BAI & WILLIAMS 2014

Bai, Y.; Williams, C. B.: An exploration of binder jetting of copper. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 25th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, August 2014.

BAK 2003

Bak, D.: Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter. *Assembly Automation* 23 (2003) 4, S. 340-345.

BAUMERS ET AL. 2014

Baumers, M.; Tuck, C.; Dickens, P.; Hague, R.: How can material jetting systems be upgraded for more efficient multi-material additive manufacturing. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 25th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, August 2014.

BECKER ET AL. 2009

Becker, H.; Dubbert, W.; Schwirn, K.; Völker, D.: Nanotechnik für Mensch und Umwelt. <<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nanotechnik-fuer-mensch-umwelt>> - 22.11.2016.

BENBOW ET AL. 1987

Benbow, J. J.; Oxley, E. W.; Bridgwater, J.: The extrusion mechanics of pastes - the influence of paste formulation on extrusion parameters. *Chemical Engineering Science* 42 (1987) 9, S. 2151-2162.

BERGMANN 2008

Bergmann, W.: Werkstofftechnik. 6. Aufl. München: Carl Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-41338-2.

BERNARD ET AL. 2003

Bernard, A.; Delplace, J.-C.; Perry, N.; Gabriel, S.: Integration of CAD and rapid manufacturing for sand casting optimisation. *Rapid Prototyping Journal* 9 (2003) 5, S. 327-333.

BLICHFELDT 1929

Blichfeldt, H. F.: The minimum value of quadratic forms, and the closest packing of spheres. *Mathematische Annalen* 101 (1929) 1, S. 605-607.

BOGUE 2014

Bogue, R.: What future for humans in assembly? *Assembly Automation* 34 (2014) 4, S. 305-309.

BOHL & ELMENDORF 2014

Bohl, W.; Elmendorf, W.: Technische Strömungslehre. Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik. 15. Aufl. Würzburg: Vogel Business Media 2014. ISBN: 978-3-8343-3329-2.

BONADIMAN & SALAZAR 2010

Bonadiman, R.; Salazar, M. M.: Reliability of Ag ink jet printed traces on polyimide substrate. In: Fraunhofer IZM (Hrsg.): *Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*. Berlin, 13.-16. September 2010, S. 1-5.

BRABAZON ET AL. 2010

Brabazon, D.; Kennedy, D.; Tyrell, M.: Development of Technique for 3D Printed Mould Intricate Rapid Casting. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): *21th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin (TX); USA, 09.-11. August 2010.

BRACKBILL ET AL. 1992

Brackbill, J. U.; Kothe, D.; Zemach, C.: A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics* 100 (1992) 2, S. 335-354.

BRAND 1997

Brand, A.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID). Bamberg: Meisenbach 1997. ISBN: 978-3-8752-5087-9. (Fertigungstechnik - Erlangen 61).

BREUNINGER 2013

Breuninger, J.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für selektives Lasersintern*. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-24324-0.

BUDDING & VANEKER, T. H. J. 2013

Budding, A.; Vaneker, T. H. J.: New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques. Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM) 6 (2013), S. 527-532.

CALVERT ET AL. 1999

Calvert, P. D.; Denham, H. B.; Anderson, T. A.: Free-form fabrication of composites with embedded sensors. (Hrsg.): SPIE's Annual 6th International Symposium on Smart Structures and Materials. Newport Beach, California, 01.-05. März 1999, S. 128-133.

CASTILLO ET AL. 2009

Castillo, S.; Muse, D.; Medina, F. R.; MacDonald, E.; Wicker, R.: Electronics Integration in Conformal Substrates Fabricated with Additive Layered Manufacturing. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 20th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, August 2009, S. 730-737.

CHEN ET AL. 2003

Chen, B.; Cui, T.; Liu, Y.; Varahramyan, K.: All-polymer RC filter circuits fabricated with inkjet printing technology. Solid State Electronics 47 (2003) 5, S. 841-847.

CHEN & DOOLEN 1998

Chen, S.; Doolen, G. D.: Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows. Annual Review of Fluid Mechanics 30 (1998) 1, S. 329-364.

CHIMENTO ET AL. 2011

Chimento, J.; Highsmith, M. J.; Crane, N.: 3D printed tooling for thermoforming of medical devices. Rapid Prototyping Journal 17 (2011) 5, S. 387-392.

CHRISEY & PIQUÉ 2002

Chrisey, D. B.; Piqué, A.: Direct-write technologies for rapid prototyping applications. Sensors, electronics and integrated power sources. San Diego, Kalifornien: Academic Press 2002. ISBN: 978-0-12-174231-7.

CURRLE ET AL. 2006

Currle, U.; Cibis, D.; Steinborn, G.; Krueger, K.: Der Inkjet-Druck - ein neues Verfahren zum Aufbringen elektrisch leitender Strukturen in der Mikroelektronik. (Hrsg.): Deutscher IMAPS-Kongress. München, 09.-10. Juni 2006.

DENAVE ET AL. 2008

DeNave, E.; Navarrete, M.; Lopes, A.; Alawneh, M.; Contreras, M.; Muse, D.; Castillo, S.; MacDonald, E.; Wicker, R.: Three-Dimensional Off-Axis Component Placement and Routing for Electronics Integration using Solid Freeform Fabrication. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 19th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 03.-05. August 2008, S. 362-369.

DIEGEL ET AL. 2011

Diegel, O.; Singamneni, S.; Huang, B.; Gibson, I.: Getting Rid of the Wires: Curved Layer Fused Deposition Modeling in Conductive Polymer Additive Manufacturing. Key Engineering Materials 467-469 (2011) 1, S. 662-667.

DIN 28400 1990

DIN 28400: Vakuumtechnik; Benennungen und Definitionen. Berlin: Beuth 1990.

DIN 8580 2003

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN ISO 527-1 2012

DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berlin: Beuth 2012.

DIN EN ISO 527-2 2012

DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Berlin: Beuth 2012.

DOMININGHAUS ET AL. 2005

Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 6. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3-540-21410-6.

DOMININGHAUS ET AL. 2012

Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.: Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. 8. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 9-783-6421-6172-8.

DREHER 2005

Dreher, S.: Flexible Integration von Rapid-Prototyping-Prozessketten in die Produktentstehung. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2005. ISBN: 978-3-8167-6843-2. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

DRUDE 1900

Drude, P.: Zur Elektronentheorie der Metalle. Annalen der Physik 306 (1900) 3, S. 566-613.

EDERER 2007

Ederer, I.: Kleinserien-Produktion mittels 3D-Druck. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 4 (2007) o. Nr.

EDERER 2008

Ederer, I.: Oberflächenverbesserung im 3D-Druck mittels höherer Auflösung. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 5 (2008) o. Nr.

EHRENSPIEL 2009

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Aufl. München, Wien: Hanser 2009.

ISBN: 978-3-446-42013-7.

ELSNER 2009

Elsner, P.: 3D-Drucktechnologie – Grundlagen zur Herstellung polymerer Bauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften. Diss. Technische Universität Berlin. Berlin (2009).

EPOXY TECHNOLOGY INC. 2015

Epoxy Technology Inc.: Technisches Datenblatt Leitkleber EpoTec 4110.

<[http://www.epotek.com/site/administrator/components/com\\_products/assets/files/Style\\_Uploads/E4110.pdf](http://www.epotek.com/site/administrator/components/com_products/assets/files/Style_Uploads/E4110.pdf)> - 22.11.2016.

ESPALIN ET AL. 2014

Espalin, D.; Muse, D. W.; MacDonald, E.; Wicker, R.: 3D Printing multifunctionality: structures with electronics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 72 (2014) 5-8, S. 963-978.

FESTO 2008

Festo: Datenblatt Mini-Schlitten SLTE und elektrischer Motorcontroller SFC-DC. <[https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/26917/info\\_152\\_de.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/26917/info_152_de.pdf)> - 22.11.2016.

FESTO 2014

Festo: Datenblatt Vakuumsaugdüsen VAD/VAK.

<[https://www.festo.com/cat/en-gb\\_gb/data/doc\\_DE/PDF/DE/VAD-VAK\\_DE.PDF](https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_DE/PDF/DE/VAD-VAK_DE.PDF)> - 25.11.2016.

FOLGAR ET AL. 2013

Folgar, C. E.; Folgar, L. N.; Cormier, D.: Multifunctional material direct printing for laser sintering systems. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 24th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 12.-14. August 2013.

FRANKE 1998

Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Diss. Universität Erlangen-Nürnberg. Nürnberg (1998).

FRANKE 2013

Franke, J.: Technologie 3D-MID. Räumliche elektronische Baugruppen; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-4464-3441-7.

FUJIFILM DIMATIX INC. 2010

Fujifilm Dimatix Inc.: Datenblatt Druckkopf Spectra SL-128 AA. USA: 2010.

GAUSEMEIER ET AL. 2012

Gausemeier, J.; Echterhoff, N.; Wall, M.: Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing - Scenario-based Matching of Technology Push and Market Pull. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 9 (2012) 9.

GEBHARDT 2013

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. Additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 4. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-446-43651-0.

GENG ET AL. 2003

Geng, L.; Wong, Y. S.; Hutmacher, D. W.; Feng, W.; Loh, H. T.; Fuh, J. Y. H.: Rapid prototyping of 3D scaffolds for tissue engineering using a four-axis multiple-dispenser robotic system. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 14th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 04.-06. August 2003.

GIBSON ET AL. 2010

Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer 2010. ISBN: 978-1-4419-1119-3.

GLASSCHROEDER ET AL. 2015

Glasschroeder, J.; Prager, E.; Zaeh, M. F.: Powder-bed-based 3D-printing of function integrated parts. Rapid Prototyping Journal 21 (2015) 2, S. 207-215.

GLASSCHROEDER ET AL. 2014

Glasschroeder, J.; Twellmeyer, A.; Schilp, J.; Zaeh, M. F.: Methods for Integrating Part Functions During Powderbed-Based 3D-Printing. In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference. Berlin, Aachen: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 978-3-8396-9128-1.

### GLOBISCH 2011

Globisch, S.: Lehrbuch Mikrotechnologie für Ausbildung, Studium und Weiterbildung. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser 2011.

ISBN: 978-3-446-42560-6.

### GREER & STREET 2007

Greer, J. R.; Street, R. A.: Thermal cure effects on electrical performance of nanoparticle silver inks. *Acta Materialia* 55 (2007) 18, S. 6345-6349.

### GROSS ET AL. 2012

Gross, D.; Hauer, W.; Schröder, J.; Wall, W. A.: Technische Mechanik 3. Kinetik. 12. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-6422-9529-4.

### GROTE & FELDHUSEN 2011

Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 23. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-6421-7305-9.

### GROUCHKO ET AL. 2009

Grouchko, M.; Kamyshny, A.; Magdassi, S.: Formation of air-stable copper-silver core-shell nanoparticles for inkjet printing. *Journal of Materials Chemistry* 19 (2009) 19, S. 3057-3062.

### GÜNTHER ET AL. 2014

Günther, D.; Heymel, B.; Günther, J.; Ederer, I.: Continuous 3D-printing for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal* 20 (2014) 4, S. 320-327.

### GUTIERREZ ET AL. 2011

Gutierrez, C.; Salas, R.; Hernandez, G.; Muse, D.; Olivas, R.; MacDonald, E.; Irwin, M. D.: CubeSat Fabrication through Additive Manufacturing and Micro-Dispensing. In: *International Microelectronics Assembly and Packaging Society (Hrsg.): 44th International Symposium on Microelectronics*. Long Beach, California, USA, 09-13. Oktober 2011, S. 1021-1027. ISBN: 978-1-6183-9850-5.

### HABENICHT 2009

Habenicht, G.: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-85264-3.

### HAGUE ET AL. 2004

Hague, R.; Mansour, S.; Saleh, N.: Material and design considerations for rapid manufacturing. *International Journal of Production Research* 42 (2004) 22, S. 4691-4708.

### HAYES ET AL. 1995

Hayes, R. E.; Afacan, A.; Boulanger, B.: An equation of motion for an incompressible Newtonian fluid in a packed bed. *Transport in Porous Media* 18 (1995) 2, S. 185-198.



### HERING 2012

Hering, E.: Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-6421-2881-3.

### HESSE 2011

Hesse, S.: Greifertechnik. Effektoren für Roboter und Automaten. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-4464-2422-7.

### HOERBER ET AL. 2014

Hoerber, J.; Glasschroeder, J.; Pfeffer, M.; Schilp, J.; Zaeh, M. F.; Franke, J.: Approaches for Additive Manufacturing of 3D Electronic Applications. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems 17 (2014) 5, S. 806-811.

### HOU & TYRER 2013

Hou, S.; Tyrer, J.: 3D Printing of structures with embedded circuit boards using novel holographic optics. In: IEEE (Hrsg.): 63rd Electronic Components and Technology Conference 2013, S. 455-460. ISBN: 978-1-4799-0232-3.

### IVERS-TIFFÉE & MÜNCH 2007

Ivers-Tiffée, E.; Münch, W. von: Werkstoffe der Elektrotechnik. Mit 40 Tabellen. 10. Aufl. Wiesbaden: Teubner 2007. ISBN: 978-3-8351-0052-7. (Lehrbuch: Elektrotechnik).

### JILLEK & KELLER 2003

Jillek, W.; Keller, G.: Handbuch der Leiterplattentechnik. 1. Aufl. Bad Saulgau, Baden-Württemberg: Leuze 2003. ISBN: 978-3-8748-0184-3.

### JONES ET AL. 2011

Jones, J. B.; Wimpenny, D. I.; Chudasama, R.; Gibbons, G. J.: Printed Circuit Boards by Selective Deposition and Processing. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 22th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 08.-10. August 2011.

### KAISER 2011

Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung. 3. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-43049-5.

### KALOGERAKIS 2010

Kalogerakis, K.: Innovative Analogien in der Praxis der Produktentwicklung. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg-Harburg (2010).

KAWAHARA ET AL. 2013

Kawahara, Y.; Hodges, S.; Cook, B. S.; Zhang, C.; Abowd, G. D.: Instant inkjet circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. (Hrsg.): Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing - UbiComp '13: ACM Press 2013, S. 363. ISBN: 978-1-4503-1770-2.

KELLNER 2013

Kellner, I.: Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken. Diss. Technische Universität München. München (2013).

KIM & MOON 2005

Kim, D.; Moon, J.: Highly Conductive Ink Jet Printed Films of Nanosilver Particles for Printable Electronics. *Electrochemical and Solid-State Letters* 8 (2005) 11, S. J30–J33.

KIM ET AL. 2009

Kim, H.-S.; Dhage, S. R.; Hahn, H. T.; Shim, D.-E.: Intense pulsed light sintering of copper nanoink for printed electronics. *Applied Physics A* 97 (2009) 4, S. 791-798.

KOBLISKA ET AL. 2005

Kobliska, J.; Ostojic, P.; Cheng, X.; Zhang, X.; Choi, H.; Yang, Y.; Li, X.: Rapid fabrication of smart tooling with embedded sensors by casting in molds made by three dimensional printing. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 16th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 01.-03. August 2005.

KOERNER ET AL. 2006

Koerner, C.; Pohl, T.; Ruede, U.; Thuerey, N.; Zeiser, T.: Parallel Lattice Boltzmann Methods for CFD Applications. In: Bruaset, A.; Tveito, A. (Hrsg.): Numerical Solution of Partial Differential Equations on Parallel Computers: Springer Berlin Heidelberg 2006, S. 439-466. ISBN: 978-3-540-29076-6.

KRAUME 2012

Kraume, M.: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Grundlagen und apparative Umsetzungen. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-642-25148-1.

KUMAR ET AL. 2001

Kumar, V.; Rajagopalan, S.; Cutkosky, M.; Dutta, D.: Representation and Processing of Heterogeneous Objects for Solid Freeform Fabrication. In: Kimura, F. (Hrsg.): Geometric modelling. Boston, MA: Springer US 2001. ISBN: 978-1-4757-5322-6.

LEE ET AL. 2005

Lee, H.-H.; Chou, K.-S.; Huang, K.-C.: Inkjet printing of nanosized silver colloids. *Nanotechnology* 16 (2005) 10, S. 2436-2441.

LEIGH ET AL. 2012

Leigh, S. J.; Bradley, R. J.; Pursell, C. P.; Billson, D. R.; Hutchins, D. A.; Hong, J.: A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PloS one* 7 (2012) 11, S. e49365.

LEWIS & GRATSON 2004

Lewis, J. A.; Gratson, G. M.: Direct writing in three dimensions. *Materials Today* 7 (2004) 7–8, S. 32-39.

LI ET AL. 2010

Li, Y.; Lu, D.; Wong, C. P.: *Electrical conductive adhesives with nanotechnologies*. 1. Aufl. New York: Springer US 2010. ISBN: 978-1-4899-8307-7.

LIU ET AL. 2014

Liu, B.; Truck, C.; Saleh, E., Ashcroft, I.; Wildman, R.; Hague, R.: Investigation in the performance of multi-layer printed conductive tracks on multi-layer printed insulator. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): *25th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin (TX); USA, August 2014.

LOPES ET AL. 2012

Lopes, A.; MacDonald, E.; Wicker, R.: Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication. *Rapid Prototyping Journal* 18 (2012) 2, S. 129-143.

LOPES ET AL. 2006

Lopes, A.; Navarrete, M.; Medina, F. R.; Palmer, J. A.; MacDonald, E.; Wicker, R.: Expanding Rapid Prototyping for Electronix Systems Integration of Arbitrary Form. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): *17th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin (TX); USA, 14.-16. August 2006, S. 644-655.

LOPES ET AL. 2014

Lopes, A. J.; Lee, I. H.; MacDonald, E.; Quintana, R.; Wicker, R.: Laser curing of silver-based conductive inks for in situ 3D structural electronics fabrication in stereolithography. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 9, S. 1935-1945.

LU ET AL. 1999

Lu, D.; Tong, Q. K.; Wong, C. P.: A study of lubricants on silver flakes for microelectronics conductive adhesives. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 22 (1999) 3, S. 365-371.

LUCHS 1998

Luchs, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT. Diss. Friedrich-Alexander-Universität. Erlangen-Nürnberg (1998).

MACCURDY & LIPSON 2014

MacCurdy, R.; Lipson, H.: Hybrid printing of photopolymers and electromechanical assemblies. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 25th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, August 2014.

MACDONALD ET AL. 2014

MacDonald, E.; Salas, R.; Espalin, D.; Perez, M.; Aguilera, E.; Muse, D.; Wicker, R.: 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics. IEEE Access 2 (2014) 1, S. 234-242.

MATHEWS ET AL. 2007

Mathews, S. A.; Auyeung, R. C.; Piqué, A.: Use of Laser Direct-Write in Microelectronics Assembly. Journal of Laser Micro/Nanoengineering 2 (2007) 1, S. 103-107.

MEDINA ET AL. 2005

Medina, F. R.; Lopes, A.; Inamdar, A.; Hennessey, R.; Palmer, J. A.; Chavez, B. D.; Davis, D.; Yang, P.; Gallegos, P.; Wicker, R.: Hybrid Manufacturing: Integrating Direct Write and Stereolithography. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 16th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 01.-03. August 2005, S. 39-49.

MEHLER-BICHER & STEIGER 2012

Mehler-Bicher, A.; Steiger, L.: Trends in der IT. Fachhochschule Mainz 2012. ISBN: 978-3-0003-9317-4.

MEI 2005

Mei, J.: Formulation and processing of conductive inks for inkjet printing of electrical components. Diss. Universität von Pittsburgh (2005). <<http://d-scholarship.pitt.edu/9948/>> - 22.11.2016.

MEZGER 2010

Mezger, T.: Das Rheologie-Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. 3. Aufl. Hannover: Vincentz Network 2010. ISBN: 978-3-8663-0825-1. (Farbe- und Lack-Edition).

MIRELES ET AL. 2012

Mireles, J.; Espalin, D.; Roberson, D.; Zinniel, B.; Medina, F. R.; Wicker, R.: Fused Deposition Modeling of Metals. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 23th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 06.-08. August 2012.

MOELLER ET AL. 1996

Moeller, F.; Frohne, H.; Löcherer, K. H.; Müller, H.: Grundlagen der Elektrotechnik. 18. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 1996.

ISBN: 978-3-3229-3890-9.

MOELLER ET AL. 2008

Moeller, F.; Frohne, H.; Löcherer, K. H.; Müller, H.; Harriehausen, T.; Schwarzenau, D.: Grundlagen der Elektrotechnik. Mit 36 Tabellen und 182 Beispielen. 21. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008. ISBN: 978-3-8351-0109-8.

MORAN 2016

Moran, A.: Managing agile. Strategy, implementation, organisation and people. Cham (CH): Springer International Publishing 2016. ISBN: 978-3-319-16261-4.

MOSES ET AL. 2009

Moses, M.; Yamaguchi, H.; Chirikjian, G. S.: Towards cyclic fabrication systems for modular robotics and rapid manufacturing. In: Trinkle, J.; Matsuoka, Y. et al. (Hrsg.): Robotics: Science and Systems V. Seattle, USA: MIT Press 2009.

ISBN: 978-0-262-51463-7.

MUEHL 2014

Muehl, T.: Einführung in die elektrische Messtechnik. Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.

ISBN: 978-3-8348-2063-1.

MUSTONEN 2009

Mustonen, T.: Inkjet Printing of Carbon Nanotubes for Electronic Applications. Diss. Universität von Oulu, Finnland (2009).

NANOTEC 2014

Nanotec: Technisches Datenblatt Linearaktuator L20. <<http://de.nanotec.com/produkte/657-120-linearaktuator-mit-trapezspindel/>> - 22.11.2016.

NAVARRETE ET AL. 2007

Navarrete, M.; Lopes, A.; Estrada, R.; Acuna, J.; MacDonald, E.; Palmer, J. A.; Wicker, R.: Integrated Layered Manufacturing of a Novel Wireless Motion Sensor with GPS. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 18th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 06.-08. August 2007, S. 575-585.

NEDELCO 2011

Nedelcu, R. U.: Optimization of Additive Manufacturing Processes Focused on 3D Printing. In: Hoque, M. E. (Hrsg.): Rapid Prototyping Technology - Principles and Functional Requirements: InTech 2011, S. 1-28.

ISBN: 978-953-307-970-7.

NIESE ET AL. 2014

Niese, B.; Stichel, T.; Amend, P.; Urmoneit, U.; Roth, S.; Schmidt, M.: Manufacturing of Conductive Circuits for Embedding Stereolithography by Means of Conductive Adhesive and Laser Sintering. *Physics Procedia* 56 (2014) 6, S. 336-344.

OERTEL & BOEHLE 2002

Oertel, H.; Boehle, M.: *Strömungsmechanik. Grundlagen, Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2002. ISBN: 3-528-13893-9. (Studium Technik).

OHM 1827

Ohm, G. S.: Die galvanische Kette. <[http://www.deutschestextarchiv.de/ohm\\_galvanische\\_1827](http://www.deutschestextarchiv.de/ohm_galvanische_1827)> - 22.11.2016.

OSE 2008

Ose, R.: *Elektrotechnik für Ingenieure. Grundlagen*. 4. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 978-3-4464-3244-4.

OTHMAN 2005

Othman, N.: Entwicklung eines Verfahrens zum präzisen Punkt- und Linienauftrag von hochviskosem Leitkleber mit einem geregelten Mikrodosiersystem. Diss Universität Stuttgart. Heimsheim (2005). <<http://publica.fhg.de/eprints/N-34491.pdf>> - 22.11.2016.

PALMER ET AL. 2008

Schutzrecht US7419630 B2 (2008-09-02). Sandia Corporation Pr.: US 10/907,979 2005-04-22: Methods and Systems for Rapid Prototyping of High Density Circuits.

PALMER ET AL. 2005

Palmer, J. A.; Davis, D.; Gallegos, P.; Yang, P.; Chavez, B. D.; Medina, F. R.; Wicker, R.: Stereolithography: A Basis for Integrated Meso Manufacturing. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 16th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 01.-03. August 2005, S. 476-483.

PALZER ET AL. 2001

Palzer, S.; Hiebl, C.; Sommer, K.; Lechner, H.: Einfluss der Rauigkeit einer Feststoffoberfläche auf den Kontaktwinkel. *Chemie Ingenieur Technik* 73 (2001) 8, S. 1032-1038.

PARK ET AL. 2007

Park, B. K.; Kim, D.; Jeong, S.; Moon, J.; Kim, J. S.: Direct writing of copper conductive patterns by ink-jet printing. *Thin Solid Films* 515 (2007) 19, S. 7706-7711.

PATIRUPANUSARA ET AL. 2007

Patirupanusara, P.; Suwanpreuk, W.; Rubkumintara, T.; Suwanprateeb, J.: Properties improvement of three-dimensionally printed polymethyl methacrylate by bis-GMA-based resin infiltration. *Polymer Testing* 26 (2007) 4, S. 519-525.

PATIRUPANUSARA ET AL. 2008

Patirupanusara, P.; Suwanpreuk, W.; Rubkumintara, T.; Suwanprateeb, J.: Effect of binder content on the material properties of polymethyl methacrylate fabricated by three dimensional printing technique. *Journal of Materials Processing Technology* 207 (2008) 1-3, S. 40-45.

PERELAER ET AL. 2006

Perelaer, J.; de Gans, B.-J.; Schubert, U. S.: Ink-jet Printing and Microwave Sintering of Conductive Silver Tracks. *Advanced Materials* 18 (2006) 16, S. 2101-2104.

PERELAER ET AL. 2010

Perelaer, J.; Smith, P. J.; Mager, D.; Soltman, D.; Volkman, S. K.; Subramanian, V.; Korvink, J. G.; Schubert, U. S.: Printed electronics: the challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials. *Journal of Materials Chemistry* 20 (2010) 39, S. 8446-8453.

PEREZ & WILLIAMS 2013

Perez, K. B.; Williams, C. B.: Combining Additive Manufacturing and Direct Write for Integrated Electronicx - A Review. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 24th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 12.-14. August 2013.

PEREZ & WILLIAMS 2014

Perez, K. B.; Williams, C. B.: Characterization of In-Situ Conductivve Paste Extrusion on Polyjet Substrates. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 25th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, August 2014.

PERIARD ET AL. 2007

Periard, D.; Malone, E.; Lipson, H.: Printing Embedded Circuits. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 18th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 06.-08. August 2007.

PFEIFER 2006

Pfeifer, R.: Entwicklung von Rapid Prototyping Verfahren zur Herstellung verlorener Modelle für den Feinguss. Diss. Universität Stuttgart. Stuttgart (2006).

<[http://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/1728/1/Dissertation\\_Pfeifer\\_2006.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/1728/1/Dissertation_Pfeifer_2006.pdf)> - 22.11.2016.

PHAM & GAULT 1998

Pham, D.; Gault, R.: A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38 (1998) 10–11, S. 1257-1287.

PIQUÉ 2011

Piqué, A.: Rapid Prototyping of Embedded Microelectronics by Laser Direct-Write. In: Hoque, M. E. (Hrsg.): *Rapid Prototyping Technology - Principles and Functional Requirements: InTech 2011*, S. 247-272. ISBN: 978-953-307-970-7.

PIQUÉ ET AL. 1999

Piqué, A.; Chrisey, D.; Auyeung, R. C.; Fitz-Gerald, J.; Wu, H. D.; McGill, R. A.; Lakeou, S.; Wu, P.; Nguyen, V.; Duignan, M.: A novel laser transfer process for direct writing of electronic and sensor materials. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 69 (1999) 7, S. S279-S284.

PIQUÉ ET AL. 2000

Piqué, A.; Chrisey, D. B.; Fitz-Gerald, J. M.; McGill, R. A.; Auyeung, R. C.; Wu, H. D.; Lakeou, S.; Nguyen, V.; Chung, R.; Duignan, M.: Direct writing of electronic and sensor materials using a laser transfer technique. *Journal of Materials Research* 15 (2000) 9, S. 1872-1875.

POLSAKIEWICZ & KOLLENBERG 2014

Polsakiewicz, D.; Kollenberg, W.: LTCC-Based Packaging by 3D-Multi-Material-Printing (3Dmm). In: Demmer, A. (Hrsg.): *Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference*. Berlin. Aachen: Fraunhofer-IRB 2014, S. 1-5. ISBN: 978-3-8396-9128-1.

POLZIN ET AL. 2013

Polzin, C.; Spath, S.; Seitz, H.: Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process. *Rapid Prototyping Journal* 19 (2013) 1, S. 37-43.

PONN & LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-6422-0580-4. (VDI-Buch).

PREGLA 2009

Pregla, R.: *Grundlagen der Elektrotechnik*. 8. Aufl. Heidelberg: Hüthig 2009. ISBN: 978-3-7785-4059-6.

PRESSER 2012

Presser, J.: *Neue Komponenten für das generative Fertigungsverfahren des 3D-Drucks*. Diss. Technische Universität Darmstadt (2012). <<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2963/>> - 22.11.2016.



RAI ET AL. 2004

Rai, R.; Campbell, M.; Wood, K. L.: Extracting Product Performance by Embedding Sensors in SFF Prototypes. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 15th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 02.-04. August 2004.

REFLE ET AL. 2017

Refle, O.; Günthel, J.; Burgard, M.; Janhsen, J.; Springer, P.; Seifarth, C.; Echsel, M.: Additive Fertigung mikromechatronischer Systeme. wt Werkstatttechnik online 107 (2017) 6, S. 426-431.

REINHART 2013

Reinhart, G.: Skriptum zur Vorlesung - Methoden der Unternehmensführung. TU München: 2013.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Teufelhart, S.; Reiß, F.: Examination of the Geometry-dependent Anisotropic Material Behavior in Additive Layer Manufacturing for the Calculation of Mesoscopic Lightweight Structures. (Hrsg.): Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference. Berlin, Germany, 14.-15. März 2012.

REISCH 2007

Reisch, M.: Elektronische Bauelemente. Funktion, Grundschaltungen, Modellierung mit SPICE. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 978-3-5403-4014-0.

ROOS & MAILE 2011

Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. 4. Aufl. Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-6421-7463-6. (Springer-Lehrbuch).

ROTH ET AL. 2004

Roth, S.; Dietel, C.; Eßer, G.: ADDIMID - Eine neue Variante zur Laserstrahlaktivierung von 3D-MIDs. PLUS-Produktion von Leiterplatten und Systemen 12 (2004) 6, S. 2106-2110.

ROTTA 1956

Rotta, J.: Experimenteller Beitrag zur Entstehung turbulenter Strömung im Rohr. Ingenieur-Archiv 24 (1956) 4, S. 258-281.

RUFFO ET AL. 2006

Ruffo, M.; Tuck, C.; Hague, R.: Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 220 (2006) 9, S. 1417-1427.

RYE ET AL. 1996

Rye, R. R.; Mann, J. A.; Yost, F. G.: The Flow of Liquids in Surface Grooves. *Langmuir* 12 (1996) 2, S. 555-565.

SARGENT 2013

Sargent, R. G.: Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation* 7 (2013) 1, S. 12-24.

SCHEEL 1997

Scheel, W.: *Baugruppenttechnologie der Elektronik*. 1. Aufl. Berlin: Verl. Technik 1997. ISBN: 3874801349.

SCHMUTZLER ET AL. 2016

Schmutzler, C.; Zimmermann, A.; Zaeh, M. F.: Compensating Warpage of 3D Printed Parts Using Free-form Deformation. *Procedia CIRP* 41 (2016) 3, S. 1017-1022.

SCHNEID 2000

Schneid, E.: *Hybrid-Gemischte Finite-Elemente-Diskretisierung der Richards-Gleichung*. Diss. Friedrich-Alexander-Universität. Erlangen-Nürnberg (2000).

SCHULZE 2009

Schulze, D.: *Pulver und Schüttgüter. Fließeigenschaften und Handhabung*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-5408-8449-1. (VDI-Buch).

SELLS & BOWYER 2006

Sells, E.; Bowyer, A.: Directly incorporating electronics into conventional rapid prototypes. In: Bocking, C. E.; Rennie, A. E. W. et al. (Hrsg.): *7th National Conference on Rapid Design, Prototyping & Manufacturing*. High Wycombe, Vereinigtes Königreich, 16. Juni 2006: MJA Print. ISBN: 0-948314-494.

SENGÜL ET AL. 2010

Sengül, A.; Stephan, M.; Rognini, G.; Beira, R.; Santos-Carreras, L.; Bleuler: Ein Greifer für Minimal-invasive Robotisierte Chirurgie mit integriertem Kraftsensor. In: Riener, R. (Hrsg.): *Automatisierungstechnische Verfahren für die Medizin*. Düsseldorf: VDI-Verl. 2010, S. 51-52. ISBN: 978-3-1832-7917-3.

SIGLOCH 2014

Sigloch, H.: *Technische Fluidmechanik*. 9. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014. ISBN: 978-3-6425-4292-3.

STIESS 2009

Stiess, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik*. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-5403-2551-2. (Springer-Lehrbuch).

STILTNER ET AL. 2011

Stiltner, L. J.; Elliott, A. M.; Williams, C. B.: A Method for Creating Actuated Joints via Fiber Embedding in a Polyjet 3D Printing Process. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 22th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 08.-10. August 2011.

STINY 2007

Stiny, L.: Handbuch passiver elektronischer Bauelemente. Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung. 1. Aufl. Poing, Germany: Franzis 2007. ISBN: 978-3-7723-5430-4.

TEUFELHART & REINHART 2012

Teufelhart, S.; Reinhart, G.: Optimization of strut diameters in lattice structures. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H. et al. (Hrsg.): 23th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 06.-08. August 2012, S. 719-733.

TING ET AL. 2001

Ting, F. P.; Gibson, I.; Cheung, W. L.: Study on selective laser sintering components with electrically conductive channels. In: Bourell, D. L.; Beaman, J. J. et al. (Hrsg.): 12th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX); USA, 06.-08. August 2001.

VAN OSCH ET AL. 2008

van Osch, T. H.; Perelaer, J.; de Laat, A. W.; Schubert, U. S.: Inkjet Printing of Narrow Conductive Tracks on Untreated Polymeric Substrates. *Advanced Materials* 20 (2008) 2, S. 343-345.

VDI 3405 2014

VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth 2014.

VDI 2860 2004

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: 2004.

VERSTEEG & MALALASEKERA 2007

Versteeg, H. K.; Malalasekera, W.: An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method. 2. Aufl. Harlow, England, New York: Pearson Education Ltd. 2007. ISBN: 978-0-1312-7498-3.

VINARICKY 2012

Vinaricky, E.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, technologien, prfverfahren. 2. Aufl: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-6426-2698-2.

VOGELER ET AL. 2013

Vogeler, F.; Verheecke, W.; Voet, A.; Valkenaers, H.: An Initial Study of Aerosol Jet® Printed Interconnections on Extrusion-Based 3D-Printed Substrates. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 59 (2013) 11, S. 689-696.

VOXELJET AG 2008A

voxeljet AG: Sicherheitsdatenblatt gem. EG-Richtlinie 91/155/EWG Nr. 2007-4. Augsburg: 2008A.

VOXELJET AG 2008B

voxeljet AG: Sicherheitsdatenblatt gem. EG-Richtlinie 91/155/EWG Nr. 2007-5. Augsburg: 2008B.

VOXELJET AG 2015

voxeljet AG: Bröschüre VX4000 - Das großformatige 3D-Drucksystem.  
<[http://www.voxeljet.de/fileadmin/Voxeljet/Systems/VX\\_4000/voxeljet\\_3D-Drucker\\_VX4000\\_2015.pdf](http://www.voxeljet.de/fileadmin/Voxeljet/Systems/VX_4000/voxeljet_3D-Drucker_VX4000_2015.pdf)> - 22.11.2016.

WANG ET AL. 2010

Wang, J.; Auyeung, R. C.; Kim, H.; Charipar, N. A.; Piqué, A.: Three-Dimensional Printing of Interconnects by Laser Direct-Write of Silver Nanopastes. *Advanced Materials* 22 (2010) 40, S. 4462-4466.

WEIDAUER 2013

Weidauer, J.: Elektrische Antriebstechnik. 3 Aufl: Publicis Pub 2013. ISBN: 978-3-895-78905-2.

WERNER 2014

Werner, C.: Untersuchungen zur Sinterung Aerosol Jet und Ink Jet gedruckter Ag- und CuNiMn-Mikrostrukturen. Dissertation Universität Bremen. Bremen (2014).

WICKER ET AL. 2013

Schutzrecht US20130170171 (A1) (04.07.2013) 20130170171: Extrusion-Based Additive Manufacturing System For 3D Structural Electronic, Electromagnetic and Electromechanical Components/Devices.

WOLF & STEINMANN 2004

Wolf, A.; Steinmann, R.: Greifer in Bewegung. Faszination der Automatisierung von Handhabungsaufgaben. München: Hanser 2004. ISBN: 978-3-4462-2932-7.

WORMUTH & ZAPF 2001

Wormuth, D.; Zapf, J.: Grundlagen der Surface Mount Technology. München: Siemens Dematic 2001.

ZAEH 2006

Zaeh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-4462-2854-2. (Kostengünstig produzieren).

ZAEH ET AL. 2007

Zaeh, M. F.; Branner, G.; Hagemann, F.: Chancen und Risiken des Werkzeug- und Formenbaus im globalen Wettbewerb. In: Zaeh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum Innovation im Werkzeug- und Formenbau. München: Utz 2007, S. 1-17. ISBN: 978-3-8967-5085-3.

ZAEH ET AL. 2010

Zaeh, M. F.; Kellner, I.; Moegele, F.: Multi-Material 3D Inkjet Printing - Conductive Paths in Polymer Parts. In: University of Stellenbosch (Hrsg.): COMA International Conference on Competitive Engineering. Stellenbosch, Südafrika, 1.-4. Februar 2010, S. 51-56.

ZÄH ET AL. 2011

Zäh, M. F.; Eschey, C.; Kellner, I.; Kief, H. B.; Krauss, H.; Krol, T.; Ott, M.; Schilp, J.; Teufelhart, S.: Generative Fertigungsverfahren. In: Kief, H. B.; Roschiwal, H. A. (Hrsg.): CNC-Handbuch 2011/2012. München: Carl Hanser 2011, S. 253-268.

ZIEBART 2012

Ziebart, J. R.: Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration. Diss. Technische Universität Braunschweig. München (2012).



## 10 Anhang

### 10.1 Grundlagen der elektrisch leitfähigen Materialien

Elektrisch leitfähige Materialien werden in vielen unterschiedlichen Arten zur Verfügung gestellt. Eine Eingliederung kann anhand des Aggregatzustandes des Ausgangsmaterials vorgenommen werden: Festkörper, Flüssigkeiten und Gase.

Für eine strukturierte Übersicht über die am häufigsten eingesetzten leitfähigen Materialien sowie deren Vor- und Nachteilen werden sie in den folgenden Abschnitten anhand ihrer Aggregatzustände eingeteilt.

Der gasförmige Ausgangszustand dient meist zum Beschichten eines Objektes mit leitfähigem Material mithilfe der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD-Verfahren) oder der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD-Verfahren). Die dadurch erzeugten elektrisch leitfähigen Schichten sind üblicherweise sehr dünn, wodurch ein Einsatz von gasförmigen Ausgangsmaterialien zur Erzeugung von Leiterbahnen auf einem Pulverbett als nicht zielführend erachtet wird. Diese Verfahren werden daher im Folgenden nicht näher betrachtet.

#### Elektrisch leitfähige Festkörper

Eine Form, in der leitfähiges Material industriell verarbeitet wird, ist der feste Zustand in Gestalt von Kabeln und Drähten. Eine feinere Einteilung der Festkörper kann anhand des verwendeten Ausgangswerkstoffes vorgenommen werden, der maßgeblich die elektrischen Eigenschaften definiert. So hat Silber als Massivmaterial (Bulk-Material) mit  $0,0159 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  den geringsten spezifischen elektrischen Widerstand, gefolgt von Kupfer ( $0,0172 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) und Gold  $0,0244 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  (PERELAER ET AL. 2010). Trotz der geringeren Materialkosten von Kupfer im Vergleich zu Silber und Gold wird speziell für die Erzeugung von Leiterplatten üblicherweise Silber eingesetzt. Der Grund hierfür liegt in der sich bei unedlen Materialien (z. B. Silber, Kupfer, Aluminium, Nickel) ausbildenden Oxidschicht nach Kontakt des Ausgangsmaterials mit Luft. Diese Oxidschicht führt bei Silber zu keiner Beeinträchtigung der elektrischen Leitfähigkeit. Bei Kupfer bzw. Nickel stellt sie hingegen eine isolierende Schicht dar, die den elektrischen Widerstand erhöht (BONADIMAN & SALAZAR 2010). Der Nachteil höherer Materialkosten wird daher für den Vorteil besserer elektrischer Leitfähigkeit in Kauf genommen.

Allen Materialien gemeinsam ist eine definierte Abhängigkeit des elektrischen Leitwertes von der Temperatur (IVERS-TIFFÉE & MÜNCH 2007).

Neben der stetigen Verbesserung der leitfähigen metallischen Werkstoffe wird bereits seit 1977 an verschiedenen leitfähigen Polymeren geforscht (CHEN ET AL. 2003).

Positive Merkmale von Festkörpern:

- Geringer elektrischer Widerstand
- Einfach und in vielen unterschiedlichen Ausführungen zu beschaffen
- Bereits mit isolierender Schicht käuflich erwerbbar
- Vergleichsweise geringe Materialkosten

Negative Merkmale von Festkörpern:

- Einschränkungen hinsichtlich der Flexibilität bei der Leiterbahnerzeugung (bspw. durch minimalen Biegeradius des Materials)
- Hoher Arbeits- und Kostenaufwand für das Verlegen der Leiterbahnen
- Verbindung zweier Leiterbahnen nur über Formschluss bzw. durch Fügeprozesse mit Zusatzmaterial
- Hohe Masse aufgrund der Materialdichte und der Isolationsschichten
- Herstellungsbedingte Grenze für den minimalen Durchmesser des Drahtes

### **Elektrisch leitfähige Flüssigkeiten**

Durch die einfache, aber dennoch präzise Abgabe der elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Direct-Writing-Methoden nimmt ihre industrielle Relevanz stetig zu. Deshalb werden kontinuierlich neue leitfähige Flüssigkeiten entwickelt, wodurch ihre Auswahl mittlerweile größer ist als die bei Festkörpern.

Leitfähige Flüssigkeiten bestehen meist aus dem Trägermaterial (Matrix) und den leitfähigen Inhaltsstoffen. Unterschiede existieren in der prozentualen Verteilung der Komponenten und in den eingesetzten Trägermaterialien, was die Eigenschaften der Flüssigkeiten beeinflusst. So führt eine Erhöhung des Feststoffanteils bzw. der Partikelgröße zu einer Erhöhung der dynamischen Viskosität, ebenso wie die Auswahl eines Polymers bzw. Silikons als Trägermaterial anstelle von Alkohol oder Wasser. Durch die Verwendung eines niedrigviskosen Matrixmaterials kann die Verarbeitbarkeit der Flüssigkeit und damit die Abgabemenge bspw. mithilfe eines Druckkopfes vereinfacht werden, jedoch kommt es durch Sedimentation zu einem Absetzen des leitfähigen Feststoffes. Die Geschwindigkeit der Sedimentation hängt dabei vom Durchmesser der Teilchen, der dynamischen Viskosität des Mediums sowie der Dichtedifferenz zwischen Teilchen und Flüssigkeit ab. Eine Verlangsamung der Sedimentation ohne eine Beeinträchtigung der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit kann durch Zugabe zusätzlicher Hilfsstoffe, sogenannter Additive, erreicht werden. Es existieren zwei Mechanismen, die auch gemeinsam wirken können (CURRLE ET AL. 2006):



- **sterische Stabilisierung:** Die Additive erzeugen eine organische Schicht bzw. eine Polymerhülle um das Partikel, was eine Agglomeration verhindert.
- **elektrostatische Stabilisierung:** Die Additive beeinflussen die Oberflächenladung der Partikel, wodurch ein Abstoßungspotenzial erzeugt wird.

Jedoch führen Polymerhüllen und Polymermatrix zu einem elektrisch isolierenden Verhalten der Flüssigkeit. Daher sind für die Erzeugung von leitfähigen Bahnen zusätzliche Prozessschritte notwendig, auf die in den einzelnen Abschnitten, die nach der dynamischen Viskosität der unterschiedlichen Flüssigkeiten unterteilt sind, näher eingegangen wird.

In den folgenden Abschnitten werden exemplarisch drei Kategorien von Flüssigkeiten mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.

### *Leitklebstoff*

Leitklebstoff bestehen meistens aus einer Trägermatrix (z. B. Polymer- bzw. Silikonmatrix) (LUCBS 1998), die mit verschiedenen leitfähigen Materialien wie Silber, Gold, Kupfer, Nickel und Kohlenstoff gefüllt ist. Zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften des Klebstoffs können zusätzliche Hilfsstoffe in die Leitklebstoffe beigemischt werden (HABENICHT 2009).

Die Form der Partikel ist platten- bzw. flockenförmig mit einer durchschnittlichen Größe von 0,5  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$  (LUCBS 1998). Der optimale Füllstoffanteil ist abhängig von der Form und den Abmessungen der Plättchen und liegt bei Leitklebstoffen üblicherweise bei einem Massenanteil von 60 % bis 80 %, was einem Volumenanteil von ca. 25 % bis 30 % (LI ET AL. 2010) entspricht. Bei einem zu hohen Anteil an leitfähigem Material kommt es wegen des fehlenden Anteils der Trägermatrix zu einer Abnahme der Haftfähigkeit. Dies wirkt sich nachteilig auf die Temperaturwechselbeständigkeit des Materials aus, da die Metallpartikel einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als die Matrix haben und dies zu Rissen in der Leiterbahn führen kann (HABENICHT 2009). Außerdem können sich die Partikelpositionen aufgrund einer Aufweichung der Matrix ändern, was die elektrische Leitfähigkeit nachteilig beeinflussen kann (LI ET AL. 2010). Bei einem Anteil an leitfähigem Material unterhalb einer definierten Schwelle ergibt sich kein leitfähiger Zusammenhalt zwischen den Füllpartikeln. Diese Schwelle wird als Perkolationschwelle bezeichnet und beschreibt die Grenze, an der sich leitfähige Pfade durch den vorhandenen Füllstoffanteil in Bezug zum Polymeranteil ausbilden können (LI ET AL. 2010).

Der spezifische elektrische Widerstand wird bis zum Kontakt der leitfähigen Partikel (vgl. Abbildung 10-1, linke Darstellung) durch den Widerstand der Polymermatrix bestimmt und liegt am Beispiel eines ungefüllten Harzes bei

$10^{16} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  bis  $10^{19} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Erst durch den Aushärteprozess kommt es zu einer Verringerung des Wertes auf ca.  $10 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  bis  $1 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  (HABENICHT 2009). Dabei ist es nach LU ET AL. (1999) nicht notwendig, zur thermischen Nachbehandlung die Sinter Temperatur des Füllmaterials zu erreichen. Der thermische Nachbehandlungsprozess führt zum Schrumpfen der Leiterbahn. Die dadurch entstehenden Druckkräfte auf die Partikel erhöhen die Anzahl der Kontaktpunkte, wodurch eine Verringerung des elektrischen Widerstandes durch die Erzeugung von weiteren Leitpfaden erreicht wird (LI ET AL. 2010). Dieser Zusammenhang wird schematisch in Abbildung 10-1 dargestellt.

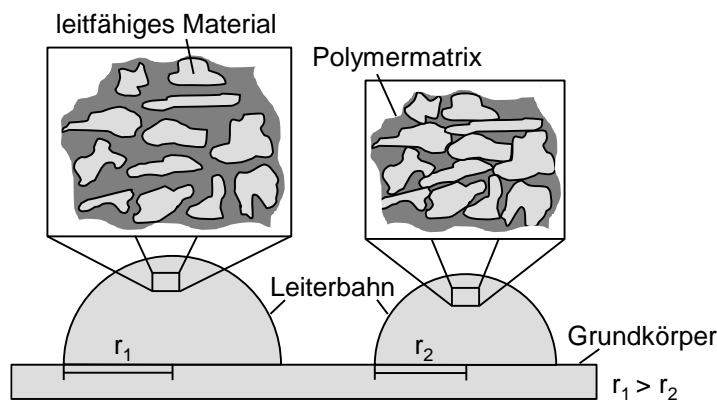


Abbildung 10-1: Schematische Darstellung eines Leiterbahnquerschnitts mit Partikelanordnung vor (links) und nach dem Aushärteprozess (rechts)

Bei Leitklebstoffen wird zwischen isotropen und anisotropen Materialien unterschieden. Letztere sind durch eine Richtungsabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit im Material charakterisiert (LI ET AL. 2010). Der Widerstand der Leiterbahn wird durch die Anzahl der Kontaktwiderstände bzw. durch den Fremdschichtwiderstand bei sich nicht berührenden Elementen beschrieben. So geht LUCHS (1998) von einer dielektrischen Fremdschicht von einigen Nanometern um jedes Füllstoffpartikel aus. Ab einer definierten Grenze kommt es bei einer zusätzlichen Steigerung des Füllstoffanteils zu keinem weiteren nennenswerten Absinken des spezifischen elektrischen Widerstandes.

Eine weitere Einteilung der Leitklebstoffe kann anhand der Anzahl der Komponenten vorgenommen werden. Dabei wird zwischen Ein-Komponenten-(1K)-Klebstoffen und Zwei-Komponenten-(2K)-Klebstoffen unterschieden, wobei auf dem Markt die 1K-Systeme überwiegen (FRANKE 2013). Diese benötigen nach der Verarbeitung meist einen thermischen Aushärteprozess, welcher typischerweise bei Temperaturen zwischen  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Aushärtezeit von 10 Minuten bis 120 Minuten stattfindet (LUCHS 1998).

2K-Systeme härten erst nach der Vermengung der beiden Komponenten aus. Dies kann, abhängig vom Leitklebstoff, auch bei Raumtemperatur stattfinden. Zur Beschleunigung der Aushärtung können die Leiterbahnen ebenfalls einer thermischen Nachbehandlung unterzogen werden.

Folgende positiven Merkmale ergeben sich durch die Verwendung von Leitklebstoffen:

- Aushärtung bei Raumtemperatur, wodurch es keines zusätzlichen Sinterprozesses bedarf (JONES ET AL. 2011)
- Einsatz des leitfähigen Materials auch bei thermisch sensitiven Materialien aufgrund der geringen Verarbeitungstemperatur (LUCBS 1998)
- Gute elektrische Eigenschaften bereits bei niedrigen Temperaturen (OTHMAN 2005)
- Keine bzw. verzögerte Sedimentation des Füllmaterials

Dem gegenüber stehen folgende negativen Merkmale:

- Verarbeitung des Leitklebstoffs mithilfe eines Dispensersystems ist für eine industrielle Herstellung oft zu langsam (JONES ET AL. 2011)
- Schwankende Leitfähigkeit, da die Ausbildung der Leiterpfade von der zufälligen Anzahl an Kontaktpunkten abhängig ist (HABENICHT 2009)
- Keine thermische Stabilität, da Temperaturänderungen zu Änderungen des Widerstandes aufgrund einer Aufweichung der Matrix und der damit verbundenen Verdichtung der Partikel führen können (HABENICHT 2009)
- Beeinflussung der Leitfähigkeit der Leiterbahn ab einem Volumenanteil an Luftblasen von über 25 %. Lufteinschlüsse können bei 2K-Klebstoffen z. B. durch den notwendigen Mischvorgang entstehen (HABENICHT 2009)

### *Lacke und Suspensionen*

Eine weitere Gruppe der leitenden flüssigen Medien stellen Lacke und Suspensionen dar. Diese bestehen in den meisten Fällen aus einer Trägerflüssigkeit mit einer niedrigen dynamischen Viskosität, die mit leitfähigen Partikeln (Silber oder Graphit) vermengt ist. Trotz der guten Fließeigenschaften ist es aufgrund der Größe der Partikel nicht möglich, diese Flüssigkeit mithilfe des Inkjet-Druckverfahrens zu verarbeiten, da es dabei zu einem Verschließen der Düsen und somit zum Ausfall des Druckkopfes kommen kann. Weiterhin ergibt sich aufgrund des Mischverhältnisses zwischen Trägerflüssigkeit und Partikeln eine beschleunigte Sedimentation, weshalb die Flüssigkeit bei längeren Verarbeitungszeiten kontinuierlich vermischt werden muss.

Diese im Vergleich zu Leitklebstoffen und Nanopartikel-Tinten eher kostengünstigen Medien kommen hauptsächlich im Bereich der Hobbyanwendungen zum

Einsatz. Der spezifische elektrische Widerstand der damit erzeugten Strukturen ist als hoch einzustufen, wodurch das Material zur Erzeugung von elektrischen Sensoren, z. B. Antennen, ungeeignet ist (KAWAHARA ET AL. 2013). Die geringe dynamische Viskosität erschwert zudem die Erzeugung von dünnen Leiterbahnstrukturen (Breite < 1 mm).

Positive Merkmale von Suspensionen:

- Kostengünstig, mit einer hohen Verfügbarkeit (KAWAHARA ET AL. 2013)
- Trocknung des Materials auch bei Raumtemperatur möglich
- Verwendung der Lacke und Suspensionen auf den unterschiedlichsten Oberflächen möglich

Negative Merkmale der Lacke/Suspensionen:

- Im Vergleich zu Festkörpern hoher elektrischer Widerstand
- Herstellung filigraner Strukturen aufgrund der niedrigen Viskosität nur schwer möglich
- Verarbeitung nur mithilfe eines Dispensersystems; dadurch geringe Verarbeitungsgeschwindigkeit
- Sedimentation muss durch eine kontinuierliche Durchmischung der Flüssigkeit vermieden werden
- Leiterbahnen ohne bzw. nur mit geringer Duktilität, wodurch diese bei Biegebelastungen schnell brechen können (KAWAHARA ET AL. 2013)

### *Leitfähige Tinten*

Leitfähige Tinten sind niedrigviskose Flüssigkeiten, die meist mithilfe von Druckverfahren (Inkjet-Druck bzw. Aerosol-Jet-Druck) verarbeitet werden und erst nach einem Nachbehandlungsprozess eine elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Dabei werden die leitfähigen Tinten in partikelbasierte und partikkelose Tinten unterteilt. Unterschiede bestehen neben der Verarbeitbarkeit und den unterschiedlichen Nachbehandlungsschritten vor allem in der erzielbaren elektrischen Leitfähigkeit der gedruckten Strukturen.

Die partikelbasierten leitfähigen Tinten bestehen, ähnlich wie Lacke und Suspensionen, aus einer Trägerflüssigkeit, meist Alkohol oder auch Wasser (LEE ET AL. 2005), und einem Füllmaterial, z. B. Gold-, Silber- und Kupferpartikel (PARK ET AL. 2007) oder aus Graphitpartikeln sowie Nanoröhren (Nanotubes) (MUSTONEN 2009). Damit eine Verarbeitung der Flüssigkeit mit einem Druckkopf möglich ist, muss darauf geachtet werden, dass die Partikel der Tinte kleiner sind als der Durchmesser der Druckkopfdüsen (LEE ET AL. 2005, VAN OSCH ET AL. 2008). Die Verarbeitbarkeit einer Tinte mit einem Druckkopf ist jedoch nicht nur vom Partikeldurchmesser, sondern auch davon abhängig, ob die Flüssigkeit nach der Abgabe

kontrolliert vom Druckkopf abreißt und anschließend einen gleichmäßigen Tropfen bildet (PRESSER 2012).

Die Partikel besitzen typischerweise einen Durchmesser von 1 nm bis 100 nm (PERELAER ET AL. 2006), weshalb die Tinten auch als Nanopartikel-Tinten (NP-Tinten) bezeichnet werden. Aufgrund der geringen Partikelgröße und des daraus resultierenden großen Partikeloberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses (PERELAER ET AL. 2006) ist die Schmelztemperatur der Partikel wesentlich geringer als die des eigentlichen Ausgangsmaterials (LI ET AL. 2010). Die Abhängigkeit der Sintertemperatur von der Partikelgröße wurde z. B. in ALLEN ET AL. (1986) untersucht. Der Feststoffanteil der Tinten liegt typischerweise bei einem Volumenanteil von 30 % bis 50 % (LI ET AL. 2010). Um eine Agglomeration der Partikel zu vermeiden, sind die Nanopartikel mit einer Polymerhülle ummantelt. Diese verhindert jedoch die Erreichung einer Leitfähigkeit der Tinte nach dem Aufbringen auf einer Oberfläche, wodurch ein zusätzlicher Nachbehandlungsschritt notwendig ist. Die verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Tinten unterscheiden sich in ihrer Partikelgröße, der Stabilität des Fluids sowie dem Partikelanteil (LEE ET AL. 2005).

Nach dem Aufbringen der Flüssigkeit auf eine Oberfläche besteht zunächst aufgrund der erwähnten Polymerhülle keine elektrische Leitfähigkeit (vgl. Abbildung 10-2/a). Erst durch ein Aufheizen der Tinten auf Temperaturen von min. 100 °C (PEREZ & WILLIAMS 2013) für mehrere Stunden, wobei zunächst der Schutzmantel verdampft und so ein Kontakt der Partikel entsteht (KAWAHARA ET AL. 2013), kann eine elektrische Leitfähigkeit erzeugt werden. Dieser Schritt wird als *Curing-Prozess* bezeichnet (PERELAER ET AL. 2010). Aufgrund der netzartigen Struktur des Leitpfades durch punktuelle Kontakte der einzelnen Partikel ist der Widerstand der Leiterbahn in diesem Stadium noch vergleichsweise hoch (vgl. Abbildung 10-2/b). Daher ist für einen geringeren elektrischen Widerstand ein zusätzlicher Sinterprozessschritt notwendig, bei dem die einzelnen Partikel angeschmolzen werden und gemeinsam mit den Nachbarpartikeln Sinterhalse bilden (vgl. Abbildung 10-2/c) (PERELAER ET AL. 2010). Bei einer weiteren Erhöhung der Sintertemperatur auf ca. 70 % bis 90 % der Schmelztemperatur des Ausgangswerkstoffes kommt es zu einem vollständigen Verschmelzen der Partikel. Der elektrische Widerstand ist anschließend mit dem eines Festkörpers vergleichbar (vgl. Abbildung 10-2/d). Abweichungen davon sind auf Rückstände der Polymerhülle in der Leiterbahn oder auf nicht vollständig aufgeschmolzene Partikel zurückzuführen (MEI 2005). Eine schematische Darstellung der einzelnen Sinterstufen sowie deren Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit der Leiterbahn ist in Anlehnung an PEREZ & WILLIAMS (2013) und GREER & STREET (2007) in Abbildung 10-2 zu sehen.

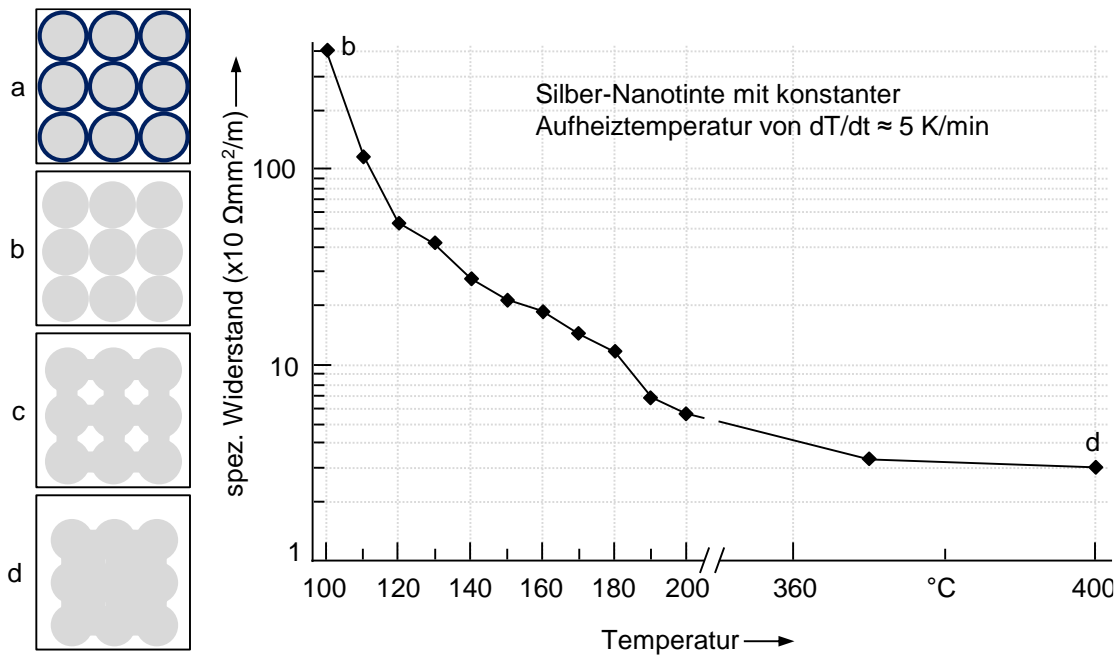


Abbildung 10-2: Darstellung der einzelnen Sinterstufen sowie der Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit der Leiterbahn in Anlehnung an PEREZ & WILLIAMS (2013) und GREER & STREET (2007)

Eine Versinterung kann z. B. durch den Einsatz eines Heizstrahlers erfolgen. Von Nachteil beim thermischen Sintern ist, dass viele für die Industrie relevanten Kunststoffmaterialien nicht gegen die teilweise hohen Temperaturen beständig sind. Dies gilt auch für typische Werkstoffe in der additiven Fertigung (PEREZ & WILLIAMS 2013). Die dadurch notwendigen Sinterzeiten von mehreren Minuten führen zu einer Steigerung der Produktionszeit, wodurch die Wirtschaftlichkeit sinkt (KAWAHARA ET AL. 2013). Zur Minimierung des Nachteils der langen Sinterzeit besteht die Möglichkeit, über das photonische Sintern, z. B. mit einer gepulsten Xenon-Lampe, die Prozesszeit auf wenige Millisekunden zu verringern (KIM ET AL. 2009). Eine Beeinflussung des Grundmaterials kann nach JONES ET AL. (2011) dennoch nicht verhindert werden. Soll eine großflächige Erwärmung des Grundmaterials vermieden werden, kann ein Laserstrahlsinterprozesses, bei dem der Laserstrahl nur die Leiterbahnen bearbeitet, eingesetzt werden. Der Nachteil bei letztgenanntem Verfahren besteht vor allem in den Investitionskosten für die Laserstrahlquelle (KAWAHARA ET AL. 2013). PERELAER ET AL. (2006) schlagen daher eine weitere, wirtschaftlichere Methode vor, nämlich das Sintern mit Mikrowellen, bei dem weder das Grundmaterial beeinträchtigt wird noch mit hohen Investitionen zu rechnen ist.

Aufgrund der thermischen Einschränkungen bezüglich der einsetzbaren Grundmaterialien geht die Entwicklung neuer leitfähiger Materialien weg von thermisch

induzierten Sinterprozessen hin zu Materialien, die z. B. ein chemisches Sintern ermöglichen.

So entwickelte die Firma *Mitsubishi Paper Mill* eine Flüssigkeit, in der die Nanopartikel in einem Lösungsmittel aus Kunststofflatex und einem Halogenid gelöst sind. Der genaue Verfestigungsmechanismus einige Sekunden nach der Materialabgabe ist aktuell noch Bestandteil von Untersuchungen; vermutet wird eine Strukturbildung der Silberpartikel mit dem Kunststofflatex, wobei das Halogenid als Beschleuniger fungiert (KAWAHARA ET AL. 2013).

Eine weitere, bei Raumtemperatur sinternde Flüssigkeit wird in LI ET AL. (2010) beschrieben. Als Matrixflüssigkeit wird eine Lösung aus 1-Dodecanamin, ein durch Alkohole auflösbares Salz, verwendet, als Füllmaterial finden Silber-Nanopartikel Anwendung. Die mit dieser Flüssigkeit gedruckten Leiterbahnen weisen nach einem mehrminütigen Bad in Methanol einen spezifischen elektrischen Widerstand von  $0,73 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  auf. Der Wert lässt sich durch eine Erhöhung der Tauchzeit verringern.

Eine weitere Verbesserung der Verarbeitbarkeit der leitfähigen Tinten wird durch die Entwicklung von partikellosen Tinten erreicht. Ein Vorteil dieser Tinten ist die Vermeidung des Verstopfens der Druckkopfdüsen durch zu große bzw. durch agglomerierte Nanopartikel. Diese als Metal-Organic-Deposition-Tinten (MOD) bezeichneten Flüssigkeiten sind Salze, die in unterschiedlichen Trägermaterialien gelöst sind. Dabei kann auf kolloidale Stabilisatoren wegen der fehlenden Füllstoffe verzichtet werden (PERELAER ET AL. 2010). Oftmals weisen diese Tinten auch eine geringere Sintertemperatur als NP-Tinten auf, da die leitfähigen Partikel erst bei der thermischen Nachbehandlung erzeugt werden (PERELAER ET AL. 2010). Eine geringe dynamische Viskosität trotz eines hohen Anteils an leitfähigem Material bei einer guten Oberflächenspannung erlaubt die Verarbeitung der Tinte mit einer Vielzahl unterschiedlicher Technologien (MEI 2005).

Basierend auf diesen Ausführungen konnten die folgenden positiven Merkmale von leitfähigen Tinten ermittelt werden:

- Möglichkeit der Verwendung von kostengünstigen leitfähigen Materialien wie z. B. Kupfer, wodurch die Materialkosten geringer werden (PARK ET AL. 2007, GROUCHKO ET AL. 2009)
- Vergleichsweise geringer Bedarf an leitfähiger Tinte wegen der präzisen, bedarfsgerechten Abgabe des Materials
- Höhe der Leiterbahn oft nur wenige Mikrometer
- Hohe Auftragsrate, daher kurze Herstellungszeit der Leiterbahnen

- Hohes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis der Füllstoffe, wodurch die Sintertemperaturen weit unter denen des Festkörpers (Drahtform) liegen (PERELAER ET AL. 2006)
- Hoher Anteil an leitfähigen Partikeln, daraus resultierende gute elektrische Leitfähigkeit der erzeugten Leiterbahnen (PERELAER ET AL. 2010)
- Keine bzw. nur eine verzögerte Sedimentation des Füllstoffes (falls vorhanden), wodurch Handhabung und Verarbeitung vereinfacht werden

Dem gegenüber stehen folgende nachteilige Merkmale:

- Bedarf an Nachbehandlungsschritten zur Erzeugung einer leitfähigen Struktur. Dieser oft thermische Prozess ist speziell bei Kunststoffen mit einer geringen Schmelztemperatur problematisch (VAN OSCH ET AL. 2008).
- Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Dauer der Nachbehandlung (KIM & MOON 2005), was sich negativ auf die Herstellungszeit auswirkt
- Gemessener Widerstand oft oberhalb dem von Massivsilber; Mehrfachdrucken der Leiterbahn verbessert die elektrische Leitfähigkeit auf Kosten der Druckzeit und führt gleichzeitig zu einer Verbreiterung der Leiterbahnen (PERELAER ET AL. 2010).
- Widerstand ist von der Oberflächenbeschaffenheit des zu bedruckenden Objektes abhängig
- Hohe Kosten für leitfähige Tinten (Xerox Silbertinte: 9 \$/g (2011))
- Verwendung von NP-Tinten aufgrund von Agglomerationen und Sedimentationen führt zum Verstopfen der Druckkopfdüsen

## 10.2 Simulation des 3D-Druckprozesses

### 10.2.1 Allgemeines

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Fluidsimulation hatte das Ziel, das Verhalten eines leitfähigen Materials bei dessen Abgabe auf ein mit Binder benetztes Pulverbett zu untersuchen. Zur Erhöhung des Verständnisses der verwendeten Modellierungsmethode wird zunächst auf die Grundlagen der Strömungssimulation eingegangen. Anschließend gilt es, ein passendes Modell der Pulverschüttung zu erstellen, bevor der Auftrag der Binderflüssigkeiten erfolgt. Die sich im Zwischenraum der Pulverschüttung befindende Luft wird durch die mit dem Druckkopf aufgebrauchte Flüssigkeit verdrängt. Da bereits bei diesem Schritt zwei Fluide (Luft und Binder) miteinander interagieren, handelt es sich um eine Simulation einer Mehrphasenströmung. Abschließend wird ein drittes Fluid mit variierender dynamischer Viskosität, stellvertretend für eine Suspension bzw. leitfähigen Tinte und



einen Leitklebstoff, aufgebracht und dessen Verhalten analysiert. Als Simulations-Software wurde ANSYS-CFX verwendet.

### 10.2.2 Grundlagen der Strömungssimulation (CFD-Simulation)

Im Bereich der Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Simulationsansätze.

Eine exakte, aber rechenintensive Methode zur allgemeingültigen Beschreibung von dreidimensionalen Strömungen bieten die Navier-Stokes-Gleichungen (NSG). Sie bilden ein System aus partiellen Differentialgleichungen, deren exakte Lösungen über die Direkte Numerische Simulation (DNS) erfolgen kann (ANSYS INC. 2011B). Eine durch Bildung zeitlicher Mittelwerte gängige, ressourcenschonende Abwandlung der NSG sind die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) (OERTEL & BOEHLE 2002).

Zur Lösung der partiellen RANS-Gleichung bedarf es zunächst einer zeitlichen und räumlichen Diskretisierung des Strömungsgebietes, was in den meisten Fällen die Aufteilung der durchströmten Geometrie in ein Gitter aus finiten Volumenelementen (Finite-Volumen-Methode, FVM) beinhaltet. Die Erhaltungsgleichungen werden im Anschluss an die Diskretisierung auf jedes der Teilvolumina für jeden Zeitschritt in integraler Form angesetzt. Die Anwendung der RANS-Gleichungen hat sich in der Fluidsimulation als ein gängiges Vorgehen etabliert. Weniger häufig eingesetzt werden die Finite-Elemente- bzw. die Finite-Differenzen-Methode (VERSTEEG & MALALASEKERA 2007).

Zur Diskretisierung und Lösung der Gleichungen für Mehrphasenströmungen in der RANS-basierten CFD werden zwei Verfahren unterschieden, das Euler-Euler-Verfahren und das Euler-Lagrange-Verfahren. Beim Euler-Euler-Verfahren werden beide Phasen (Luft-Binder-Gemisch) als räumliche Kontinuen betrachtet, auf die die NSG angewendet werden. Durch die Verwendung der gleichen Algorithmen zur Lösung beider Phasen ermöglicht die Methode eine einfache numerische Behandlung der Gleichungen. Einschränkungen gibt es bei der Definition einer punktförmigen Konzentration bzw. bei Fluiden mit Partikelanteilen und bei der Formulierung von Schubspannungen. Eine weitere Schwierigkeit stellt die Modellierung von Wechselwirkungen der Fluide mit den Oberflächen von geometrischen Körpern dar.

Beim Euler-Lagrange-Verfahren wird das Fluid als Kontinuum und die disperse Phase als endliche Menge diskreter Einzelteilchen repräsentiert. Diese Beschreibung wird in ANSYS-CFX auch als *Lagrangian Particle Tracking Model* bezeich-

net. Für die Beschreibung der diskreten Partikel, die sich durch eine kontinuierliche Matrix einer weiteren Phase bewegen, wird lediglich die Position der Partikel unter Lagrange'scher Beschreibung durch den Raum verfolgt. Da das Volumen der Partikel vernachlässigt wird, führt dies zu einer Reduzierung des Rechenaufwands gegenüber dem Euler-Euler-Verfahren. Die Verwendung dieser Methode bietet sich nur an, wenn der Volumenanteil einer Phase an der Strömung wesentlich geringer ist als der Volumenanteil der zweiten Phase und zudem, wie bei Festkörperpartikeln, dispers verteilt vorliegt (ANSYS INC. 2011A).

Einen alternativen Ansatz zu der auf den NSG basierenden numerischen Strömungssimulation bietet die Lattice-Boltzmann-Methode. Sie beschreibt das Fluid auf mikroskopischer Ebene als statistisches Vielteilchensystem, dessen Einzelbewegungen der Teilchen in Summe eine Strömung ergeben. Die Verteilungsfunktion sowie die Wechselwirkungen der einzelnen mikroskopischen Partikel werden durch Kollisionen anhand der Boltzmann-Gleichungen bestimmt. Zur Lösung der Gleichungen wird das Strömungsgebiet durch ein räumliches Netz diskretisiert, auf dessen Gitterpunkten sich die Teilchen befinden. Die Vorteile gegenüber den NSG-basierten Solvern liegen im geringen Rechenleistungsbedarf und in der einfachen Implementierung und guten Erweiterbarkeit (KOERNER ET AL. 2006). Dies macht eine alternative Anwendung der Methode speziell für den Einsatz bei porösen Medien attraktiv (CHEN & DOOLEN 1998).

### 10.2.3 Erzeugung einer Pulverschüttung

Die Größe des repräsentativen Volumenelements (Representative Elementary Volume = REV) ist abhängig von dem Detaillierungsgrad und somit der Komplexität des Modells. Werden die Bedingungen der realen Pulverschüttung berücksichtigt, bedingt die Erstellung eines realen REV's z. B. die Abbildung von Pulverkörnern mit einem Durchmesser von  $d < 10 \mu\text{m}$ . Dadurch würde die Anzahl der modellierten Partikel und somit die Komplexität des Modells steigen, was sich negativ auf die Rechenzeit für die Netzgenerierung und für die Strömungssimulation auswirkt. Eine Nichtbeachtung der kleineren Partikelkorndurchmesser führt jedoch zu einer Verringerung der spezifischen Oberfläche der Pulverschüttung und somit zu einem veränderten Geschwindigkeitsprofil der Phasen. Die Abmessungen des REV's werden bei dieser Simulation möglichst klein gewählt, um die Anzahl der Pulverpartikel klein zu halten. Dennoch muss der Bereich noch groß genug sein, um die charakteristische Strömung erfassen zu können. So wird die Höhe des REV's mit  $150 \mu\text{m}$  angenommen, da dies einer gängigen Schichtstärke beim betrachteten 3D-Druckprozess entspricht. Die minimale Breite bzw. Tiefe wird durch den Tropfendurchmesser des Binders und den mittleren Korndurchmesser des Pulvers bestimmt.

Ein definierter Hohlraum mit identischer Abmessung wie das REV wird für die Erzeugung einer Pulverschüttung schrittweise mit sich berührenden Pulverpartikeln variierender Größe gefüllt. Zur Beschleunigung der Modellerstellung werden nicht Kugeln als Volumenkörper mit den geometrischen Informationen, sondern lediglich deren Mittelpunkte sowie der Radius in einem mehrdimensionalen Array gespeichert.

Als Eingangsparameter werden dem Skript zur Erstellung des Pulvermodells neben den Abmessungen des REVs zunächst Informationen über den maximalen Raumfüllungsgrad  $RFG_{\max}$ , die maximale spezifische Oberfläche  $S_{m,\max}$  sowie ein Intervall für den zulässigen Pulverkorndurchmesser  $d_P$  übergeben. Der Algorithmus setzt zu Beginn zwei initiale Kugeln (vgl. Abbildung 10-3 a) mit vergleichsweise großen Durchmessern in das REV und speichert die Informationen in einem Array. Anschließend werden zufallsgeneriert 3D-Koordinaten erstellt und damit der Mittelpunkt der nächsten Kugel definiert (vgl. Abbildung 10-3 b). Der Radius einer neuen Kugel  $r_{Kugel}$  berechnet sich mit:

$$r_{Kugel} = X + 1 \mu m \quad (Gl. 10-1)$$

basierend auf dem gemessenen Abstand  $X$  des Mittelpunktes zur Oberfläche der benachbarten Kugel (vgl. Abbildung 10-3 c). Die Kugel wird platziert (vgl. Abbildung 10-3 d) und der Prozess zur Erzeugung neuer Kugeln so oft wiederholt, bis der maximale RFG erreicht wird.

Da eine punktuelle Berührung der Partikel zu Fehlern bei der Vernetzung und beim anschließenden Export des Pulvermodells führen kann, wird ein geringer Zuschlag vorgesehen, der eine Überschneidung der Kugeln gewährleistet. Die zulässigen Intervalle der Kugeldurchmesser richten sich nach den ermittelten Korngrößenverhältnissen (siehe Abschnitt 2.3). Durch die zufällige Erzeugung von Koordinaten lässt sich dem Modell keine bestimmte Korngrößenverteilung initial vorgeben.

Zu Beginn der Modellerstellung werden hauptsächlich größere Kugeln erzeugt, da der dafür notwendige Freiraum gegeben ist. Mit steigendem Raumfüllungsgrad während der Iteration sinkt der mittlere Radius der Kugeln.

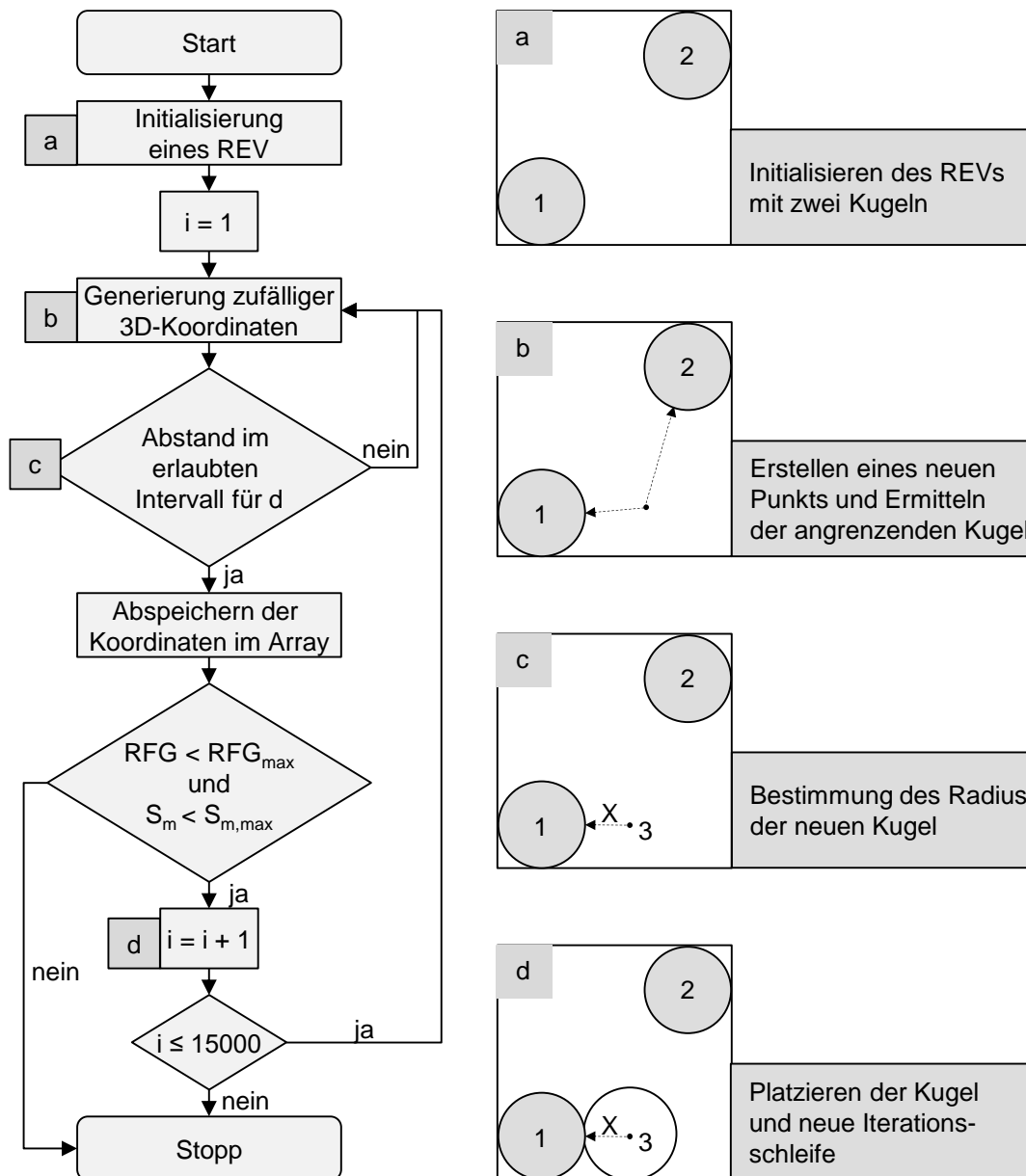


Abbildung 10-3: Algorithmus zur Erstellung eines Modells einer zufälligen Pulverschüttung

### 10.2.4 Vernetzungsstrategie

Die Netzgenerierung wurde in dieser Arbeit mit dem Meshing-Tool ICEM CFD durchgeführt. Gerade bei komplizierten Modellen bietet sich das an, da neben einer automatisierten Netzgenerierung schwierige Bereiche manuell nachvernetzt werden können. Als Netzelemente stehen Hexaeder, Tetraeder, prismatische Elemente und Hybridnetze zur Verfügung (ANSYS INC. 2013). Grundsätzlich sind für Strömungssimulationen Hexaederelemente zu bevorzugen, da ihre Seitenflächen parallel zueinander liegen und bei einer unidirektionalen Strömung entlang der Stromlinien ausgerichtet werden können. Bei der vorliegenden dreidimensionalen Umströmung der Pulverkörner kann von keiner Unidirektionalität ausgegangen

werden, weshalb keine richtungsabhängige Ausrichtung des Netzes erfolgen kann. Daher wurden zur Nachbildung der Geometrie des Porenraums des REVs in der Simulation dieser Arbeit Tetraederelemente eingesetzt (vgl. Abbildung 4-5). Diese Elemente sind speziell für die Abbildung komplexer Geometrien gut geeignet (VERSTEEG & MALALASEKERA 2007). Für die automatische Vernetzung wurde der Meshing-Algorithmus Robust (Octree) in ICEM verwendet.

### *Netzfeinheit*

Mit zunehmender Netzfeinheit steigt durch die wachsende Anzahl an Knotenpunkten neben der Genauigkeit der Strömungsberechnung auch der Rechenaufwand. Bei der Durchströmung eines Pulverbetts mit Binder bzw. leitenden Materialien sind die für das Verhalten des Fluids relevanten Wechselwirkungen diejenigen zwischen der Flüssigkeit und den Pulverpartikeln. In den Grenzbereichen wurden in der Modellierung Haftbedingungen und Wandfunktionen berücksichtigt, deren Berechnungsgenauigkeit durch ein verfeinertes Netz steigt.

Unter Berücksichtigung des Berechnungsergebnisses der dimensionslosen Kennzahl  $y^+$ , die eine Aussage über die notwendige Netzfeinheit gibt (ANSYS INC. 2011B), wurde bei der vorliegenden Vernetzung entlang der Konturen der Pulverpartikel ein Netz mit einer maximalen Kantenlänge der Volumenelemente von  $2\ \mu\text{m}$  bis  $3\ \mu\text{m}$  auf der Kugeloberfläche erzeugt. In Bereichen mit wenigen Interaktionen zwischen dem Fluid und den Partikeloberflächen wurden zur Reduzierung der Modellgröße größere Elemente platziert.

### *Vernetzung des Modells*

Die Erstellung einer oberflächigen Vernetzung des Simulationsmodells wurde in dieser Arbeit mithilfe von ANSYS ICEM durchgeführt. Da mit dieser Methode keine Volumenkörper erzeugt werden können, wurden die Pulverpartikel als Starrkörper definiert. Eine Vernetzung der für die Simulation irrelevanten Innenvolumina erfolgte nicht. Ausgehend vom erzeugten Kugelmodell wurde zunächst der Luftraum des Pulvermodells, welcher das Strömungsgebiet für die spätere Simulation darstellt, extrahiert. Bei dieser Vorgehensweise war zu beachten, dass das Strömungsgebiet geschlossen ist und die Grenzflächen keine Löcher aufweisen. Die Randbereiche des Modells wurden daher mit Flächen von der Umgebung und anderen Materialien abgegrenzt. Zur Erstellung der Modellvernetzung wurde das Volumen der Pulverkörner aus dem Volumen des REVs subtrahiert, wodurch ein verzweigtes System aus Kanälen übrig bleibt. Die Diskretisierung des Volumens erfolgte durch Volumenelemente. Zur Unterscheidung zwischen den verschiedenen Rauminhalten *Solid* und *Fluid* wurden sogenannte *Materialpoints* definiert.

Mit der dargestellten Methode ließen sich komplexe Strukturen mit vertretbarem Aufwand vernetzen. Die Zeit für die Vernetzung des in dieser Arbeit verwendeten

Modells betrug auf einem 2,4-GHz-Rechner unter der Verwendung von 10 GB Arbeitsspeicher ca. 15 Minuten. Dabei wurden 2.138.162 Volumenelemente und 377.257 Knotenpunkte generiert. Eine Bewertung des Netzes durch die in ICEM integrierten Qualitätskriterien ergab bei ca. 5000 Zellen an den Randbereichen und zwischen den Pulverkörnern eine nicht ausreichende Qualität, die jedoch durch eine manuelle Netzverfeinerung nachträglich angepasst werden konnte.

### 10.2.5 Modellierung der Mehrphasenströmung

Bevor die Simulation durchgeführt werden konnte, mussten spezifische Einstellungen für die Mehrphasenströmung vorgenommen, Randbedingungen definiert und die zeitliche Diskretisierung bestimmt werden. Im Folgenden werden die für die Simulation definierten Einstellungen näher erläutert.

#### *Homogenität des Mehrphasenmodells*

Innerhalb des ausgewählten Euler-Euler-Ansatzes wird zwischen zwei Submodellen unterschieden, dem homogenen Mehrphasenmodell, das einen gemeinsamen Satz an Erhaltungsgleichungen für die Bewegung zwischen zwei Phasen verwendet, und einem inhomogenen Mehrphasenmodell, bei dem ein unabhängiges Geschwindigkeitsfeld für jede Phase formuliert wird. Bei der Simulation der Strömung in den Poren sind beide Phasen (Binder und Luft) durch eine definierte Phasengrenze voneinander getrennt, wodurch die Verwendung eines homogenen Mehrphasenmodells gerechtfertigt ist. Weiterhin zeigte ein Vergleich beider Modelle, dass bei einer kürzeren Rechenzeit beim homogenen Phasenmodell der Übergangsbereich zwischen Luft und Binder schmaler und somit definierter abgebildet wurde.

#### *Modellierung der Phasengrenzfläche*

Strömungen mit freier Oberfläche und charakteristischer Länge  $l$  werden anhand der dimensionslosen Froude-Zahl  $Fr$  in unter- und überkritische Strömungen unterteilt (ANSYS INC. 2011A). Die Froude-Zahl setzt die charakteristische Geschwindigkeit der Strömung ins Verhältnis zu Trägheitseffekten. Bei unterkritischen Strömungen ( $Fr < 1$ ) ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Störungen (z. B. Wellen) auf der Oberfläche höher als die der Strömung selbst. Bei überkritischen Strömungen ( $Fr > 1$ ) überwiegt der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit, so dass sich die Oberflächenstörung nicht ausbreitet (SIGLOCH 2014).

Wird von einer lokalen Geschwindigkeit des Binders beim Auftreffen auf das Pulverbett von wenigen Metern pro Sekunde sowie von einem Kanaldurchmesser im Pulverbett von wenigen Mikrometern ausgegangen, berechnet sich eine hohe Froude-Zahl, die auf eine überkritische Strömung hinweist. Oberflächenaktivitäten konnten daher vernachlässigt werden, wodurch sich die Verwendung des *Free*

*Surface Models* für freie Oberflächenströmung anbot. Neben der Beschreibung definierter Phasengrenzflächen erlaubte das Modell die Berücksichtigung der Ausbildung von Kapillarbrücken sowie die Simulation der Benetzung von festen Oberflächen, entsprechend dem statischen Kontaktwinkel. Die Veränderlichkeit des dynamischen Kontaktwinkels bei der Fortbewegung einer Grenzfläche wird in ANSYS-CFX hingegen nicht in die Berechnungen einbezogen.

### *Modellierung der Oberflächenspannung*

Die mathematische Modellierung der Oberflächenspannung erfolgt bei ANSYS-CFX durch das Continuum-Surface-Force-Modell (CSF) von BRACKBILL ET AL. (1992). Oberflächenspannungen werden dabei von BRACKBILL ET AL. als Volumenkraft, die auf die Phasengrenzfläche wirkt, modelliert. Kommt es zum Kontakt mit einer adhäsiven Wand, wird in der Simulation der Kontaktwinkel zur Bestimmung des Grenzflächenverhaltens hinzugezogen. Der Normalenvektor verändert sich dahingehend, dass zwischen der Oberfläche und der Wand der Winkel  $\theta$  gebildet wird.

### *Modellierung von Auftriebseffekten*

Dieser Effekt wird in der Simulation durch das Buoyancy-Modell berücksichtigt. Durch die Festlegung des äußeren Kraftfeldes werden dem Modell Trägheitskräfte aufgeprägt und Auftriebskräfte durch Dichteunterschiede der beiden Fluide berücksichtigt. Der Einfluss der Gravitation wurde im Vergleich zu den wirkenden Kapillarkräften bei der hier durchgeführten Fluidsimulation als gering eingestuft.

### *Modellierung der Transportphänomene an den Grenzflächen*

Transportphänomene wie z. B. der Austausch von Masse, Wärme und Impulsen an Phasengrenzflächen einer Strömung mit freier Oberfläche können durch die Implementierung von zusätzlichen Modellen in der Berechnung berücksichtigt werden. Der materialbedingte Übergang des Binders in die Gasphase wurde aufgrund des im Vergleich zum Binderauftrag langsameren Verdampfungsprozesses nicht berücksichtigt. Auch der Wärmetransport über die Grenzflächen wurde als nicht relevant angesehen, sodass keine beschreibende Gleichung dafür in der Simulation berücksichtigt wurde. Der additive Aufbauprozess erfolgte bei Raumtemperatur, wodurch der Binder und die Luft ebenfalls Raumtemperatur besaßen. Einflüsse aufgrund der Verdampfungsenthalpie der Binderflüssigkeit wurden als gering eingeschätzt.

Im Hinblick auf das Turbulenzverhalten des Binders wurde der Einfluss des Impulsaustausches zwischen beiden Fluiden vernachlässigt. Jedoch wurde aufgrund der geringeren Dichte der Luft erwartet, dass das Gas im Pulverbett durch die Binderströmung verdrängt wird. Unter der Annahme, dass das Gas aus der porösen

Struktur ohne eine Beeinflussung des Bindermaterials entweichen kann, war dieser Einfluss ebenfalls vernachlässigbar.

### *Turbulenzmodellierung*

Durch die Verwendung der RANS-Gleichungen und die damit verbundene zeitliche Mittelung der Strömungsgrößen wurden relevante Fluktuationen geglättet und zusätzliche unbekannte Größen hinzugefügt. Entsprechende Turbulenzmodelle schließen das Gleichungssystem und führen damit zu einer Lösung. In der CFD-Simulation hat sich dafür das Zweigleichungs-Turbulenzmodell bewährt, das die Längen- und Zeitskalen der Instabilitäten unabhängig voneinander durch je einen Satz an Transportgleichungen löst und einen guten Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Berechnung und dem numerischen Aufwand bildet (ANSYS INC. 2011A).

Ob eine Strömung turbulent oder laminar ist, wird anhand der Reynoldszahl  $Re$  bewertet. Übersteigt  $Re$  bei Innenströmungen einen Wert von 2300 (ROTTA 1956), ist die Strömung als turbulent einzustufen. Aufgrund der Längenverhältnisse im Inneren des Porenraums konnte im Simulationsmodell von einer laminaren Strömung ausgegangen werden. Für die Gasphase erfolgte keine Abschätzung der lokalen Reynoldszahl.

### *Festlegung der Randbedingungen*

Kugeloberflächen wurden als *Walls* mit ideal glatter und adhäsiver Oberfläche definiert. Die Haftbedingungen und die experimentell ermittelten Kontaktwinkel (siehe Abschnitt 2.4) wurden vorgegeben.

Bei Einsatz eines Kontrollvolumens und der Betrachtung eines Bindertropfens führten offene Wandbedingungen (*Openings*) teilweise zu einem Herausströmen der Flüssigkeit über die Seitenflächen. Daher wurden die Seitenwände des Kontrollvolumens ebenso wie die Unterseite durch eine feste Wand ohne Haftbedingungen (*Free Slip Wall*) definiert. Es handelt sich dabei um eine für die Fluidsimulation notwendige Annahme. Durch eine in der Realität deutlich höhere Bindermenge pro Fläche wird ein Einsickern des Binders in die Nachbarbereiche unterdrückt, was demzufolge diese Annahme rechtfertigt. Für die Berücksichtigung einer Gasströmung aus dem Kontrollvolumen wurde die Oberseite als offen definiert.

Der Bindereintrag wurde durch einen Tropfen im Kontrollvolumen realisiert, dem zu Beginn der Simulation eine berechnete Initialgeschwindigkeit aufgeprägt wurde. Der Tropfendurchmesser war so gewählt, dass unter Bezugnahme auf die Projektionsfläche des Bindertropfens auf der Pulverschüttung ein realer Sättigungswert erreicht wurde. Die Bindereinträge liegen beim realen 3D-Druckprozess bei einem Massenanteil von ca. 10 % bis 15 % des Pulvermaterials.



### *Zeitliche Diskretisierung*

Für eine Abschätzung der korrekten Zeitschritte hat sich in der CFD die Kenngröße CFL-Zahl (Courant-Friedrichs-Lewy) etabliert (ANSYS INC. 2011B). Sie gibt an, wie viele Gitterzellen der Dimension  $\Delta x$  eine Strömung mit einer Geschwindigkeit  $v$  in der Zeit  $\Delta t$  durchströmt. Bei transienten Analysen muss die Kennzahl ausreichend klein sein. Ideal ist ein Wert von 1, was die Durchquerung der Strömung einer Gitterzelle in einem Schritt beschreibt. Ist die Zeitdiskretisierung gröber, werden in transienten Berechnungen feine Details mitunter nicht aufgelöst und lokale Inhomogenitäten geglättet (ANSYS INC. 2011B).

Besonders der Aufprall des Tropfens auf der Pulverbettoberfläche ruft komplexe Strömungszustände hervor, was einen Zeitschrittwert von maximal  $\Delta t = 1 \cdot 10^{-10}$  s erfordert. Ferner ist die Abbildung der kapillaren Strömungsprozesse von der Schrittweite abhängig. Waren die Zeitschritte zu lange, konnte keine Strömung in den Kanälen dargestellt werden, die nicht auf den Impulsübertrag aufgrund der Initialgeschwindigkeit des Tropfens oder auf die Gravitation zurückzuführen ist. Daher war eine Verkürzung von  $\Delta t$  auf  $1 \cdot 10^{-20}$  s notwendig. Da dies den Rechenaufwand immens erhöhte, konnte nur ein kleiner Zeitbereich von Millisekunden simuliert werden.

Auch bei längeren Simulationen konnte kein stationärer Zustand erreicht werden. Je nach Beschaffenheit drang der Tropfen wegen der Anfangsgeschwindigkeit in das Pulverbett ein, bis er durch Reibungseffekte (z. B. innere Reibung im Fluid) weitestgehend abgebremst wurde. Erst im Anschluss drang der Binder aufgrund der Kapillareffekte in die Freiräume ein und füllte die Hohlräume des Pulverbetts. Die Dauer von wenigen Millisekunden wurde daher als sinnvoller Kompromiss zwischen Rechendauer und Abbildungsumfang gewählt.

### *Variationsrechnung*

Zur Verifikation des Simulationsmodells wurden unterschiedliche Parameter des Modells schrittweise verändert und die Ergebnisse analysiert.

In der ersten Versuchsreihe wurde der mittlere Korndurchmesser  $d_{50}$  der Pulverprobe bei einem konstanten Raumfüllungsgrad von 0,45 variiert. Eine Verringerung von  $d_{50}$  geht mit einer Erhöhung der spezifischen Oberfläche  $S_m$  einher. Wegen der steigenden Anzahl an Pulverkörnern musste das REV verkleinert und der simulierte Zeitraum auf 0,1 ms reduziert werden. Die aufgetragene Bindermenge wurde entsprechend angepasst.

Die Ergebnisse der Simulation zeigten, dass mit sinkendem mittleren Korndurchmesser die Eindringtiefe des Binders in das Pulverbett abnimmt (vgl. Abbildung 10-4).

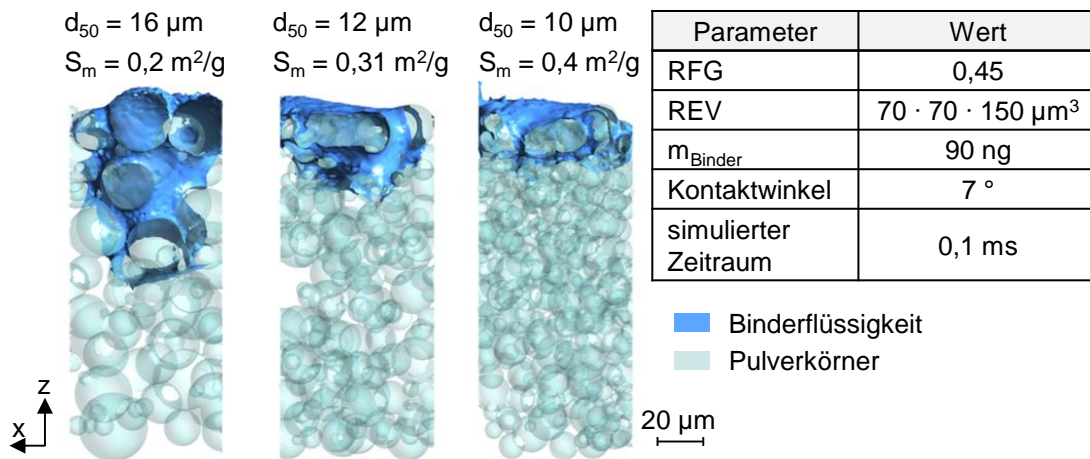


Abbildung 10-4: Simulationsergebnis einer Binderabgabe auf ein Pulverbett mit verschiedenen mittleren Korndurchmessern ( $VF_B = 0,8$ )

Diese Erkenntnis deckt sich mit den theoretischen und empirischen Überlegungen, basierend auf der Richards-Gleichung (SCHNEID 2000). Diese besagt, dass eine Beschleunigung der Strömung mit steigendem Kapillardurchmesser und Pulverkorn Durchmesser erfolgt. Zudem decken sich diese Erkenntnisse mit denen von POLSAKIEWICZ & KOLLENBERG (2014), die wegen des von ihnen verwendeten feinen Keramikpulvers kein Einsickern der leitfähigen Tinte feststellen konnten. In einer zweiten Versuchsreihe wurde der Raumfüllungsgrad variiert. Die Simulationsergebnisse zeigten eine mit steigendem RFG schwächere Fortbewegung der Binderflüssigkeit in z-Richtung (vgl. Abbildung 10-5).

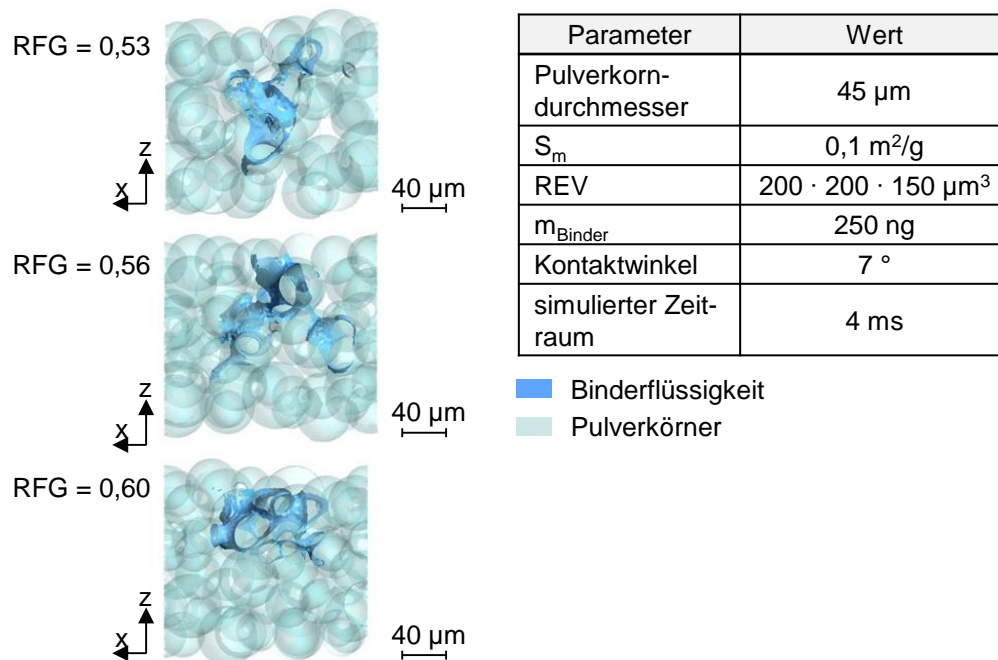


Abbildung 10-5: Simulationsergebnis einer Binderabgabe auf ein Pulverbett mit verschiedenen Raumfüllungsgraden ( $VF_B = 0,8$ )

Auch diese Ergebnisse decken sich mit den theoretischen Überlegungen, basierend auf der Richards-Gleichung, die eine Abbremsung der Strömung mit einem steigenden Raumfüllungsgrad vorhersagt (SCHNEID 2000).

Für eine Variation der Sättigung des Pulverbetts mit Bindermaterial wurde in einer weiteren Versuchsreihe die Bindermenge durch eine Variation des Durchmessers des Bindertropfens angepasst (vgl. Abbildung 10-6). Die geometrische Ausprägung der Pulverschüttung blieb dabei unverändert.

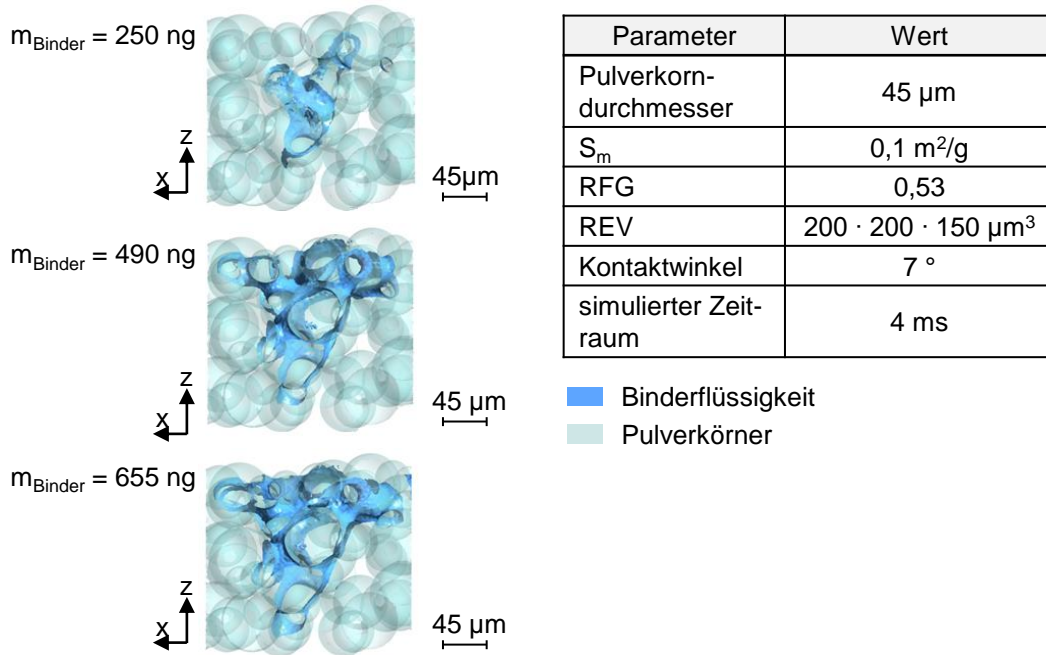


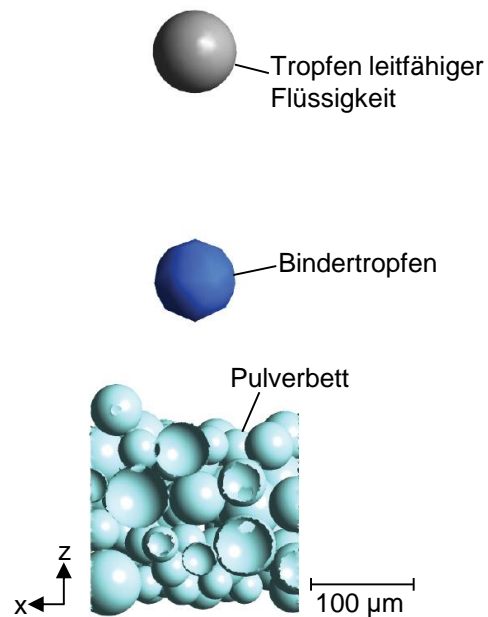
Abbildung 10-6: Simulationsergebnis einer Binderabgabe auf ein Pulverbett mit verschiedenen Bindermengen ( $VF_B = 0,8$ )

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass es zu unterschiedlichen benetzten Oberflächen aufgrund des variierenden Durchmessers des Bindertropfens kommt. Eine Vergrößerung der Tropfenmasse führte zu einer breiteren Verteilung des Binders in der x- und y-Ebene. Der Einfluss der Sättigung auf das Eindringverhalten in z-Richtung war nur gering. Nach der Richards-Gleichung kommt es bei einer Zunahme der Bindermasse zu einer Beschleunigung der Binderdurchströmung (SCHNEID 2000). Dieses Verhalten konnte durch die Simulationsrechnung ebenfalls bestätigt werden.

### 10.2.6 Simulation beim Aufbringen mehrerer Flüssigkeiten

Zur Simulation der Verarbeitung zweier unterschiedlicher Fluide wurde das Strömungsgebiet in z-Richtung erweitert und über dem Bindertropfen ein Tropfen einer leitfähigen Flüssigkeit positioniert. Der Simulationsaufbau wird in Abbildung 10-7 dargestellt. Diese Vorgehensweise ermöglichte den zeitlich versetzten

Auftrag zweier Flüssigkeiten auf ein Pulverbett. Der Raumfüllungsgrad des Pulverbetts betrug 53 % mit einem mittleren Korndurchmesser von  $45\ \mu\text{m}$ . Die spezifische Oberfläche der Pulverschüttung war  $0,1\ \text{m}^2/\text{g}$ . Der Durchmesser des Bindertropfens wurde aufgrund des für die Versuchsanlage gängigen Anteils von 15 Massenprozent an Bindermaterial im Pulverbett mit  $80\ \mu\text{m}$  definiert. Der Durchmesser der elektrisch leitenden Flüssigkeit betrug ebenfalls  $80\ \mu\text{m}$ . Die Ergebnisse der Simulation können dem Abschnitt 4.2.3 entnommen werden.



*Abbildung 10-7: Simulationsmodell für die Aufbringung von zwei unterschiedlichen Flüssigkeiten auf ein Pulverbett*

### 10.3 Vollfaktorieller Versuchsplan der Leiterbahnerzeugung (vgl. Abschnitt 6.3.1.1)

Versuchsnummer	Dispensergeschwindigkeit in $\mu\text{m/s}$	Verfahrgeschwindigkeit in $\text{mm/s}$	Abstand der Nadelspitze zur Pulverbettoberfläche in $\text{mm}$
1	60	10	0,3
2	60	20	0,3
3	60	30	0,3
4	60	40	0,3
5	60	10	0,5
6	60	20	0,5
7	60	30	0,5
8	60	40	0,5
9	60	10	0,7
10	60	20	0,7
11	60	30	0,7
12	60	40	0,7
13	85	10	0,3
14	85	20	0,3
15	85	30	0,3
16	85	40	0,3
17	85	10	0,5
18	85	20	0,5
19	85	30	0,5
20	85	40	0,5
21	85	10	0,7
22	85	20	0,7
23	85	30	0,7
24	85	40	0,7
25	110	10	0,3
26	110	20	0,3
27	110	30	0,3
28	110	40	0,3
29	110	10	0,5
30	110	20	0,5
31	110	30	0,5
32	110	40	0,5
33	110	10	0,7
34	110	20	0,7
35	110	30	0,7
36	110	40	0,7

## 10.4 Versuchsplan und Auswertung der Kanalbreite und –tiefe (vgl. Abschnitt 6.4.1.2)

*Tabelle 10-1: Versuchsplan und Auswertung der Kanalbreite*

Versuchsnummer	Lippenbreite in $\mu\text{m}$	Überdruck in bar	Verfahrgeschwindigkeit in mm/s	Kanalbreite in mm
1	205,08	4	60	0,13
2	205,08	1	60	0,12
3	205,08	6	60	0,15
4	205,08	6	40	0,13
5	205,08	1	20	0,11
6	205,08	6	10	0,09
7	205,08	2	10	0,14
8	315,32	3	30	0,22
9	315,32	4	10	0,26
10	315,32	1	40	0,27
11	315,32	6	60	0,27
12	315,32	1	10	0,26
13	315,32	6	10	0,25
14	315,32	1	60	0,25
15	418,81	2	60	0,30
16	418,81	4	30	0,31
17	418,81	2	30	0,37
18	418,81	6	60	0,34
19	418,81	1	10	0,35
20	418,81	6	10	0,34
21	418,81	1	60	0,40
22	466,69	6	20	0,40
23	466,69	3	20	0,47
24	466,69	6	60	0,47
25	466,69	1	10	0,32
26	466,69	1	60	0,45
27	466,69	3	40	0,37
28	466,69	6	10	0,41

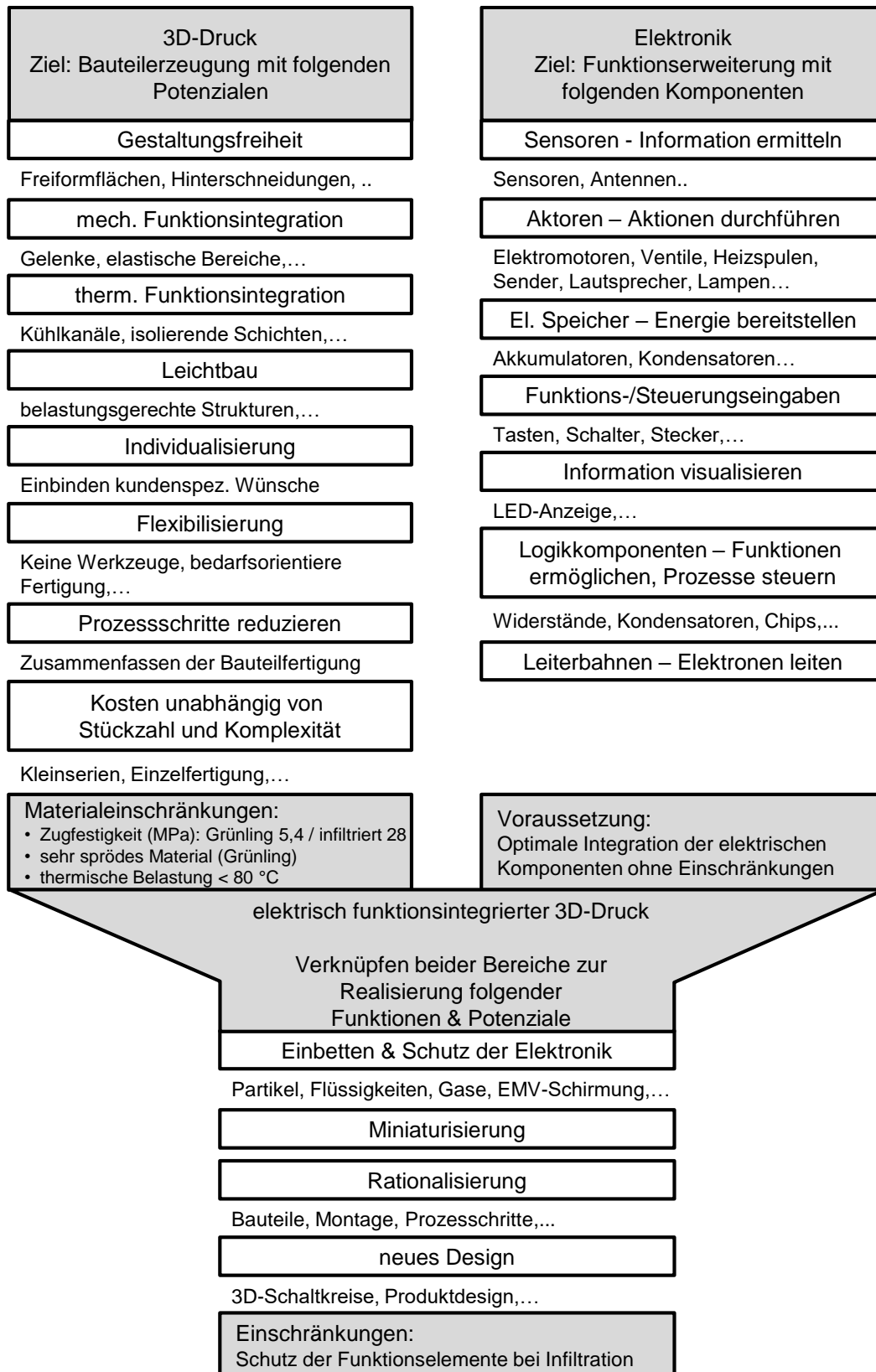
*Tabelle 10-2: Versuchsplan und Auswertung der Kanaltiefe*

Versuchsnummer	Tiefe in mm
1	0,12
2	0,11
3	0,12
4	0,11
5	0,12
6	0,10
7	0,08
8	0,10
9	0,13

## 10.5 Ermittlung des minimalen Betriebsdrucks (vgl. Abschnitt 6.4.2)

Überdruck in bar	Ausschlusskriterien			Betriebsdruck mit doppeltem Sicherheitsfaktor
	Greifen nicht möglich	Achsbewegung nicht möglich	Einlegen nicht möglich	
SMD 1 (Masse 0,151 g)				
0,1	X			p = 0,6 bar
0,2	X			
0,3				
SMD 2 (Masse 0,294 g)				
0,1	X			p = 1,0 bar
0,2	X			
0,3		X		
0,4			X	
0,5				
SMD 3 (Masse 0,452 g)				
0,1	X			p = 1,6 bar
0,2	X			
0,3	X			
0,4		X		
0,5		X		
0,6			X	
0,7			X	
0,8				

## 10.6 Funktionsbaum des elektrisch-funktionsintegrierten 3D-Drucks (vgl. Abschnitt 7.2.1)





## 10.7 Bewertungskriterien mit Abstufungen (vgl. Abschnitt 7.2.3)

Anforderungen	0 Punkte	1 Punkt	2 (4) Punkte
<b>Material</b>			
Zugfestigkeit	bis 5,4 MPa (uninfiltriert)	5,4 – 28,0 MPa (infiltriert)	> 28 MPa (bisher nicht erreichbar) (4)
Duktilität	spröde / uninfiltriert ausreichend	infiltriert ausreichend	sehr duktil, elastisch
chem. Beständigkeit	keine besondere chem. Beständigkeit	Feuchtigkeit und nicht aggressive Medien	aggressive Medien
Kälte- und Hitzebeständigkeit	-40°C – 40°C	40°C – 60°C	> 60°C
<b>Elektrische Integration</b>			
Integrierbarkeit der elektr. Komponenten	realisiert	theoretisch integrierbar	theoretisch mit erhöhtem Aufwand
	siehe folgende Tabelle		
Miniaturisierung bez. elektr. Integration	keine räumlichen Einschränkungen	geringe räumliche Einschränkungen	große räumliche Einschränkungen
elektrischer Leiterbahnwiderstand	erwünscht oder nicht bedeutend	ausreichend oder kompensierbar	sehr niedrig, bisher nicht erreichbar (4)
Kälte- und Hitzebeständigkeit	0°C – 30°C	-30°C – 0°C, 30°C – 60°C	<-30°C, > 60°C
<b>3D-Druck</b>			
Strukturierungsgröße/ Genauigkeit	> 200 µm (gering)	125 – 200 µm (hoch/ausreichend)	< 125 µm (2), nicht ausreichend (4)
Bauraumgröße	250mm x 110mm x 90mm	290mm x 215mm x 215mm	> 290mm x 215mm x 215mm
Farbeigenschaften	irrelevant	mind. schwarz&weiß	Farbe

### Erweiterung zur Integration von elektrischen Komponenten

Komponente	Integrierbarkeit
Widerstand, LED	(0) realisierbar (bisher manuell)
Temperatur-, Feuchtigkeits-, DMS-, Druck-, Beschleunigungs-, Magnetfeld-, Helligkeitssensor, Mikrofon, RFID-Tag, Taster, Batterie, Induktionsspule, Heizelement, Mikrocontroller und Logikkomponenten, Antenne	(1) theoretisch integrierbar (SMDs verfügbar)
Anzeige, Aktor, Lautsprecher, Vibrationselement, GPS-Sensor	(2) theoretisch, mit erhöhtem Aufwand integrierbar

## 10.8 Applikationen mit den jeweiligen Bewertungen (vgl. Abschnitt 7.2.2 und 7.2.3)

1. Überwachungssensorik für Dämmmaterialien					
Überwachung der Feuchtigkeit in Wänden bzw. in Dämmmaterialien					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	0	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	0
Duktilität	0	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	1	Σ: elektrische Integration	6	Σ: 3D-Druck	0
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	0,5	konv. Herstellung	2
Marge	0	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	0	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	1	EWB berechnet:	6	Σ: Wettbewerbsintensität	5

2. Heizdübel					
Aufheizen eines Bauteils/Materials zur Erzeugung eines Formschlusses mit einer Bohrung					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	4	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	6	Σ: elektrische Integration	2	Σ: 3D-Druck	1
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	3	konv. Herstellung	1
Marge	0	Anf. elektr. Integration / 2	1	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	0	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	0	EWB berechnet:	6	Σ: Wettbewerbsintensität	5

3. Temperaturlogger					
Überwachung der Kühlkette für Lebensmitteltransporte					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	0	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	0
Duktilität	0	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	1	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	2	Σ: elektrische Integration	6	Σ: 3D-Druck	0
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	2	Materialanforderungen / 2	1	konv. Herstellung	2
Marge	0	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	0	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	6	Σ: Wettbewerbsintensität	6

<b>4. Dehnmessstreifen im Bauteil</b>					
Integration von Dehnmessstreifen in Prototypen zur Verifizierung von Simulationsdaten					
<b>Materialanforderungen</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an die elektrische Integration</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an den 3D-Druck</b>	<b>Pt.</b>
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	1
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	2	$\Sigma$ : elektrische Integration	2	$\Sigma$ : 3D-Druck	2
<b>Marktattraktivität gew.</b>	<b>Pt.</b>	<b>Entwicklungsbedarf</b>	<b>Pt.</b>	<b>Wettbewerbsintensität</b>	<b>Pt.</b>
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1	konv. Herstellung	0
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	1	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	3	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	1

<b>5. Verlorene Gussmodelle</b>					
Temperatursensoren in Sandformen zur Überwachung des Erstarrungsverhaltens					
<b>Materialanforderungen</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an die elektrische Integration</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an den 3D-Druck</b>	<b>Pt.</b>
Festigkeit	0	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	0	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	2
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	0	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	0	$\Sigma$ : elektrische Integration	1	$\Sigma$ : 3D-Druck	3
<b>Marktattraktivität gew.</b>	<b>Pt.</b>	<b>Entwicklungsbedarf</b>	<b>Pt.</b>	<b>Wettbewerbsintensität</b>	<b>Pt.</b>
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	0	konv. Herstellung	0
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	0,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	2	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	1

<b>6. Architekturmodelle</b>					
Integration von Lichtquellen für Modelle zur besseren Veranschaulichung					
<b>Materialanforderungen</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an die elektrische Integration</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an den 3D-Druck</b>	<b>Pt.</b>
Festigkeit	0	Integrierbarkeit der Komp.	0	Genauigkeit	1
Duktilität	0	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	2
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	0	$\Sigma$ : elektrische Integration	1	$\Sigma$ : 3D-Druck	5
<b>Marktattraktivität gew.</b>	<b>Pt.</b>	<b>Entwicklungsbedarf</b>	<b>Pt.</b>	<b>Wettbewerbsintensität</b>	<b>Pt.</b>
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	0	konv. Herstellung	1
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	0,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1,7	Ansehen	0
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	2	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	1

7. Automobil-Seitenspiegel					
Integration der Elektronik in den Seitenspiegel für eine schnellere Ersatzteillieferung					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	6	Σ: 3D-Druck	2
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	3	EWB berechnet:	7	Σ: Wettbewerbsintensität	4

8. Griffheizung für Motorräder					
Erzeugung von individuellen Griffen mit integrierten Heizelementen					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	0	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	1	Σ: 3D-Druck	2
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	1
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	0,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	3	Σ: Wettbewerbsintensität	2

9. Spezialisierte Werkstückträger					
Intelligente Werkstückträger mit Bauteilerkennung, Kapazitätserkennung, ...					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	2
chem. Beständigkeit	2	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	4	Σ: elektrische Integration	5	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	2	konv. Herstellung	0
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	2,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	5	EWB berechnet:	8	Σ: Wettbewerbsintensität	1

10. Tiefziehwerkzeuge					
Werkzeug mit integrierter Sensorik (z.B. Drucksensor) zur Prozessüberwachung					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	4	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	2
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	5	$\Sigma$ : elektrische Integration	2	$\Sigma$ : 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	2,5	konv. Herstellung	1
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	1	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	7	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	2

11. Greifer mit Sensorik					
Individuelle Greifer mit integrierter Sensorik zur Überwachung des Greifprozesses					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	1	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	3	$\Sigma$ : elektrische Integration	2	$\Sigma$ : 3D-Druck	2
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	1	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	5	EWB berechnet:	3	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	3

12. Werbegeschenke					
Bauteile mit einer z.B. integrierten LED					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	2	$\Sigma$ : elektrische Integration	6	$\Sigma$ : 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	2	Materialanforderungen / 2	1	konv. Herstellung	2
Marge	0	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	0
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	7	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	2

## Anhang

13. Shape-Memory-Aktor					
Erwärmen des Materials mit anschließender Verformung; nach dem Abkühlen bleibt die Geometrie erhalten					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	4	Integrierbarkeit der Komp.	2	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	1
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	6	Σ: elektrische Integration	4	Σ: 3D-Druck	2
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	3	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	2	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. : 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	8	Σ: Wettbewerbsintensität	4

14. Individuelle Adapter					
Erzeugung von elektronischen Verbindungsadaptern für unterschiedliche Stecker					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	0	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	2	Σ: elektrische Integration	4	Σ: 3D-Druck	2
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1	konv. Herstellung	2
Marge	0	Anf. elektr. Integration / 2	2	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. : 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	0	EWB berechnet:	6	Σ: Wettbewerbsintensität	3

15. Lab-on-a-Chip					
Funktions- und Miniaturisierungspotenziale von Lab-on-a-Chip-Systemen					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	4
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	2	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	4	Σ: elektrische Integration	5	Σ: 3D-Druck	4
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	2	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	2,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1,3	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. : 2	4	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	5	EWB berechnet:	10	Σ: Wettbewerbsintensität	6

16. Rührwerke für biologische Reaktoren					
Individuelle Gestaltung von Rührwerken mit integrierten Heizelementen					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	2
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	0
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	3	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	1,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	5	EWB berechnet:	4	Σ: Wettbewerbsintensität	6

17. Baukasten für Sensoren					
Integration von unterschiedlichen Sensoren in Standardbauteile für die schnelle Erzeugung von Messständen					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	1	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	4	Σ: elektrische Integration	4	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	2	konv. Herstellung	1
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	2	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	5	Σ: Wettbewerbsintensität	4

18. Versteckte Mikrofone					
Integration von Mikrofonen in Bauteile bzw. für die Unterhaltungsbranche in z.B. Knöpfe					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	6	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	1
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	8	Σ: Wettbewerbsintensität	3

19. Gießautomatik für Topfpflanzen					
Sensorik mit einer LED zur Überwachung der Feuchtigkeit der Erde der Pflanzen					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	0
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	5	Σ: 3D-Druck	1
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	0	Anf. elektr. Integration / 2	2,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,3	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	0	EWB berechnet:	6	Σ: Wettbewerbsintensität	5

20. Individualisierte Rahmen für Funktionsbrillen					
Integration von Sensorik in Brillenrahmen (siehe z.B. „Google Glass“)					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	0	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	6	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	1
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	0
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	8	Σ: Wettbewerbsintensität	1

21. Tasten für einen Pianolehrer					
Pianotasten mit z.B. integrierten LEDs zur optischen Unterstützung des Übens					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	0	Genauigkeit	0
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	2	Σ: elektrische Integration	1	Σ: 3D-Druck	1
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1	konv. Herstellung	1
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	0,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,3	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	2	Σ: Wettbewerbsintensität	5



22. Spezielle Bausteine (bspw. Lego®)					
Bausteine (Lego®) mit integrierten LEDs bzw. Sensorik für Zusatzfunktionen					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	3	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	0
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	1,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	4	Σ: Wettbewerbsintensität	4

23. Verkapselte Elektronik für ferngesteuerte Boote und Flugzeuge					
Vermeidung von Kontakt der Elektronik mit Wasser bzw. von Verunreinigungen					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	6	Σ: 3D-Druck	2
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	1
Marge	0	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	0	EWB berechnet:	7	Σ: Wettbewerbsintensität	3

24. Spielzeug-Autorennbahn: Start-Ziel-Platte					
Integration von LEDs und Induktionsfeldern in die Platten einer Spielzeug-Autorennbahn					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	1
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	2	Σ: elektrische Integration	5	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1	konv. Herstellung	2
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	2,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	2	EWB berechnet:	7	Σ: Wettbewerbsintensität	6

25. Schachbrett mit Schachcomputer					
Darstellung der Züge durch Aufleuchten des Feldes mithilfe integrierter LEDs					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	1
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	2	Σ: elektrische Integration	5	Σ: 3D-Druck	4
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1	konv. Herstellung	1
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	2,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1,3	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	7	Σ: Wettbewerbsintensität	4

26. Design-Lampen					
Individuelle Lampe mit integrierten elektrischen Leiterbahnen bzw. Leuchtmitteln					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	0	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	2
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	1	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	1	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	1	Σ: 3D-Druck	5
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	1
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	0,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1,7	Ansehen	0
		nicht erfüllte Anf. · 2	0	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	4	Σ: Wettbewerbsintensität	1

27. Design-Wanduhren					
Individuelle Wanduhr mit einer Darstellung der Zeit über LEDs					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	1
chem. Beständigkeit	0	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	1	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	5	Σ: 3D-Druck	4
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	1
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	2,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1,3	Ansehen	0
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	7	Σ: Wettbewerbsintensität	1

<b>28. Farbthermometer</b>					
Thermometer mit integrierten Farb-LEDs zur vereinfachten Darstellung der Temperatur					
<b>Materialanforderungen</b>	Pt.	<b>Anforderungen an die elektrische Integration</b>	Pt.	<b>Anforderungen an den 3D-Druck</b>	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
$\Sigma$ : Material	3	$\Sigma$ : elektrische Integration	6	$\Sigma$ : 3D-Druck	2
<b>Marktattraktivität gew.</b>	Pt.	<b>Entwicklungsbedarf</b>	Pt.	<b>Wettbewerbsintensität</b>	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	1
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	3	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	0
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	7	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	1

<b>29. Spezielle Schienen, Prothesen</b>					
Individuelle Prothesen mit integrierten Sensoren zur Überwachung z.B. der Herzfrequenz					
<b>Materialanforderungen</b>	Pt.	<b>Anforderungen an die elektrische Integration</b>	Pt.	<b>Anforderungen an den 3D-Druck</b>	Pt.
Festigkeit	4	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	1
chem. Beständigkeit	1	Leiterbahn-Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	6	$\Sigma$ : elektrische Integration	5	$\Sigma$ : 3D-Druck	3
<b>Marktattraktivität gew.</b>	Pt.	<b>Entwicklungsbedarf</b>	Pt.	<b>Wettbewerbsintensität</b>	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	3	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	2,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	4	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	11	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	3

<b>30. Vibrationsarmband zur Informationsalarmierung</b>					
Mikrofon im Armband erkennt Geräusch (Telefonklingeln) und informiert den z.B. Hörgeschädigten über Vibrationen und Informationen auf einem Display					
<b>Materialanforderungen</b>	Pt.	<b>Anforderungen an die elektrische Integration</b>	Pt.	<b>Anforderungen an den 3D-Druck</b>	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	2	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
$\Sigma$ : Material	3	$\Sigma$ : elektrische Integration	7	$\Sigma$ : 3D-Druck	3
<b>Marktattraktivität gew.</b>	Pt.	<b>Entwicklungsbedarf</b>	Pt.	<b>Wettbewerbsintensität</b>	Pt.
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	3,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
$\Sigma$ : Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	8	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	6

## Anhang

31. Hörgeräte					
Miniaturisierung der individuellen Hörgeräte durch integrierte Elektronik					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	2	Miniaturisierungsgrad	2	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	4	Σ: elektrische Integration	8	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	2	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	4	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	0
				red. Prozessschritte	0
Σ: Marktattraktivität	5	EWB berechnet:	9	Σ: Wettbewerbsintensität	3

32. Activity-Tracker					
Miniaturisierung der Activity-Tracker					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	2	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	2
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	0		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	7	Σ: 3D-Druck	3
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	1	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	3,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	3	EWB berechnet:	8	Σ: Wettbewerbsintensität	6

33. Sicherheitsschlüssel					
Schließsystem mit elektronischem Code zur Erhöhung der Sicherheit					
Materialanforderungen	Pt.	Anforderungen an die elektrische Integration	Pt.	Anforderungen an den 3D-Druck	Pt.
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	1	Bauraumgröße	0
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	1		
Σ: Material	3	Σ: elektrische Integration	7	Σ: 3D-Druck	2
Marktattraktivität gew.	Pt.	Entwicklungsbedarf	Pt.	Wettbewerbsintensität	Pt.
Marktgröße	2	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	2	Anf. elektr. Integration / 2	3,5	Individualisierung	0
		Anf. an 3D-Druck / 3	0,8	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	1
Σ: Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	8	Σ: Wettbewerbsintensität	5

<b>34. Sensorverkleidungsteile für Drohnen</b>					
Schutz militärischer Drohnen durch Sensoren bzw. Antennen in der Verkleidung					
<b>Materialanforderungen</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an die elektrische Integration</b>	<b>Pt.</b>	<b>Anforderungen an den 3D-Druck</b>	<b>Pt.</b>
Festigkeit	1	Integrierbarkeit der Komp.	1	Genauigkeit	1
Duktilität	1	Miniaturisierungsgrad	0	Bauraumgröße	2
chem. Beständigkeit	1	elektrischer Widerstand	4	Farbeigenschaften	1
Kälte-/Hitzebeständigkeit	0	Kälte-/Hitzebeständigkeit	2		
$\Sigma$ : Material	3	$\Sigma$ : elektrische Integration	7	$\Sigma$ : 3D-Druck	4
<b>Marktattraktivität gew.</b>	<b>Pt.</b>	<b>Entwicklungsbedarf</b>	<b>Pt.</b>	<b>Wettbewerbsintensität</b>	<b>Pt.</b>
Marktgröße	0	Materialanforderungen / 2	1,5	konv. Herstellung	2
Marge	4	Anf. elektr. Integration / 2	3,5	Individualisierung	1
		Anf. an 3D-Druck / 3	1,3	Ansehen	1
		nicht erfüllte Anf. · 2	2	Production on Demand	1
				red. Prozessschritte	0
$\Sigma$ : Marktattraktivität	4	EWB berechnet:	8	$\Sigma$ : Wettbewerbsintensität	5

## 10.9 Daten und Annahmen für den Herstellungskostenvergleich (vgl. Abschnitt 7.4)

*Tabelle 10-3: Masseverteilung eines 3D-gedruckten Bauteils*

Bindermasse bezogen auf die Pulvermasse beim Druckprozess	7,5 Masse-%
RFG des PMMA-Feststoffes	65 Vol.-%
RFG der Luft/ bzw. nach Infiltrieren RFG des Epoxidharzes	35 Vol.-%

*Tabelle 10-4: Annahmen für die Materialkosten*

3D-Druck		Spritzgießen	
Material	Spezifischer Preis	Material	Spezifischer Preis
PMMA-Pulver	62 €/kg	PMMA-Granulat	3 €/kg
Binder	52 €/kg	Lot	19 €/kg
Epoxidharz	35 €/kg	Kabel	0,6 €/m
Leitkleber	12 €/kg	Klebeband	0,7 €/m
DMS	7,14 €/Stück	DMS	7,14 €/Stück

**Materialkosten pro Stück (vgl. Abschnitt 7.3) für beide Herstellungsverfahren**

3D-Druck		Spritzgießen	
Material	Kosten pro Stück	Material	Kosten pro Stück
PMMA-Pulver	3,14 €	Kunststoff	0,23 €
Binder	0,20 €	Kabel	0,15 €
Epoxidharz	1,69 €	Lot	0,06 €
Leitkleber	1,36 €	Klebeband	0,07 €
DMS	7,14 €	DMS	7,14 €
Summe	13,52 €	Summe	7,65 €

Tabelle 10-5: Eckdaten für die Berechnung der Maschinenstundensätze

Kostenfaktor	Wert
Abschreibungsdauer	10 Jahre
Maschinenlaufzeit	6000 h/a /3-Schicht-Betrieb
Kalk. Zinssatz	8 %
Instandhaltungskosten	5 %
Energiekosten	0,15 kW/h
Leistungsaufnahme	siehe Tabelle 10-6
Raumkosten	30 €/m <sup>2</sup> /a
Platzbedarf	siehe Tabelle 10-6
Techniker-Stundensatz	20 €/h (3170 €/Monat)
Ingenieur-Stundensatz	26 €/h (4454 €/Monat)

Tabelle 10-6: Anlagenwerte für Leistungsaufnahme und Platzbedarf

Maschine	Leistungsaufnahme	Platzbedarf
3D-Drucker	3 kW	35 m <sup>2</sup>
Ofen	2 kW	5 m <sup>2</sup>
Entpackstation	1 kW	15 m <sup>2</sup>
Sandstrahlen	1 kW	15 m <sup>2</sup>
Infiltrationsstation	1 kW	15 m <sup>2</sup>
Reinigungsstation	0,5 kW	10 m <sup>2</sup>

Tabelle 10-7: Annahmen für den Wiederbeschaffungswert, die Produktionszeit und die Bedienzeitfaktoren

Aufgaben	Wiederbeschaffungswert	Zeit	Bedienzeitfaktor
3D-Drucker	600.000 €	wird berechnet	0,1
Ofen	1.000 €	6h/Plattform	0,05
Entpackstation	6.000 €	1 h/Plattform	1
Sandstrahlen	1.500 €	1 min/Stück	1
Infiltrationsstation	8.000 €	6 h/Plattform	0,1
Reinigungsstation	1.000 €	1,5 min/Stück	1
Spritzgießmaschine	125.000 €	30 s/Stück	1
Mont.: DMS-Kleben	1.000 €	10 s/Stück	1
Mont.: Kabel anlöten	1.000 €	25 s/Stück	1
Mont.: Kabel ankleben	1.000 €	20 s/Stück	1

Tabelle 10-8: Bezugswerte des 3D-Druckers VX 1000

Variable	Wert
Plattformgröße (X, Y, Z)	1060 x 600 x 500 mm
Max. Druckgeschwindigkeit	0,4 m/s
Durchschnittliche Druckgeschwindigkeit	0,3 m/s
Druckkopfbreite	450 mm
Schichtdicke	100 µm
Druckkopfüberfahrten pro Schicht	3
Zeit für Schichtgenerierung	14 s
Geschwindigkeit beim Absaugen	60 mm/s
Geschwindigkeit bei Materialabgabe	40 mm/s
Baugeschwindigkeit	36 mm/h bei 300 µm
Wiederbeschaffungswert	ca. 550.000 €
Wiederbeschaffungswert einer vergleichbaren Anlage mit elektrischer Funktionsintegration	ca. 600.000 €

Tabelle 10-9: Ergebnisse der Berechnung der variablen Fertigungskosten

Maschinenstundensätze		Zeiten		Var. Fertigungskosten pro Stück	
MSS <sub>3D-Drucker</sub>	22,20 €/h	T <sub>Bau, 1Teil</sub>	2,34 min	K <sub>3D-Drucker</sub>	0,86 €
MSS <sub>Ofen</sub>	1,36 €/h	T <sub>Ofen</sub>	6 h	K <sub>Ofen</sub>	0,78 €
MSS <sub>Entpacken</sub>	20,42 €/h	T <sub>Entpacken</sub>	1 h	K <sub>Entpacken</sub>	0,13 €
MSS <sub>Strahlen</sub>	20,27 €/h	T <sub>Strahlen, 1Teil</sub>	1 min	K <sub>Strahlen</sub>	0,34 €
MSS <sub>Infiltrieren</sub>	2,48 €/h	T <sub>Infiltrieren</sub>	6 h	K <sub>Infiltrieren</sub>	0,09 €
MSS <sub>Reinigen</sub>	20,16 €/h	T <sub>Reinigen, 1 Teil</sub>	1,5 min	K <sub>Reinigen</sub>	0,50 €
MSS <sub>Spritzguss</sub>	25,82 €/h	T <sub>Spritzguss</sub>	30 s	K <sub>Spritzguss</sub>	0,22 €
MSS <sub>Montage</sub>	20,15 €/h	T <sub>DMS</sub>	10 s	K <sub>Montage</sub>	0,06 €
MSS <sub>Montage</sub>	20,15 €/h	T <sub>Löten</sub>	25 s	K <sub>Montage</sub>	0,14 €
MSS <sub>Montage</sub>	20,15 €/h	T <sub>Kleben</sub>	20 s	K <sub>Montage</sub>	0,11 €



## 11 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) in den Jahren 2010 bis 2016 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Integration von elektrischen Schaltungen beim pulverbettbasierten 3D-Drucken untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

<b>Name</b>	<b>Titel der Studienarbeit</b>	<b>Abgabedatum/ eingeflossen in</b>
Brandt, Sarah	Konzepte zur Verbesserung der mechanischen Materialeigenschaften im 3D-Druck (Semesterarbeit, Technische Universität München)	Januar 2015 Abschnitt 2.5.
Eder, T.	Validierung der vertikalen Leiterbahnen beim 3D-Druckprozess (Bachelorarbeit, Technische Universität München)	Februar 2016 Abschnitt 6.3.2.
Hanöfner, R.	Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Pick-and-Place-Mechanismus für das pulverbettbasierte 3D-Drucken (Diplomarbeit, Technische Universität München)	November 2011 Abschnitt 5.4.2 Abschnitt 6.4.1.1 Abschnitt 6.4.2.
Kurz, B.	Erzeugung dreidimensionaler Leiterbahnen beim 3D-Druck (Bachelorarbeit, Technische Universität München)	April 2014 Abschnitt 4.2.3.2 Abschnitt 4.2.5.
Prager, E.	Entwicklung eines Pick-and-Place-Mechanismus für das pulverbettbasierte 3D-Drucken (Semesterarbeit, Technische Universität München)	Oktober 2011 Abschnitt 4.2.4 Abschnitt 5.4.2.
Schlüter, P.	Potenzialanalyse der elektrischen Funktionsintegration (Bachelorarbeit, Technische Universität München)	November 2014 Abschnitt 7.2 Abschnitt 7.3 Abschnitt 7.4
Twelmeyer, A.	Modellierung des Fluidauftrages beim pulverbettbasierten 3D-Drucken (Diplomarbeit, Technische Universität München)	September 2013 Abschnitt 4.2.3 Abschnitt 10.2.

## Studienarbeiten

---

Veith, M.	Ankontaktierung von elektrischen Komponenten an Leiterbahnen während des 3D-Druckprozesses (Master-Semesterarbeit, Technische Universität München)	Februar 2016 Abschnitt 6.2.
Veith, M.	Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems „Integration elektrischer Komponenten“ (Bachelorarbeit, Technische Universität München)	August 2014 Abschnitt 6.3.1 Abschnitt 6.4.1.2
Weis, L.	Erzeugung 2-dimensionaler Leiterbahnen in 3D-gedruckten Bauteilen (Semesterarbeit, Fachhochschule München)	Mai 2010 Abschnitt 5.3.3 Abschnitt 5.5.