



Technische  
Universität  
Braunschweig

  
Institut für  
Mikrotechnik

Projektarbeit

# Konzept für ein miniaturisiertes generatives Fertigungsverfahren

von Lukas Bommes

Matrikelnr.: 4367361

Technische Universität Braunschweig  
Fakultät für Maschinenbau

Institut für Mikrotechnik

Prüfer: Prof. Dr. Andreas Dietzel  
Betreuer: Dipl.-Ing. Foelke Jürgens

Eingereicht am 18. November 2015

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Lukas Bommes, die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Mittel und Quellen erstellt zu haben.

Braunschweig, 12. Oktober 2015

-----  
(Lukas Bommes)

## Abstract

Ziel der Arbeit ist die Konzeption einer mikrominiaturisierten generativen Fertigungsmaschine durch Anwendung der Konstruktionsmethodik nach VDI-Richtlinie 2221. Es werden zunächst eine Auswahl industriell relevanter Verfahren vorgestellt und unter Abwägung der Vor- und Nachteile die Verfahren Poly-Jet Modeling (PJM), Multi-Jet Modeling (MJM) und Multiphase-Jet Solidification (MJS) für die Miniaturisierung ausgewählt. Nach einer Einführung in die allgemeine Konstruktionsmethodik folgen das Klären der Aufgabenstellung mit der Beschreibung der Gesamtfunktion und die Aufstellung der Anforderungsliste. Die Funktionsstruktur wird durch Zergliedern der Gesamt- in Teilfunktionen aufgestellt und graphisch in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Nachfolgend werden auf Basis einer Literaturrecherche Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen gesucht, diese in morphologischen Kästen zusammengestellt und zu je vier verschiedenen Lösungsvarianten kombiniert. Diese werden einer Bewertung unterzogen und eine Lösungsvariante für die Weiterentwicklung ausgewählt. Als geeignetes Verfahrensprinzip stellt sich hierbei das Poly-Jet Modeling heraus.

The aim of this paper is the development of a concept for a miniaturized additive manufacturing machine through utilization of construction methods after VDI-guideline 2221. First a variety of industrial relevant process principles will be presented and under consideration of their assets and drawbacks the methods Poly-Jet Modeling (PJM), Multi-Jet Modeling (MJM) and Multiphase-Jet Solidification (MJS) will be chosen for downscaling. After a brief introduction to the general construction process the clarification of the task and creation of the requirements list follow. The function structure is being determined by decomposition of the overall function into part-functions and graphically represented in form of a flowchart. Subsequent solution principles will be searched on basis of a literature research, arranged in morphological boxes and combined to each four different principle solutions. Those are being evaluated and one solution principle is being selected for further development. Thereby Poly-Jet Modeling appears to be the most convenient process principle.

Schlüsselwörter: generative Fertigung, additive Fertigung, Serienfertigung, Fertigungstechnik, dreidimensionaler Drucker, Poly-Jet Modeling, Multi-Jet Modeling, Konzept, Entwicklung, Konstruktion, Mikrotechnik, Miniaturisierung, Feinmechanik, Sensor, Aktor



## Projektarbeit

Für Herrn Lukas Bommers, Matrikelnummer: 4367361

### Thema:

Konzeptentwicklung für ein mikromechanisches System zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens

### Hintergrund:

Ziel der Arbeit ist die Erstellung mehrerer Konzepte eines mikrotechnischen Systems zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens unter Verwendung der üblichen Konstruktionsmethodik. Hierzu soll eine geeignete Auswahl bestehender generativer Fertigungsverfahren kurz in ihrer grundlegenden Funktion beschrieben, die einzelnen Funktionseinheiten abstrahiert und anschließend ein Konzept zur Miniaturisierung des jeweiligen Verfahrens entwickelt werden. Dabei liegt der Fokus auf der sinnvollen Auswahl und Kombination mikrotechnischer Systeme (Aktorik, Sensorik, Elektronik) mit dem Ziel, das makroskopische Verfahren in miniaturisierter Form nachzubilden. Die so entwickelten primären Konzepte sollen hinsichtlich verschiedener Kriterien miteinander verglichen und anschließend begründet ein Konzept in Hinblick auf einen späteren Entwurf ausgewählt werden.

Die Arbeit soll zudem deutlich machen, welche neuen Einsatzmöglichkeiten sich aus einer Miniaturisierung erschließen, und das weitere Vorgehen zur Umsetzung sowie dabei möglicherweise auftretende Herausforderungen benennen.

### Arbeitspakete:

Die Arbeit umfasst folgende Teilaufgaben:

1. Beschreibung herkömmlicher generativer Fertigungsverfahren: Funktion und Funktionseinheiten
2. Definition der Anforderungen an mikromechanisches Fertigungsverfahren
3. Mikromechanische Konzeptentwicklung für einige Verfahren aus Punkt 1
4. Ausarbeitung eines ausgewählten Konzepts aus Punkt 2
5. Präsentation der Ergebnisse

Weitere Einzelheiten sind mit der Betreuerin zu besprechen.

Die verwendete Literatur und andere zur Lösung der gestellten Aufgaben verwendeten wissenschaftlichen Hilfsmittel sind lückenlos anzugeben. Das Institut für Mikrotechnik ist berechtigt, die in der studentischen Arbeit enthaltenen Arbeitsergebnisse für Zwecke von Forschung und Lehre uneingeschränkt und unentgeltlich zu nutzen.

Ausgabe der Arbeit:

Abgabe der Arbeit:

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Generative Fertigungsverfahren</b>	<b>9</b>
2.1	Einteilung der Verfahren . . . . .	10
2.2	Herstellungsprozess bei generativen Fertigungsverfahren . . . . .	11
2.3	Verfahrensprinzipien generativer Fertigungsverfahren . . . . .	12
2.3.1	Stereolithographie (SLA) . . . . .	12
2.3.2	Selektives Lasersintern (SLS) . . . . .	14
2.3.3	Fused Deposition Modeling (FDM) . . . . .	16
2.3.4	Layer Laminate Manufacturing (LLM) . . . . .	17
2.3.5	3D-Drucken (3DP) . . . . .	18
2.3.6	Multi-Jet Modeling (MJM) . . . . .	19
2.3.7	Poly-Jet Modeling (PJM) . . . . .	20
2.3.8	Weitere Verfahren . . . . .	21
2.3.8.1	Ballistic Particle Manufacturing (BPM) . . . . .	21
2.3.8.2	Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) . . . . .	21
2.3.8.3	Multiphase-Jet Solidification (MJS) . . . . .	22
2.3.8.4	Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP) . . . . .	22
2.3.8.5	Kaltgasstrahlen . . . . .	22
2.3.8.6	Maskensintern . . . . .	23
2.4	Tabellarischer Vergleich der Verfahrensprinzipien . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Konzeptentwicklung</b>	<b>25</b>
3.1	Auswahl von Fertigungsverfahren für die Miniaturisierung . . . . .	25
3.2	Allgemeine Konstruktionsmethodik . . . . .	27
3.3	Entwicklung der Miniaturisierungskonzepte . . . . .	28
3.3.1	Klärung der Aufgabenstellung . . . . .	28
3.3.2	Aufstellen der Funktionsstruktur . . . . .	30
3.3.2.1	Formulierung des Gesamtproblems . . . . .	34
3.3.2.2	Entwicklung der konkreten Funktionsstruktur . . . . .	34
3.3.3	Erarbeiten der Wirkkonzepte . . . . .	39
3.3.3.1	Suchen von Teillösungen . . . . .	41
3.3.3.2	Kombinieren von Teillösungen . . . . .	48
3.3.4	Bewertung der Lösungen . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>62</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>64</b>
	<b>Anhang</b>	<b>67</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundprinzip der additiven Fertigung . . . . .	9
2.2	Einordnung der generativen Fertigungsverfahren . . . . .	10
2.3	Prozessabfolge bei der generativen Fertigung . . . . .	11
2.4	Verfahrensprinzip der Stereolithographie . . . . .	13
2.5	Verfahrensprinzip des Selektiven Lasersinterns . . . . .	15
2.6	Verfahrensprinzip des Fused Deposition Modeling . . . . .	16
2.7	Verfahrensprinzip des Layer Laminate Manufacturing . . . . .	17
2.8	Verfahrensprinzip des 3D-Druckens . . . . .	18
2.9	Multi-Jet Modeling und Ballistic Particle Manufacturing . . . . .	19
2.10	Verfahrensprinzip des Poly-Jet Modeling . . . . .	20
3.1	Arbeitsfluss beim Konstruieren nach VDI-Richtlinie 2221 . . . . .	29
3.2	Allgemeine Funktionsstruktur einer generativen Fertigungsmaschine . . . . .	36
3.3	Funktionsstruktur eines Druckkopfes mit paralleler Düsenanordnung . . . . .	38

## Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleichstabelle generativer Fertigungsverfahren . . . . .	24
3.1	Anforderungsliste für das miniaturisierte System - Seite 1 . . . . .	31
3.2	Anforderungsliste für das miniaturisierte System - Seite 2 . . . . .	32
3.3	Anforderungsliste für das miniaturisierte System - Seite 3 . . . . .	33
3.4	Kriterien für die Bewertung von Lösungsvarianten in der Konzeptphase . . . . .	52
A.1	Speicherung des Druckwerkstoffes . . . . .	67
A.2	Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes . . . . .	68
A.3	Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinheit . . . . .	69
A.4	Antreiben der Achsen . . . . .	70
A.5	Bauplatzform heizen . . . . .	71

## Abkürzungsverzeichnis

### Generative Fertigungsverfahren

2PP	Zwei-Photonen-Polymerisation
3DP	3D-Drucken
BPM	Ballistic Particle Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
DLP	Digital-Light-Processing
LCVD	Laser Chemical Vapor Deposition
LLM	Layer Laminate Manufacturing
LOM	Layer Object Manufacturing
MJM	Multi-Jet Modeling
MJS	Multiphase-Jet Solidification
PJM	Poly-Jet Modeling
SGC	Solid-Ground-Curing
SLA	Stereolithographie
SLS	Selektives Lasersintern

### Magnetoresistive Effekte

AMR	Anisotroper Magnetoresistiver Effekt
EMR	Extraordinary Magnetoresistance Effekt
GMR	Giant Magnetoresistance, Riesenmagnetowiderstand
TMR	Tunnel Magnetoresistance, magnetischer Tunnelwiderstand
XR	Magnetoresistiver Effekt in magnetischen Materialien

### Sonstiges

AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CPU	Central Processing Unit, zentrale Recheneinheit
CT	Computertomographie, bildgebendes Verfahren in der Radiologie
CVD	Chemical Vapor Deposition, chemische Dünnschichtabscheidung aus der Gasphase



DOF	Degrees of freedom, Freiheitsgrade
FET	Feld-Effekt-Transistor, elektrostatisch gesteuerter Transistor
FGL	Formgedächtnis-Legierung
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LED	Light Emitting Diode, Leuchtdiode
MRT	Magnetresonanztomographie, bildgebendes Verfahren in der medizinischen Diagnostik
NC	Numerical Control, numerische Steuerung von Maschinen
NTC-Thermistor	Negative Temperature Coefficient Thermistor, Heißleiter
PDMS	Polydimethylsiloxan, Werkstoff für die Softlithographie
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential Regler
PLCD	Permanentmagnetic Linear Contactless Displacementsensor, magnetischer Abstandssensor
PTC-Thermistor	Positive Temperature Coefficient Thermistor, Kaltleiter
PWM	Pulsweiten-Modulation, Verfahren zur gepulsten Leistungsstellung
RC-Glied	Schaltungen aus einem Widerstand und einem Kondensator
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
STL	Standard Transformation Language
UV	Ultraviolette Strahlung (10 nm bis 380 nm)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

# 1 Einleitung

Nachdem in den späten 1980ern die Firma 3D Systems ihre ersten generativen Fertigungsmaschinen an die fünf Teilnehmer des SLA-1 Beta-Programms AMP Incorporated, General Motors, Baxter Health Care, Eastman Kodak und Pratt & Whitney – Unternehmen, die damals repräsentativ für die wichtigsten industriellen Sektoren Automobil-, Luftfahrt-, Gesundheits- und Konsumgüterindustrie waren – ausgeliefert hatte, berichteten diese bereits nach wenigen Monaten von immensen Kosteneinsparungen im Design- und Entwicklungsprozess neuer Produkte. [1] Es wurde eine Möglichkeit gefunden, den zeit-, personal- und kostenintensiven konventionellen Prototypenbau zu revolutionieren und darüber hinaus die unternehmensinterne Kommunikation zwischen Designern, Entwicklungs- und Fertigungsingenieuren, dem Management sowie dem Kunden durch Einsatz von Modellen wesentlich zu vereinfachen. Schnell wurden weitere Anwendungspotentiale bei der Herstellung funktioneller Modelle, beispielsweise als Windkanalmodelle oder Modelle zur Überprüfung des Designs und der Prozessfähigkeit eines Produkts, gefunden. Mit der Fertigung von Werkzeugen für den Formenbau eröffnete sich bald darauf ein weiteres großes Anwendungsfeld für die neuartige, generative Technologie, die sich dabei vor allen Dingen dadurch auszeichnet, dass mit ihr Bauteile unabhängig von ihrer geometrischen Komplexität anhand von 3D-CAD-Daten in einem Schritt hergestellt werden können und sie somit zu enormen Einsparungen bei den benötigten Fertigungsressourcen führt. Weiterhin reduzieren sich durch den Einsatz generativer Verfahren das benötigte Fertigungsequipment und damit der für die Fertigung benötigte Platz. Zudem könnten zukünftig durch verteilte endkundennahe Fertigung kostenintensive Marktforschungen und Investitionen in Infrastruktur und Werkzeuge vermieden und der Bedarf an großen Warenhäusern sowie Distributionszentren gesenkt werden. Aufgrund dieses großen Potentials sind bis zum heutigen Tage viele weitere generative Fertigungsverfahren entwickelt worden, die ein breites Anwendungsspektrum in der Automobil- und Luftfahrt-Branche sowie insbesondere in der Medizin gefunden haben. Dort werden additiv hergestellte Bauteile beispielsweise als chirurgische und diagnostische Modelle für die Planung von operativen Eingriffen sowie als individuell anhand von CT- und MRT-Scans eines Patienten gefertigte Prothesen verwendet. Auch das Tissue Engineering, das heißt die Herstellung von organischen Geweben aus lebenden Zellen und Proteinen, mithilfe generativer Fertigungstechnologien ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet. So gibt es bereits Unternehmen, die es sich zum Ziel gemacht haben, zukünftig ganze Organe wie Nieren, Lebern oder sogar Herzen und darüber hinaus Fleisch als Nahrungsmittel generativ herzustellen. [1]

Gegenstand dieser Arbeit soll die Entwicklung eines Konzeptes für eine generative Fertigungsmaschine nach einem bestimmten zuvor begründet ausgewählten existierenden Verfahrensprinzip, allerdings in miniaturisiertem Maßstab, sein. Grund für die Wahl dieses Themas ist die Fülle möglicher Anwendungsgebiete generativer Fertigungsverfahren, die durch eine Miniaturisierung um weitere Anwendungen erweitert wird. So liegen mögliche Anwendungsfelder für eine solche miniaturisierte Technologie bedingt durch die geringe Masse und kleinen Abmessungen des Systems in der Luft- und Raumfahrt, der Integration in mobile Endgeräte wie Smartphones und Tablets sowie in der Möglichkeit, Bauteile an schwer zugänglichen Orten am „point-of-demand“

zu fertigen. Aufgrund der hohen erzielbaren Auflösung durch hochpräzise Mikroantriebe eignet sich ein solcher Mikrodrucker dabei in erster Linie zur Fertigung feinmechanischer Bauteile mit Abmessungen im Millimeter- bis Zentimeter-Bereich und erzielt dabei höhere Auflösungen als bestehende generative Fertigungsanlagen. Leistungsaufnahme und erforderlicher Raum in Fertigungshallen sind dabei gegenüber den aktuellen generativen Fertigungsanlagen erheblich reduziert. Als weitere Anwendung für einen mikrominiaturisierten Drucker sei der Einsatz in OP-Sälen angeführt, denn dort sind besondere Anforderungen an die Keimfreiheit von Instrumenten gestellt, die von großen Fertigungsmaschinen in der Regel nicht erfüllt werden. Ein Mikrosystem hingegen kann einfach gekapselt oder sterilisiert werden. Allgemein betrachtet ist eine Miniaturisierung dabei nach [2] insofern interessant, als dass Materialien wie Silizium und Quarz mit hoher Verfügbarkeit und herausragenden mechanischen Eigenschaften zum Einsatz kommen sowie diverse funktionale Dünnschichtmaterialien mithilfe etablierter mikroelektronischer und mikromechanischer Fertigungsmethoden wie Photolithographie, Ätztechnik und Dünnschichttechnik strukturiert werden können. Durch die parallele Fertigung im Batch-Prozess und den geringen Materialbedarf für ein Mikrosystem kann zudem eine sehr hohe Kostensparnis bei der Fertigung erzielt werden [3]. Die Miniaturisierung bringt darüber hinaus den Vorteil mit sich, dass viele physikalisch-technische Effekte, wie beispielsweise die Elektrostatik, erst in kleinen Maßstäben technisch nutzbar werden und dabei hohe Leistungsdichten und sehr geringe Zeitkonstanten aufweisen. Zudem kann die zu Kontroll- und Steuerungszwecken eingesetzte Mikroelektronik direkt in das System integriert werden, was die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit durch die geringere Anzahl nach außen geführter elektrischer Verbindungen drastisch reduziert. Hierdurch wird auch eine dezentrale Datenvorverarbeitung ermöglicht, die zu einer Verringerung des Datenverkehrs zwischen einzelnen Systemkomponenten mit der zentralen Recheneinheit und damit zu sichereren, schnelleren und zuverlässigeren Systemen führt. Weiterhin ergeben sich durch die Mikroskalierung Vorteile in Hinblick auf die erzielbaren Stellkräfte und Leistungen bei einer sehr geringen Leistungsaufnahme des Gesamtsystems. Das größte Potential liegt jedoch darin, komplexe Anordnungen vieler gleichartiger Strukturen in einem Array zu realisieren. Übertragen auf eine mikroskalierte generative Fertigungsmaschine bedeutet dies die Anordnung einer sehr großen Anzahl von Druckern in einem Verbund. Durch geeignete Verknüpfung der Stoff-, Signal- und Energieflüsse der Einzeldrucker könnte ein intelligentes Netzwerk, ein *Schwarm*, geschaffen werden, in dem Druckaufträge dynamisch je nach Auslastung einzelner Individuen und voraussichtlicher Bearbeitungszeiten für einen Druckauftrag verteilt und massiv parallelisiert abgearbeitet werden, wodurch sich der Bauteildurchsatz erhöht und ein solches Drucker-Array großserientauglich würde. Auch die Verschiebung fertiger Bauteile innerhalb des Drucker-Arrays wäre möglich und würde beispielsweise eine verteilte Fertigung ermöglichen, in der einzelne individuell sehr einfach aufgebaute Drucker, die beispielsweise nur einen Werkstoff verarbeiten können, nur bestimmte Ausprägungen eines Bauteils herstellen. Durch verteilte Fertigung eines Bauteils in vielen verschiedenen dieser individuellen Drucker könnte aber dennoch ein Bauteil aus verschiedenen Werkstoffen mit stofflich gradierten Eigenschaften hergestellt werden. Aufgrund der geringen Kosten für einen solchen Mikrodrucker wäre es auch denkbar, bestimmte Druckprogramme fest in die Steuerelektronik einzuspeichern, sodass ein Drucker nur Bauteile eines bestimmten Typs herstellen kann. Dies ginge vorteilhaft damit einher, dass auf eine aufwendige und zeitintensive Umkonfiguration des Druckers sowie einen externen PC zur Ansteuerung verzichtet werden kann. Weiterhin könnte durch den hochintegrierten Aufbau ein robustes Drucksystem bereitgestellt werden, das „out of the box“ ohne komplizierte

Einstellung, Wartung oder Kalibrierung eingesetzt werden und nach Ablauf der Lebensdauer oder entleertem Vorrat an Druckwerkstoff entsorgt werden kann. Aufgrund der geringen Massen der beweglichen Teile innerhalb des Druckers könnten zudem sehr hohe Vorschubgeschwindigkeiten und -beschleunigungen und damit eine kurze erforderliche Bauzeit erreicht werden. Trotz dieser Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten einer miniaturisierten Fertigungsanlage herrscht aktuell ein Mangel an Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Entwicklung eines derartigen Verfahrens. Es gibt zwar zahlreiche Arbeiten zur Prozessoptimierung generativer Fertigungsverfahren in Hinblick auf kostenoptimierte Massenfertigung, Herstellung bestimmter Strukturen und Bauteile mithilfe generativer Verfahren und Einsatz neuer Werkstoffe sowie Realisierung bestimmter stofflicher Bauteileigenschaften, allerdings existiert eine Forschungslücke in Hinblick auf eine hochintegrierte und stark miniaturisierte Fertigungsmaschine, die an dieser Stelle durch Auffinden eines geeigneten Verfahrensprinzips und Entwicklung eines entwurfsbereiten Konzepts geschlossen werden soll.

Methodisch werden in der vorliegenden Arbeit die Konzeptentwicklung gemäß VDI-Richtlinie 2221 durchgeführt und im Zuge dessen die erforderlichen konzeptionellen Design-Dokumente in Form von Anforderungsliste, Funktionsstruktur und morphologischen Kästen erstellt und ausführlich dokumentiert. Die Lösungsfindung geschieht dabei anhand der Analyse entsprechender Fachliteratur.

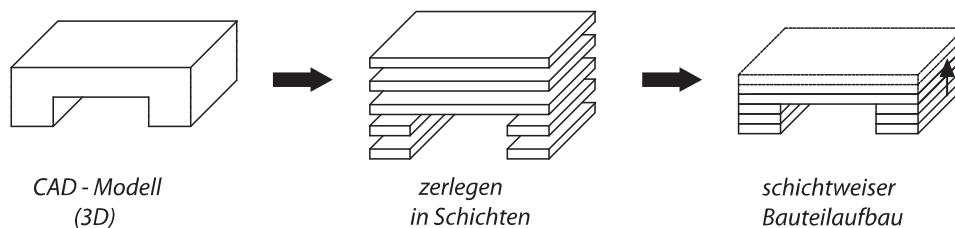
Aufgrund der hohen Komplexität des Gesamtsystems soll der Entwicklungsprozess an dieser Stelle auf die Konzeptfindung beschränkt werden. Eine weiterführende Entwicklung erfordert die Aufteilung des Druckers in Module, die anschließend den Entwurfs- und Ausarbeitungsprozess durchlaufen könnten. Zudem erfolgt in der Arbeit eine Beschränkung der Konzeptentwicklung auf diejenigen Subsysteme, für die keine fertigen Konzepte existieren. So sind beispielsweise Tintenstrahldruckköpfe heutzutage in der Regel mikrominiaturisiert, sodass hierfür kein Miniaturisierungskonzept mehr erstellt werden muss. Innerhalb der so durchgeführten Konzeption können der zukünftige Entwicklungsaufwand abgeschätzt und mögliche Probleme und Risiken in Hinblick auf die weitere Entwicklung erkannt werden.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit wird eine kurze Einführung in die Thematik der generativen Fertigungsverfahren gegeben sowie die einzelnen bestehenden Verfahrensprinzipien unter besonderer Berücksichtigung von Vor- und Nachteilen der einzelnen Verfahren beschrieben. Gegenstand des dritten Kapitels soll zunächst eine begründete Auswahl eines Fertigungsverfahrens für die weitere Entwicklung sein. Danach erfolgt eine Einführung in die allgemeine Konstruktionsmethodik und anschließend die eigentliche Entwicklung des Miniaturisierungskonzepts durch Abarbeiten der konstruktiven Schritte *Klären der Aufgabenstellung*, *Aufstellen der Funktionsstruktur*, *Erarbeiten der Wirkkonzepte* und *Bewertung der Lösungen* erfolgen. Zu guter Letzt erfolgt die Auswahl eines Konzepts für die weitere Entwicklung und abschließend eine Abschätzung der technischen Realisierbarkeit, eine kritische Stellungnahme zur vorliegenden Arbeit sowie ein Ausblick auf die zukünftige Entwicklung.

## 2 Generative Fertigungsverfahren

Im folgenden Kapitel erfolgt eine kurze Einführung in die Thematik der generativen Fertigungsverfahren. Es wird eine Einteilung der Verfahren vorgenommen und der allgemeine Herstellungsprozess bei Verwendung eines generativen Fertigungsverfahrens erläutert. Anschließend wird ein Überblick über die Verfahrensprinzipien einer Auswahl wichtiger generativer Fertigungsverfahren mit besonderem Schwerpunkt auf deren jeweilige Vor- und Nachteile gegeben. In Abschnitt 2.4 werden abschließend die wichtigsten Verfahrensprinzipien in tabellarischer Form dargestellt.

Generative Fertigungsverfahren zeichnen sich nach [4] im Gegensatz zu den subtraktiven Verfahren, bei denen die Formgebung durch Materialabtrag erfolgt, dadurch aus, dass bei ihnen ein Bauteil additiv, das heißt durch Aneinanderfügen von Volumenelementen, erzeugt wird. Dieses Aneinanderfügen geschieht in der Regel wie in Abb. 2.1 gezeigt durch schichtweisen Aufbau aus dem Ausgangsmaterial. Dabei erfolgt die Formgebung durch Strukturierung der Schicht in der horizontalen Ebene und durch Zusammenfügen vieler verschiedener Schichten in vertikaler Richtung. Hierdurch ergibt sich das Problem, dass die Auflösung in vertikaler Richtung durch die endliche Schichtdicke begrenzt ist und das Bauteil dementsprechend in dieser Richtung eine stufenförmige Oberflächenstruktur aufweist. Die Verfestigung des Ausgangsmaterials kann dabei nach [5] durch Aufschmelzen und Erstarren, Verfestigung durch Aktivatoren, Versintern beziehungsweise Verschmelzen, Ausschneiden und Fügen sowie durch Polymerisation erfolgen. Welcher Mechanismus zum Einsatz kommt, hängt hierbei wesentlich von der Art des Ausgangsmaterials ab. Eine Einordnung der generativen Fertigungsverfahren in die Klassifizierung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 kann in die erste Hauptgruppe der Urformverfahren erfolgen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass ein geometrisch bestimmter, fester Körper aus einem formlosen Stoff durch Schaffung des Zusammenhalts gefertigt wird. [4]



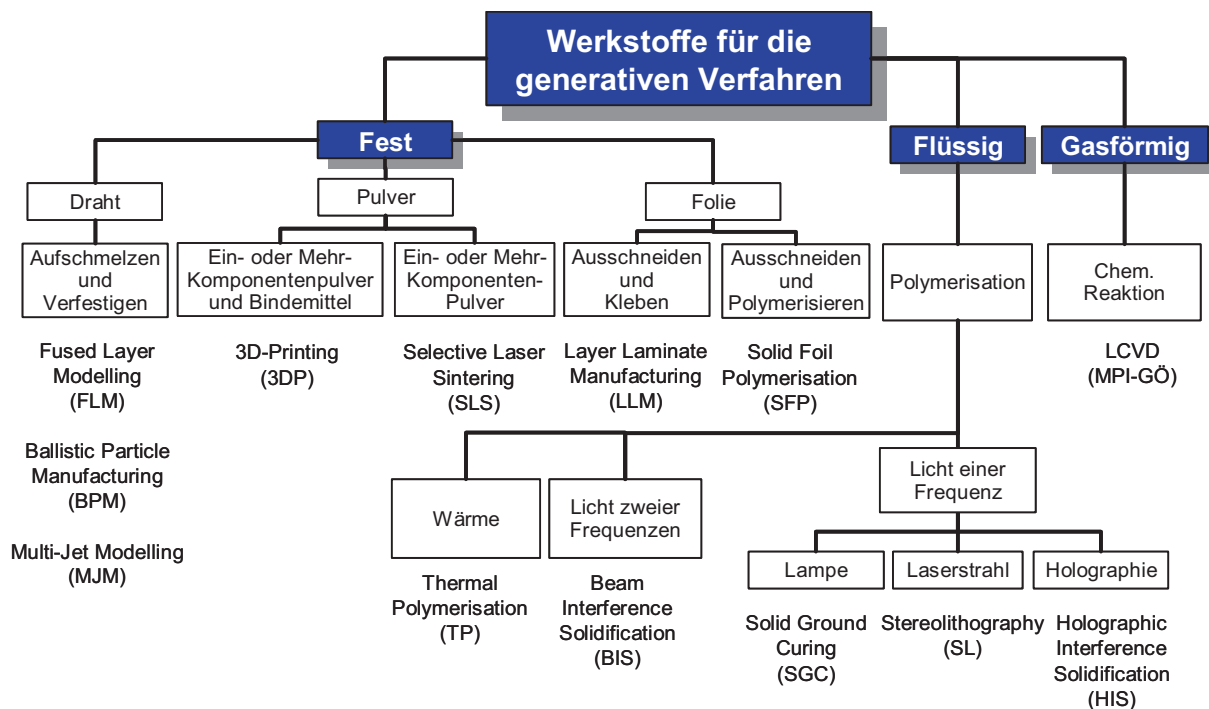
**Abbildung 2.1:** Grundprinzip der additiven Fertigung [4]

Generative Fertigungsverfahren verfügen über eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren. So lassen sich sehr komplexe Geometrien einfach in einem Herstellungsschritt, oft ohne Bedarf einer späteren Nachbearbeitung des Bauteils, erzeugen. Zudem ist die Bauteilorientierung während des Fertigungsprozesses abgesehen von kleineren Einschränkungen bei Verfahren mit Stützstrukturen unerheblich und es können in einem Arbeitsschritt mehrere Bauteile gleichzeitig hergestellt werden. Dies führt, in Kombination mit einer direkten Fertigung anhand von 3D-CAD-Daten und damit Vermeidung von unnötig langen Kommunikationswegen in der Fertigung sowie der fehlenden Notwendigkeit einer NC-Programmierung von Fertigungsma-

schinen, zu einer Verkürzung des Produktentwicklungs- und Herstellungsprozesses. Einhergehend bieten diese Verfahren die Möglichkeit, einzelne Bauteile sehr wirtschaftlich zu fertigen. Ein weiterer Vorteil der generativen Fertigungsverfahren liegt in der großen Vielfalt der verarbeitbaren Werkstoffe und je nach Verfahren der Realisierbarkeit verschiedener, teils gradierter Stoffeigenschaften. Nachteilig wirkt sich aus, dass die meisten Verfahren zurzeit vergleichsweise langsam arbeiten und somit für eine Fertigung in Großserien oft nicht in Betracht kommen. Zudem sind je nach Verfahren die erreichbaren Oberflächenqualitäten und Bauteilfestigkeiten meist schlechter als bei konventionellen Fertigungsverfahren. [1]

## 2.1 Einteilung der Verfahren

Eine Unterteilung der generativen Fertigungsverfahren kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Oft in der Literatur zu finden ist die Einteilung nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials. So kann wie in Abb. 2.2 zu sehen, eine Unterscheidung zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Ausgangsstoffen gemacht werden, wobei die festen Ausgangsstoffe in Form eines Drahtes wie beispielsweise beim Fused Deposition Modeling, als Pulver wie beim 3D-Drucken oder Selektiven Lasersintern und als Folie wie beim Layer Lamine Manufacturing vorliegen können. Der Materialverfestigung liegen dabei oben genannte Wirkprinzipien zu Grunde.



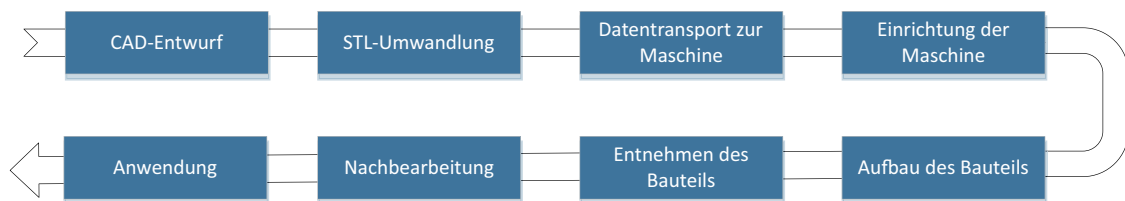
**Abbildung 2.2:** Einordnung der generativen Fertigungsverfahren nach Aggregatzustand des Ausgangsmaterials [6]

Eine weitere Einteilung kann nach dem Verwendungszweck der hergestellten Produkte erfolgen. So unterscheidet man nach [6] das *Rapid Prototyping (RP)*, *Rapid Tooling (RT)*, *Rapid Manufacturing (RM)* und *Additive Manufacturing (AM)*. Rapid Prototyping umfasst dabei die schnelle

und flexible Herstellung von Modellen und Prototypen, die sich jedoch oft durch den verwendeten Werkstoff und die Oberflächenqualität vom Serienprodukt unterscheiden. Typische mittels Rapid Prototyping hergestellte Modellarten sind Anschauungsmodelle, die der geometrischen Überprüfung des Produktentwurfes dienen, Funktionsmodelle zur Überprüfung funktionaler Anforderungen, Prozessmodelle, die im Rahmen der Planung und Auslegung von Prozessen als Referenzmodelle fungieren, sowie Kommunikationsmodelle, die während der Produktentwicklung zum unternehmensinternen Informationsaustausch dienen. Im Gegensatz zum Rapid Prototyping beinhaltet das Rapid Tooling alle generativen Fertigungsverfahren, die zur Herstellung von Prototypen für Vorrichtungen, Werkzeuge und Formen für anschließende Fertigungsprozesse eingesetzt werden. Rapid Manufacturing und Additive Manufacturing beschreiben die generative Herstellung von Produkten mit Seriencharakter, wobei Rapid Manufacturing sich auf kundenspezifische Endprodukte in Einzel- oder Kleinserien beschränkt und das Additive Manufacturing die Fertigung in Großserien umfasst.

## 2.2 Herstellungsprozess bei generativen Fertigungsverfahren

Der Herstellungsprozess vom Bauteilentwurf bis hin zum fertigen Bauteil ist nach [1] in acht Verfahrensschritte untergliedert, die in Abb. 2.3 dargestellt sind und im Folgenden kurz erläutert werden.



**Abbildung 2.3:** Prozessabfolge bei der generativen Fertigung

Zu Beginn des Herstellungsprozesses wird ein dreidimensionales Software-Modell des zu erzeugenden Bauteils erstellt. Dieses wird entweder mittels einer CAD-Software modelliert oder aus einem realen Bauteil durch zusätzliche Einrichtungen wie Laserscanning und optische Abtastung abgeleitet. Die Daten müssen die Bauteilgeometrie eindeutig beschreiben, sodass das Bauteil in der Regel als Volumenkörper abgespeichert wird. Alternative Darstellungen sind Drahtgitter- und Flächenmodelle, die jedoch unter Umständen keine eindeutige Beschreibung der Geometrie sicherstellen.

An den Erstellungsprozess der beschreibenden Geometriedaten schließt sich die Umwandlung in ein Datenformat an, das eine möglichst gute Austauschbarkeit der Daten zwischen verschiedenen Fertigungssystemen aufweist. Zum Einsatz kommt hier meist die Standard Transformation Language (STL), die eine einheitliche Schnittstelle für die Datenübertragung zwischen einem CAD-Modell und weiterer am Fertigungsprozess beteiligter Software darstellt. Der Volumenkörper wird hierbei durch eine Vielzahl von Dreiecken approximiert. Materialparameter können hingegen nicht gespeichert werden.

Nach der Umwandlung in das STL-Datenformat werden die Daten an die Fertigungsmaschine übertragen, wo je nach Maschine weitere Manipulationen, wie beispielsweise die Skalierung auf

eine bestimmte Größe und die Festlegung der Orientierung sowie Position des Bauteils in der Fertigungsmaschine, vorgenommen werden.

Bevor der eigentliche Aufbauprozess beginnen kann, muss eine weitere Einrichtung der Maschine erfolgen. Hier werden systemspezifische Parameter wie beispielsweise Vorschub- und Extrusionengeschwindigkeiten, Temperaturen von Heizelementen, Layerdicken, Layer-Strukturen, Füllichten und Nullpunkte der Maschinenachsen festgelegt.

Daran anschließend kann der eigentliche Aufbauprozess des Bauteils erfolgen. Dieser kann größtenteils automatisch und ohne manuelle Überwachung oder Steuerung erfolgen. Etwaige Probleme während des Aufbauprozesses werden je nach System automatisch dokumentiert oder gemeldet, sodass sie behoben und der Prozess fortgesetzt werden können.

Nachdem der Aufbauprozess abgeschlossen ist, erfolgt die Entnahme des Bauteils aus der Maschine. Dabei muss durch Einrichtungen an der Maschine sichergestellt werden, dass die Temperaturen innerhalb der Maschine entsprechend gering sind und der Anwender nicht durch bewegte Teile gefährdet wird.

Je nach Verfahren und Einsatzzweck des hergestellten Bauteils erfolgt nach dem Aufbauprozess eine Reinigung und Nachbearbeitung der Oberfläche. Dies kann eine spanende Bearbeitung, wie beispielsweise Schleifen zur Verringerung der Oberflächenrauigkeit, oder eine Beschichtung mit dem Ziel der Realisierung einer bestimmten Funktion, optischen Wirkung oder als Korrosionsschutz einschließen.

Hiernach ist der Herstellungsprozess des Bauteils abgeschlossen und es kann die Nutzung des Bauteils entsprechend des in der Konzeption festgelegten Anforderungsprofils erfolgen. Unter Umständen ist jedoch auch noch eine Reihe weiterer Prozessschritte erforderlich, beispielsweise der Montage mehrerer Bauteile zu einem Gesamtprodukt.

### 2.3 Verfahrensprinzipien generativer Fertigungsverfahren

In diesem Abschnitt sollen die Prinzipien einiger wichtiger generativer Fertigungsverfahren erläutert werden. Dabei soll der Schwerpunkt auf der Betrachtung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren nach [7], [8], [6] und [4] liegen, sodass anschließend eine begründete Entscheidung für eine kleine Auswahl an Verfahren erfolgen kann, für die im weiteren Verlauf der Arbeit Konzepte zur Miniaturisierung erstellt werden sollen. Aufgrund ihrer Relevanz in der industriellen Fertigung und weiten Verbreitung auf dem Markt werden die Verfahren Stereolithographie (SLA), Selektives Lasersintern (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM), Layer Laminate Manufacturing (LLM), 3D-Drucken (3DP), Multi-Jet Modeling (MJM) und das Poly-Jet Modeling (PJM) eingehend betrachtet. Schließlich sollen noch einige weitere, aber weniger wichtige Verfahren in aller Kürze beschrieben werden.

#### 2.3.1 Stereolithographie (SLA)

Die Stereolithographie, die 1987 erstmals zum Einsatz kam und somit das älteste der generativen Fertigungsverfahren darstellt, basiert auf der Verfestigung eines flüssigen, nicht oder nur gering vernetzten photoaktiven Monomers mittels UV-Laserlicht. Dieses Monomer kann ein Epoxidharz, Acrylat oder Elastomer sein. Wie in Abb. 2.4 gezeigt, wird das Bauteil auf einer in vertikaler Richtung verfahrbaren Plattform, die in das Monomerbad eintaucht, schichtweise aufgebaut. Um ein Bauteil zu fertigen, wird die Bauplattform zunächst soweit angehoben, dass sie von einer



dünnen Monomerschicht mit einer Schichtdicke von 0,05 mm bis 0,1 mm bedeckt wird [8]. Ein Rakel wird über diese dünne Schicht gezogen und stellt so eine konstante Schichtdicke und einen gleichmäßigen Auftrag des flüssigen Monomers sicher. Anschließend wird der Fokuspunkt des UV-Lasers mithilfe einer Optik innerhalb der flüssigen Monomerschicht fokussiert und in lateraler Richtung zeilenweise und entsprechend der zu erzeugenden Geometrie der Schicht umgelenkt. An den belichteten Stellen setzt eine Polymerisationsreaktion ein und es kommt lokal zu einer Vernetzung der Monomere, sodass ein festes Polymer entsteht. Dieser Vorgang wird für jede Schicht wiederholt, wobei die Eindringtiefe des Lasers größer als die Schichtdicke ist. Somit wird eine Verbindung der einzelnen Schichten untereinander ermöglicht. Bei der Herstellung von überhängenden Geometrien sind Stützstrukturen vorzusehen, da das verfestigte Polymer andernfalls aufgrund seiner im Gegensatz zum flüssigen Ausgangswerkstoff höheren Dichte absinken würde und es so zu einer Verformung des Bauteils während der Fertigung käme. Diese Restriktion ist bei der Orientierung des Bauteils im Bauraum während des Aufbauprozesses zu berücksichtigen. Nach Fertigstellung des Bauteils wird die Plattform aus dem Bad herausgefahren, sodass eine Entnahme erfolgen kann. Anschließend wird das Bauteil durch nachträgliche Belichtung mit UV-Licht vollständig vernetzt und erhält erst hier seine endgültigen Stoffeigenschaften.

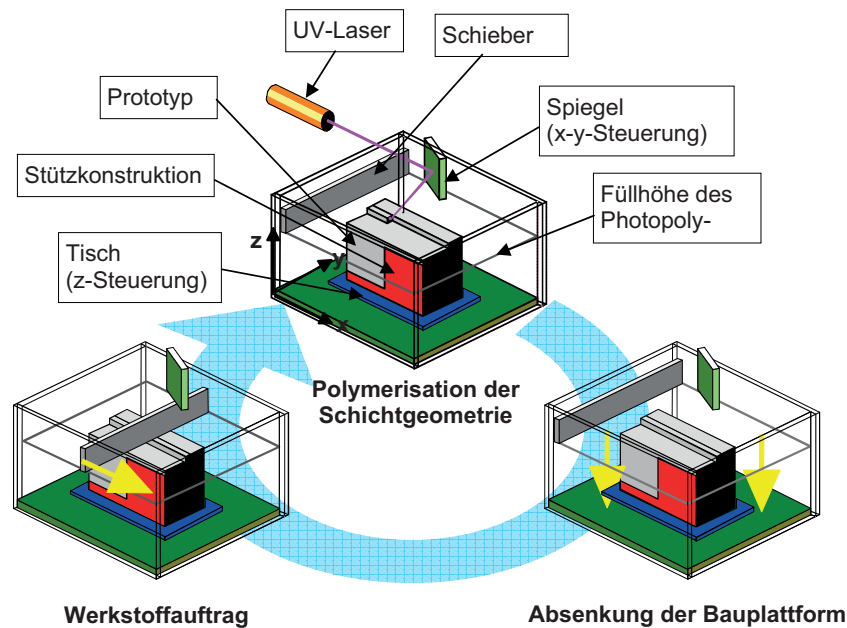


Abbildung 2.4: Verfahrensprinzip der Stereolithographie [6]

Weitere Verfahrensvarianten der Stereolithographie sind das Digital-Light-Processing (DLP) und das Solid-Ground-Curing (SGC). Bei beiden Verfahren erfolgt die Belichtung einer gesamten Schicht nicht punktuell, sondern flächig, wodurch diese Verfahren erheblich schneller als die klassische Stereolithographie arbeiten. Beim SGC wird hierzu für jede Schicht über elektrostatische Aufladung und Auftrag eines Toners eine Maske erzeugt und das photoaktive Ausgangsmaterial durch Belichtung mittels einer UV-Lampe verfestigt [9]. Das Digital-Light-Processing verwendet im Gegensatz dazu ein Mikrospiegelarray zur gezielten Projektion des digitalen Bildes der jeweiligen Schicht mittels UV-Licht auf die zu verfestigende Monomerschicht [10].

Die Stereolithographie ist das derzeit genaueste Verfahren, die Schichtdicke ist lediglich durch

die Benetzbarkeit der darunterliegenden Schicht mit dem flüssigen Monomer und die Auflösung durch den Durchmesser des Fokuspunktes des Lasers begrenzt. Das Verfahren zeichnet sich darüber hinaus durch eine sehr große Designfreiheit bei den zu erstellenden Bauteilen aus, da nahezu beliebig komplexe Geometrien, auch mit inneren Hohlräumen, gefertigt werden können. Zudem eignet sich das Verfahren für die Herstellung von Mikrostrukturen und zeichnet sich gerade bei den Verfahrensvarianten mit flächiger Belichtung durch eine hohe Baugeschwindigkeit aus. Während des Herstellungsprozesses ist es darüber hinaus möglich, andere Bauteile wie beispielsweise Lager, Wellen oder Achsen in Kavitäten einzulegen. [7]

Ein großer Nachteil der Stereolithographie ist die Beschränkung der nutzbaren Werkstoffe auf photoaktive Monomere. Dies führt aufgrund der geringen thermischen und mechanischen Beständigkeit sowie schlechten Alterungsbeständigkeit der Ausgangsmaterialien zu beschränkten Einsatzmöglichkeiten der hergestellten Bauteile. Hierdurch ist auch eine Verarbeitung mehrerer verschiedener Werkstoffe in einem Herstellungsprozess unmöglich und zudem können keine Bauteile mit gradierten Stoffeigenschaften realisiert werden. In Abhängigkeit vom verwendeten Monomer kommt es darüber hinaus zu unterschiedlich starker Schrumpfung des Materials bei der Polymerisation. Dem muss durch eine entsprechende Gestaltung des Bauteils entgegengewirkt werden. Weitere entscheidende Nachteile der Stereolithographie liegen in der Zweistufigkeit des Prozesses bedingt durch die erforderliche nachträgliche Aushärtung sowie die aufwändige Nachbearbeitung der Oberflächen. So ist zunächst eine Reinigung mit Lösungsmitteln erforderlich, die Oberfläche muss nachbehandelt und die Stützstrukturen manuell entfernt werden. Darüber hinaus sind die Kosten für das Ausgangsmaterial bei diesem Verfahren vergleichsweise hoch. [7]

### 2.3.2 Selektives Lasersintern (SLS)

Beim Selektiven Lasersintern, das seit 1992 genutzt wird, wird das Bauteil durch schichtweises, lokales Aufschmelzen einzelner Partikel eines in Pulverform vorliegenden Ausgangsmaterials mittels eines fokussierten Laser- oder Elektronenstrahls aufgebaut. Als Werkstoffe können hierbei metallische und keramische Pulver, Kunststoffe sowie Wachse und Formsande zum Einsatz kommen. Abb. 2.5 zeigt schematisch den Aufbau einer Anlage für das Selektive Lasersintern. Zunächst wird die in vertikaler Richtung verfahrbare Bauplattform um eine Schichtdicke von 30  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$  bei Kunststoffpulvern beziehungsweise 100  $\mu\text{m}$  bei metallischen Pulvern abgesenkt und über eine Pulvertransportwalze eine Schicht Pulver aus einem Vorratsbehälter entnommen, auf die Bauplattform aufgetragen und dabei leicht verdichtet. Über die gezielte Umlenkung des Fokuspunktes des Lasers wird das Material anschließend selektiv aufgeschmolzen und eine neue Schicht durch Verbindung der Partikel untereinander sowie mit der darunterliegenden bereits verfestigten Schicht gebildet. Dies wird unter sukzessivem Absenken der Bauplattform solange wiederholt bis das gesamte Bauteil fertiggestellt ist. Je nach Pulvermaterial wird zudem der gesamte Bauraum auf eine konstante Prozesstemperatur knapp unterhalb der Schmelztemperatur des jeweiligen Materials aufgeheizt, sodass die zum Aufschmelzen des Pulvers benötigte Energie sehr gering ist und dementsprechend kleinere Laserleitungen erforderlich sind. [4]

Bei der Verwendung metallischer Pulver wird das Verfahren unterteilt in das *indirekte Selektive Lasersintern* und das *direkte Selektive Lasersintern*. Beim indirekten Selektiven Lasersintern ist das metallische Pulver von einer thermoplastischen Kunststoffschicht ummantelt, die durch den Laser aufgeschmolzen wird. Um den endgültigen Zusammenhalt zu schaffen, ist hierbei eine aufwändige thermische Nachbehandlung in einem Ofenprozess erforderlich. Im Gegensatz

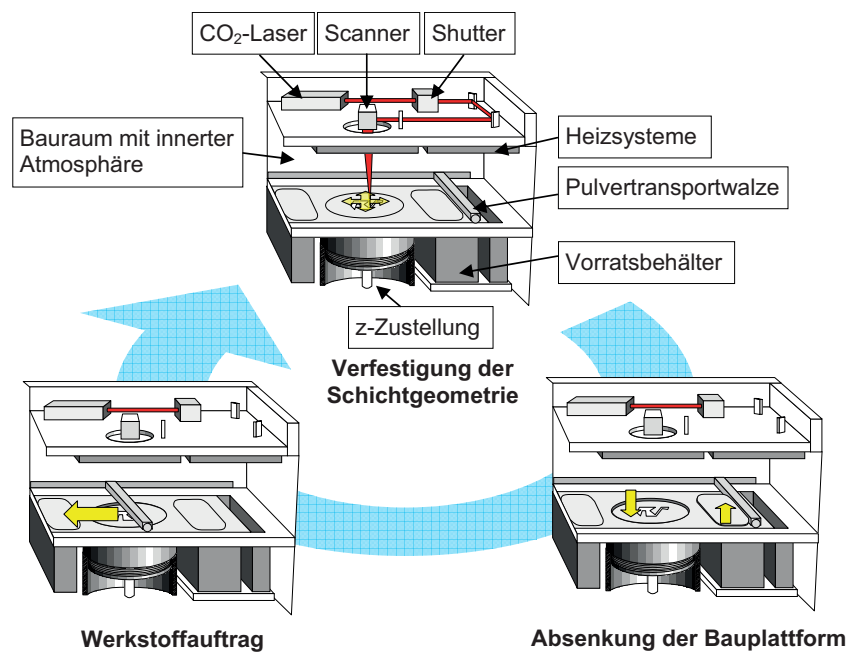


Abbildung 2.5: Verfahrensprinzip des Selektiven Lasersinterns [6]

dazu wird beim direkten Selektiven Lasersintern das gesamte Pulverkorn durch den Laser aufgeschmolzen und so auf direktem Wege der Zusammenhalt geschaffen. Letzteres Verfahren erfordert jedoch höhere Laserleistungen.

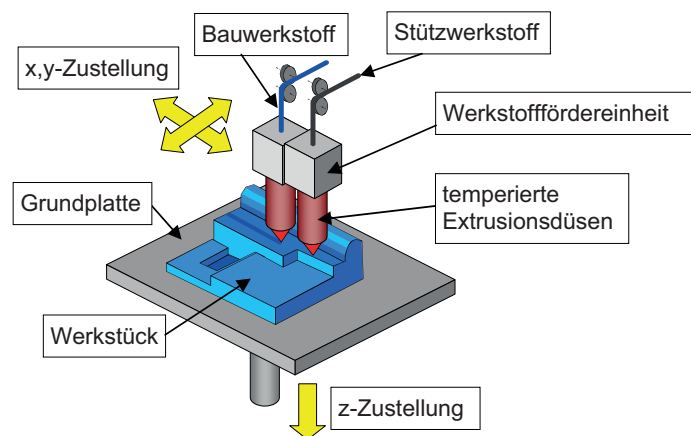
Das Selektive Lasersintern zeichnet sich durch das große Spektrum der einsetzbaren Pulverwerkstoffe, vergleichsweise geringe Materialkosten und einen im Gegensatz zur Stereolithographie einstufigen Herstellungsprozess ohne Erfordernis einer Nachvernetzung aus. Die Genauigkeit des Verfahrens ist sehr gut und wird durch die Größe sowie die Homogenität der Pulverpartikel und den Strahldurchmesser des Lasers beeinflusst. Aufgrund der dauerhaften Unterstützung der erzeugten Struktur durch das Pulver sind darüber hinaus keine Stützstrukturen erforderlich. Weitere Vorteile des Selektiven Lasersinterns liegen in der hohen mechanischen und thermischen Festigkeit der erzeugten Bauteile sowie in der Herstellbarkeit beweglicher Strukturen, wie beispielsweise Gelenke und Gewinde in einem Prozessschritt, und damit einer Verringerung der Teileanzahl und zusätzlicher nachfolgender Fügeprozesse. Nicht versintertes Pulver ist nach einer Aufbereitung erneut einsetzbar. [7]

Nachteile des Selektiven Lasersinterns sind die langen Aufheiz- und Abkühlzeiten der Maschine, hohe Anschaffungskosten der Anlagen sowie die Gefahr der Erzeugung poröser Strukturen, starker Schrumpfung des Materials beim Verflüssigen und eine geringe Bauteildichte bei nicht optimalen Prozessparametern. Die Reinigung der Bauteile ist aufgrund der Anhaftung leicht angesinterten Materials in der Nähe der Bauteiloberfläche aufwändig beziehungsweise bei inneren Hohlräumen nicht möglich und erfordert eine hohe Präzision. Zudem ist die Oberflächenqualität bedingt durch die Körnung des Ausgangsmaterials im Vergleich zu anderen Verfahren gering, es können je nach Werkstoff beim Aufschmelzen gesundheitsschädliche Gase entstehen und die Aufbaugeschwindigkeit ist aufgrund unterschiedlicher Absorptions- und Wärmeleitfähigkeiten stark vom verwendeten Pulverwerkstoff abhängig. Bei Verwendung metallischer Pulver wirken sich beim direkten Selektiven Lasersintern die hohe erforderliche Prozesstemperatur und beim

indirekten Selektiven Lasersintern die aufwändige thermische Nachbehandlung nachteilig aus. [7]

### 2.3.3 Fused Deposition Modeling (FDM)

Beim Fused Deposition Modeling wird das Ausgangsmaterial, wie in Abb. 2.6 gezeigt, mithilfe einer Extrusionskinematik als strangförmiges Halbzeug in eine beheizte Düse geführt. Dort wird das Material, welches in der Regel Feingusswachs oder ein thermoplastischer Kunststoff wie ABS, Polyester oder Polycarbonat ist, aufgeschmolzen und anschließend mithilfe eines Plotter-Mechanismus auf der Bauplattform abgelegt. Dabei erkaltet und verfestigt das Material und wird stoffschlüssig mit der darunterliegenden Schicht verbunden. Überhänge bis zu einem Winkel von  $45^\circ$  lassen sich aufgrund der hohen Schmelzviskosität und schnellen Erstarrung des Materials ohne Stützstrukturen herstellen. Sollen größere Überhänge realisiert werden, ist der Einsatz von Stützstrukturen erforderlich. Hierzu verfügt die Anlage über eine weitere Extrusionsdüse, die ein spezielles Stützmaterial aufträgt. Dieses ist entweder sprödhart, verfügt über einen niedrigeren Schmelzpunkt als das eigentliche Baumaterial oder ist wasserlöslich. So kann eine mechanische, thermische oder durch Lösung in Wasser erzielte Entfernung des Stützmaterials erfolgen. Grundsätzlich ließen sich durch Einsatz einer höheren Anzahl an Extrusionsdüsen mehrere verschiedene Werkstoffe parallel verarbeiten, dies ist jedoch nicht wirtschaftlich. Alternativ kann der Werkstoff durch Zufuhr eines anderen Halbzeugs in die Extrusionsdüse auch während des Herstellungsprozesses variiert werden, was jedoch mit nicht unerheblichen Umrüstzeiten verbunden ist. [4]



**Abbildung 2.6:** Verfahrensprinzip des Fused Deposition Modeling [6]

Der große Vorteil des Fused Deposition Modeling liegt in den günstigen Anschaffungskosten kleinerer Maschinen. Diese werden unter anderem im Open-Source-Projekt RepRap entwickelt. So sind mittlerweile eine Vielzahl verschiedener Druckertypen, Hardware-Komponenten und Druckersoftware zu sehr geringen Kosten erhältlich. Die geringen Maße einer nach diesem Verfahren arbeitenden Maschine sowie das unkomplizierte Handling des Ausgangsmaterials machen dieses Verfahren attraktiv für den heimischen Einsatz bei Privatanwendern. Zudem kann der erforderliche Nachbearbeitungsaufwand bei Einsatz thermisch oder durch Lösung in Wasser entfernbaren Stützstrukturen durch automatisierte Zusatzmodule deutlich verringert werden.

Der entscheidende Nachteil des Fused Deposition Modeling liegt in der geringen Maßgenauigkeit der hergestellten Bauteile bedingt durch die Größe der Extrusionsraupen. Diese führt auch

dazu, dass eine Fertigung sehr feiner Strukturen nicht möglich ist und die Oberflächenqualität im Vergleich zu anderen Verfahren eher schlecht ausfällt. Dadurch ist eine aufwändige Nachbearbeitung der Oberfläche erforderlich. Zudem sind die Materialkosten vergleichsweise hoch und das Spektrum an verarbeitbaren Ausgangswerkstoffen fällt eher klein aus. Weiterhin sind, wie oben beschrieben, Überhänge nur schwer realisierbar und erfordern den Einsatz von Stützstrukturen. Zu guter Letzt weist das hergestellte Bauteil ein stark anisotropes Werkstoffverhalten auf. So ist die Festigkeit innerhalb einer Schicht durchaus als vergleichsweise hoch zu bezeichnen, in Richtung des Schichtaufbaus kann es jedoch zur Ablösung der einzelnen Schichten voneinander kommen, sodass die Bauteilfestigkeit hier sehr gering ist. [7]

### 2.3.4 Layer Laminate Manufacturing (LLM)

Beim Layer Laminate Manufacturing, welches oft auch als Laminated Object Manufacturing (LOM) bezeichnet wird, findet die Herstellung eines Bauteils, wie in Abb. 2.7 gezeigt, durch schichtweisen Aufbau aus einem Folienwerkstoff statt. Dies können Papier- oder Kunststofffolien, aber auch metallische Bleche oder auf einem Folienträger aufgebrachte keramische Werkstoffe sein. Auf die Folie wird während des Verfahrens zunächst mithilfe einer Ploteinheit Klebstoff aufgetragen, sofern dieser nicht bereits auf dem Halbzeug vorhanden ist, und anschließend die Folie mithilfe einer beheizten Walze auf die darunterliegende Schicht angedrückt und verklebt. Nun wird mithilfe eines Lasers, Messers oder Wasserstrahls die Kontur der Schicht in die oberste Folie geschnitten und zusätzlich das umgebende Material so segmentiert, dass das Bauteil nach Beendigung des Fertigungsprozesses einfach durch Herausbrechen dieser Bereiche entformt werden kann.

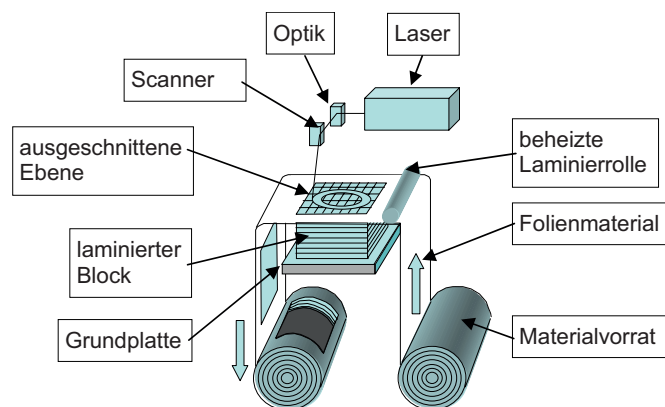


Abbildung 2.7: Verfahrensprinzip des Layer Laminate Manufacturing [6]

Das Layer Laminate Manufacturing zeichnet sich durch den Vorteil aus, dass keine separaten Stützstrukturen erforderlich sind, sondern diese Funktion während des Bauprozesses vom umgebenden Material übernommen wird. Es ist aufgrund der unproblematischen Materialien ohne weitere Arbeitsschutzmaßnahmen fast überall durchführbar und bietet eine weitgehend von der Bauteilgröße unabhängige Baugeschwindigkeit, sodass dieses Verfahren gerade bei großen Bauteilen vergleichsweise schnell ist. Zudem kommt es aufgrund der Verklebung der einzelnen Schichten nur zu sehr geringen inneren Spannungen und damit sind die nach diesem Verfahren hergestellten Bauteile nahezu verzugsfrei. Des Weiteren sind die Materialkosten vergleichsweise gering. Eine Nachbearbeitung der Werkstücke aus Papierwerkstoffen kann wie bei Holz erfolgen.

Nachteilig ist die geringe Ausnutzung des Folienwerkstoffs. Es entstehen viele Abfälle und das Restmaterial ist in der Regel nicht wiederverwendbar und je nach Bauteilgeometrie nur sehr schwer entfernbar. Weiterhin problematisch ist, ähnlich wie beim Fused Deposition Modeling, die Anisotropie der Bauteileigenschaften. So ist die Festigkeit innerhalb der Schichtebene recht hoch, senkrecht dazu, das heißt in Baurichtung, aber nur sehr gering. Zudem können in vertikaler Richtung nur bedingt dünne Wandstärken realisiert werden und eine Einstellung gradiert Stoffeigenschaften ist zwar theoretisch durch Austausch des Folienmaterials während des Bauprozesses möglich, allerdings mit großem Aufwand verbunden und daher nicht wirtschaftlich umsetzbar. [7]

### 2.3.5 3D-Drucken (3DP)

Das 3D-Drucken ist wie das Selektive Lasersintern ein pulverbasiertes Verfahren. Die schichtweise, lokale Verfestigung des Pulvers beruht beim 3D-Drucken jedoch nicht auf einem An- oder Aufschmelzen des Pulvers mittels eines Lasers, sondern es wird mithilfe eines Piezo-Druckkopfes ein Bindemittel in das Pulver eingebracht, dieses somit zu einer festen Schicht verbunden und der Zusammenhalt mit der darunterliegenden Schicht hergestellt. Abb. 2.8 zeigt schematisch eine entsprechende Prozessanlage. Auch beim 3D-Druck wird das Druckbett jeweils um die Schichtdicke abgesenkt und mithilfe einer Transportwalze das Pulver aus einem Vorratsbehälter auf die Druckfläche ausgetragen und leicht verdichtet. Als Pulvermaterialien kommen keramische und metallische Pulver, Stärke und Gips sowie Zellulose und Verbunde dieser einzelnen Pulver zum Einsatz.

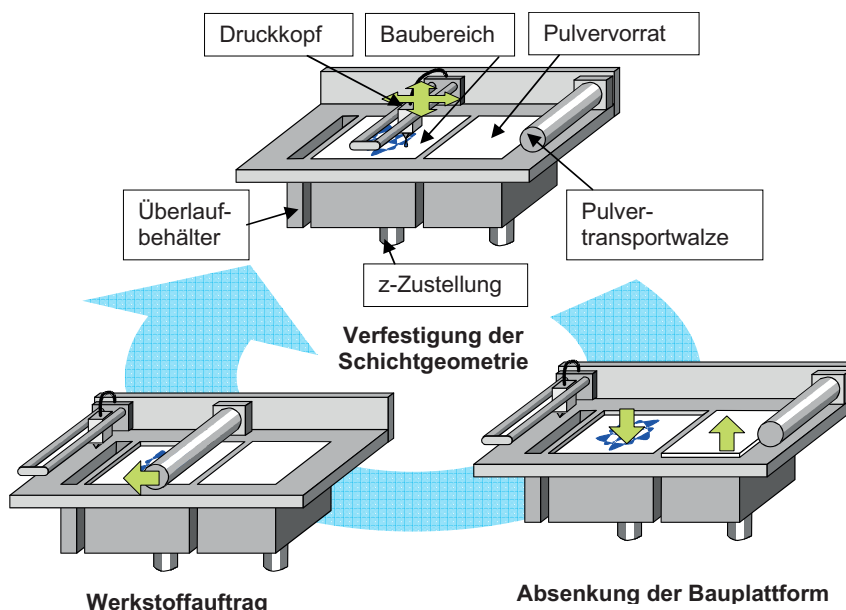


Abbildung 2.8: Verfahrensprinzip des 3D-Druckens [6]

Durch die Nutzung technologisch ausgereifter Tintenstrahl-Druckköpfe mit einer großen Anzahl parallel angeordneter Piezo-Druckdüsen kann eine große Menge Bindemittel simultan ausgetragen werden. Dementsprechend ist das 3D-Drucken das derzeit schnellste generative Fertigungsverfahren auf dem Markt. Diese Parallelisierung des Verfahrens erlaubt zudem die

Verwendung verschiedener Bindemittel in einem Bauprozess, wodurch bestimmte physikalische Eigenschaften des Bauteils, wie beispielsweise die Farbe, gezielt eingestellt werden können. Die mechanischen Eigenschaften des Bauteils sind jedoch in erster Linie vom verwendeten Pulverwerkstoff abhängig. Weiterhin werden beim 3D-Drucken keine Stützstrukturen benötigt, da das umgebende Pulver überhängende Strukturen während des Bauprozesses ausreichend unterstützt. Andere Vorteile sind die Wiederverwendbarkeit nicht verarbeiteten Pulvers, der große Bauraum erhältlicher Maschinen, die hohe Werkstoffvariabilität und die geringe Komplexität der benötigten Ausrüstung, die einen unkomplizierten Einsatz unter Büro-Bedingungen ermöglicht.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist die geringe Festigkeit und hohe Porosität der hergestellten Bauteile. Sollen Funktionsteile realisiert werden, ist je nach Pulvermaterial ein nachfolgender Prozessschritt erforderlich. Dies kann eine Infiltration mit einem Epoxidharz, das Austreiben des Bindemittels oder einen Sinterprozess einschließen. Zudem ist die Oberflächenqualität bedingt durch die Körnung des Ausgangsmaterials vergleichsweise schlecht, was ebenfalls eine aufwändige Nachbearbeitung erfordert. [7]

### 2.3.6 Multi-Jet Modeling (MJM)

Das Multi-Jet Modeling entspricht in Hinblick auf das Wirkprinzip dem Fused Deposition Modeling. Es wird ein zunächst in fester Form vorliegender thermoplastischer Ausgangswerkstoff aufgeschmolzen, extrudiert und anschließend schichtweise auf der Bauplatzform beziehungsweise auf den bereits ausgetragenen Schichten abgelegt und erstarrt dabei. Wie in Abb. 2.9a zu erkennen, liegt der wesentliche Unterschied beim Multi-Jet Modeling darin, dass der Druckkopf nicht nur aus einer Extruderdüse, sondern aus einer großen Anzahl nebeneinander angeordneter Düsen, die unter Umständen die gesamte Breite des Bauraumes einnehmen, besteht. Hierdurch kann in der gleichen Zeit ein viel größeres Materialvolumen gedruckt werden, wodurch das Multi-Jet Modeling erheblich schneller als das Fused Deposition Modeling arbeitet. Die Baugeschwindigkeit ist darüber hinaus durch den parallelen Materialaustrag nahezu unabhängig von der Größe oder Anzahl der zu fertigenden Modelle im Bauraum. Zudem ist die Auflösung beim Multi-Jet Modeling sehr viel größer als beim Fused Deposition Modeling, sodass auch feine Strukturen mit großer Präzision und einer guten Oberflächenqualität herstellbar sind. Des Weiteren ist die Einstellung von Eigenschaftsgradienten im Bauteil durch die gezielte Austragung unterschiedlicher Materialien über die einzelnen Druckdüsen möglich. [6]

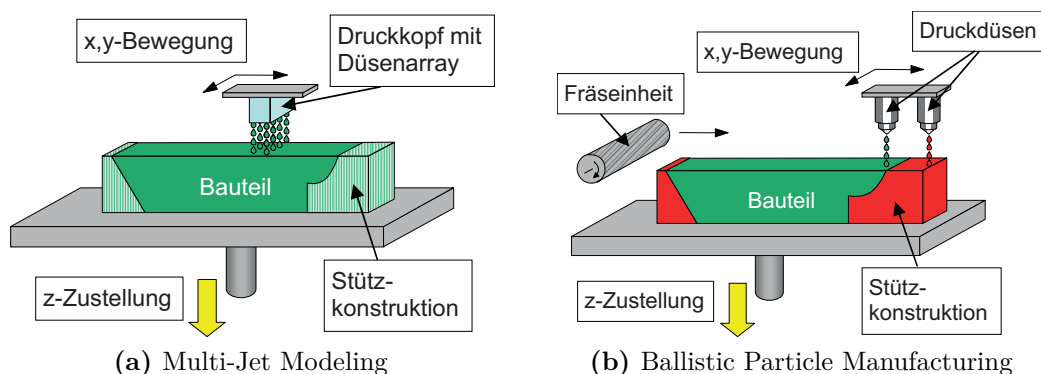


Abbildung 2.9: Prinzipien des Multi-Jet Modeling und des Ballistic Particle Manufacturing [6]



Nachteilig wirkt sich die Notwendigkeit von Stützkonstruktionen aus, die eine Nachbearbeitung in einem zweiten Prozessschritt erforderlich machen. Durch Verwendung eines Materials mit niedrigerem Schmelzpunkt als der des Baumaterials, das nach dem Bauprozess in einem Ofen geschmolzen wird, kann der Nachbearbeitungsaufwand jedoch in Grenzen gehalten werden. Außerdem ungünstig ist bei diesem Verfahren, ähnlich wie beim Fused Deposition Modeling, die Beschränkung der nutzbaren Werkstoffe auf thermoplastische Kunststoffe und Wachse.

Abschließend sei erwähnt, dass an vielen Stellen der Begriff des Multi-Jet Modeling mit dem in Abschnitt 2.3.7 erläuterten Poly-Jet Modeling gleichgesetzt wird. Die beiden Verfahren unterscheiden sich jedoch maßgeblich in den verwendeten Werkstoffen und dem Wirkprinzip der Materialverfestigung und damit Schichterzeugung.

### 2.3.7 Poly-Jet Modeling (PJM)

Das Poly-Jet Modeling ähnelt dem Multi-Jet Modeling in der Hinsicht, dass ein paralleler Materialaustrag über einen Tintenstrahl-Druckkopf mit einer großen Zahl nebeneinander angeordneter Drückdüsen, die die gesamte Breite des Bauraumes einnehmen können, stattfindet [11]. Jedoch kommt beim Poly-Jet Modeling ein photoaktives Monomer zum Einsatz, das nach dem Auftragen einer Schicht sofort durch eine Belichtung mit UV-Licht ausgehärtet wird. Die dabei zugrundeliegende chemische Reaktion entspricht derjenigen, die bei der Stereolithographie stattfindet. Abb. 2.10 zeigt die prinzipielle Funktionsweise des Poly-Jet Modeling.

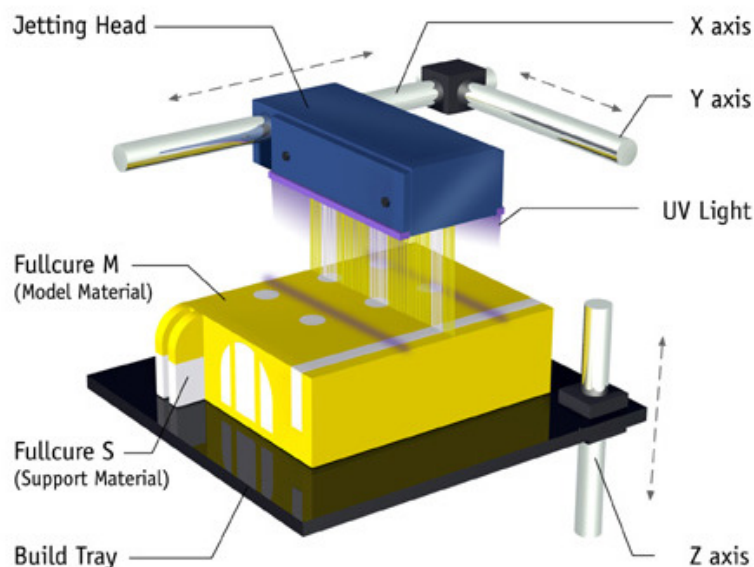


Abbildung 2.10: Verfahrensprinzip des Poly-Jet Modeling (objectplot.de)

Bedingt durch die Anordnung der Düsen in einem Array mit sehr geringem Düsenabstand und eine Schichtdicke von nur  $16\ \mu\text{m}$  sind sehr hohe Auflösungen und damit die Herstellung feinsten Strukturen bei gleichzeitig sehr hoher Oberflächenqualität möglich. Dieses Verfahren erzielt neben der Stereolithographie die höchsten Maßgenauigkeiten aller generativer Fertigungsverfahren mit Abweichungen von lediglich  $\pm 0,1\%$  in alle Richtungen. Dadurch sind komplexe Bauteilgeometrien mit dünnen Wandstärken von  $34\ \mu\text{m}$  in x- und y-Richtung sowie  $32\ \mu\text{m}$  in



z-Richtung herstellbar. Der parallele Werkstoffaustrag führt genau wie beim Multi-Jet Modeling zu einer, von der Größe des Bauteils und der Bauteilanzahl im Bauraum nahezu unabhängigen, sehr hohen Baugeschwindigkeit. Alleinstellungsmerkmal des Poly-Jet Modeling ist die Simulation einer großen Anzahl unterschiedlicher realer Materialien durch Kombination einiger weniger Druckmaterialien. So können hitzebeständige, transparente, gummielastische und bioverträgliche Materialien und unterschiedliche Polymere mit verschiedenen Festigkeits- und anderen physikalischen Eigenschaften nachgebildet werden [12]. Zudem können durch gezielte Zuführung unterschiedlicher Druckmaterialien über den Druckkopf die Stoffeigenschaften innerhalb eines Bauteils gradiert werden und es ist ein Drucken mehrerer Bauteile aus verschiedenen Materialien in einem Bauprozess möglich. Eine nachträgliche Aushärtung des Materials, wie bei der Stereolithographie, ist nicht erforderlich.

Nachteile des Poly-Jet Modeling liegen in der geringen erzielbaren mechanischen Festigkeit der Bauteile sowie der schlechten Alterungsbeständigkeit der photoaktiven Bauwerkstoffe. Zudem müssen in einem Nachfolgeprozess die bei diesem Verfahren erforderlichen Stützkonstruktionen entfernt und das Bauteil gereinigt werden. Ungünstig sind außerdem die, im Vergleich zu den pulverbasierten Verfahren, wie 3D-Drucken oder Selektivem Lasersintern, um bis zu Faktor vier höheren Materialkosten. [7]

### 2.3.8 Weitere Verfahren

In diesem Abschnitt soll in aller Kürze auf einige weitere generative Fertigungsverfahren eingegangen werden. Diese Verfahren sind dabei nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Sie sind in der Praxis selten anzutreffen und besitzen daher eine geringere Relevanz als die oben beschriebenen Fertigungsverfahren.

#### 2.3.8.1 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

Das Ballistic Particle Manufacturing ähnelt dem Multi-Jet Modeling. So wird auch hier ein thermoplastischer Kunststoff oder ein Wachs mittels eines Tintenstrahl-Druckkopfes, der über mehrere nebeneinanderliegende Düsen verfügt, ausgetragen. Anders als beim Multi-Jet Modeling wird der Werkstoff jedoch nicht nach Bedarf, sondern mit einem konstanten Volumenstrom ausgetragen. Das führt je nach Vorschubgeschwindigkeit lokal zu unterschiedlichen Schichtdicken. Um dennoch eine konstante Schichtdicke und damit planare Bauteiloberfläche zu erzielen, verfügt die Anlage über eine zusätzliche Fräseinheit, die jede neu aufgetragene Schicht planfräst. Eine solche Anlage ist in Abb. 2.9b dargestellt. [6]

#### 2.3.8.2 Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD)

Die Laser Chemical Vapor Deposition ist ein in der Mikrotechnik und biomedizinischen Technik eingesetztes Verfahren zur Erzeugung feinsten dreidimensionaler Strukturen im Bereich von 5  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$ . Dabei befindet sich im Bauraum ein Gemisch aus Gasen, bei deren Reaktion sich festes Aluminiumoxid abscheidet. Die für die chemische Reaktion erforderliche Aktivierungsenergie wird mithilfe zweier sich kreuzender Laserstrahlen zugeführt, wobei die Energiedichte nur genau am Kreuzungspunkt beider Strahlen hoch genug ist, um die Reaktion ablaufen zu lassen. Somit kann gezielt eine dreidimensionale Struktur aufgebaut werden. Stützstrukturen sind bei diesem Verfahren aufgrund der geringen Größe der erzeugten Strukturen nicht erforderlich. Bei den

erzeugten Geometrien besteht die einzige Beschränkung darin, dass eine Zugänglichkeit der zu bearbeitenden Stelle für beide Laser gegeben sein muss. Hinterschnitte in z-Richtung sind aus diesem Grund mit diesem Verfahren nicht herstellbar. [6]

### 2.3.8.3 Multiphase-Jet Solidification (MJS)

Bei der Multiphase-Jet Solidification wird ganz ähnlich wie beim Fused Deposition Modeling der Werkstoff aufgeschmolzen und durch eine Extrusionsdüse ausgetragen. Der Unterschied liegt darin, dass bei der Multiphase-Jet Solidification kein strangförmiges Material extrudiert, sondern ein formloses Ausgangsmaterial durch einen Kolben mit Druck beaufschlagt und so durch die Düse gepresst wird. Als Werkstoffe kommen hierbei hauptsächlich hochviskose Stoffe und polymerummantelte Keramik- und Metallpulver zum Einsatz, die angeschmolzen und so zu einem Grünling verarbeitet werden. Die endgültigen Stoffeigenschaften werden in einem nachfolgenden Entbinderungs- und Sinterprozess eingestellt. Der Einsatz von Wachsen und thermoplastischen Kunststoffen ist jedoch ebenfalls möglich. [6]

### 2.3.8.4 Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP)

Die Zwei-Photonen-Polymerisation basiert ähnlich wie die Stereolithographie auf einer Verfestigung eines unvernetzt vorliegenden Monomers durch Laserbestrahlung. Hierbei kommen als Ausgangsmaterialien ebenfalls Photolacke auf Acrylatbasis zum Einsatz. Der Unterschied liegt jedoch darin, dass bei der Zwei-Photonen-Polymerisation ein Femtosekundenlaser mit einer Wellenlänge von etwa 800 nm, das heißt im nahen Infrarot-Bereich, zum Einsatz kommt. Aufgrund der hohen Energiedichte der Laserstrahlung, das heißt einer sehr hohen Photonendichte, kommt es innerhalb des bestrahlten Materials zur Zwei-Photonen-Absorption, also einer Anregung der Moleküle durch mehrere Photonen gleichzeitig. Nur dadurch ist eine Vernetzungsreaktion möglich, ein einzelnes Photon stellt nicht die hierzu benötigte Energie bereit. Die Vernetzungsreaktion ist lokal auf den Fokuspunkt des Lasers beschränkt, sodass durch Veränderung des Fokus beliebige dreidimensionale Strukturen in das Grundmaterial geschrieben werden können. Durch Auswaschen der nichtvernetzten Bereiche werden die Strukturen anschließend freigestellt. [13]

Der große Vorteil der Zwei-Photonen-Polymerisation ist die hohe erzielbare Auflösung von 100 nm [14], die durch die große Leistungsdichte und damit auftretende nichtlineare Brechung im Grundmaterial erklärt werden kann. Daher kommt dieses Verfahren hauptsächlich in der Mikro- und Nanotechnik zum Einsatz.

### 2.3.8.5 Kaltgasstrahlen

Beim Kaltgasstrahlen werden pulverförmige Partikel aus metallischen Legierungen oder Metall-Keramik-Verbunden mithilfe eines Gasstrahls auf 500 m/s bis 1500 m/s beschleunigt und beim Aufprall auf eine Oberfläche plastisch verformt sowie verschmolzen, was zur Bildung einer gleichmäßigen Schicht führt. Bei diesem Prozess wird, anders als bei den thermischen Spritzverfahren, denen er sehr ähnelt, keine zusätzliche Wärme in den Prozess eingebracht, sodass keine thermische Beeinflussung des Bauteils und nur geringe Eigenspannungen in der erzeugten Schicht auftreten. Das Verfahren wird in Kombination mit einer konventionellen kartesischen Kinematik zum schichtweisen Aufbau dreidimensionaler Bauteile genutzt. [6]

### 2.3.8.6 Maskensintern

Das Verfahren des Maskensinterns dient zur Verarbeitung von Kunststoffpulvern, metallischen oder keramischen Pulvern. Der Pulverauftrag aus einem Vorratsbehälter auf die Baufläche erfolgt dabei wie beim Selektiven Lasersintern oder 3D-Drucken über eine Pulvertransportwalze. Für jede Schicht wird ein Maskenträger elektrostatisch aufgeladen und ein Toner aufgetragen. Anschließend erfolgt durch diese Maske die Belichtung des Pulvers mit einer Infrarot-Strahlquelle, die das Pulver an den nicht durch die Maske verdeckten Bereichen aufschmilzt. Somit liegt nach dem Erstarren eine feste Schicht vor, die mit der darunterliegenden Schicht verbunden ist. Aufgrund des flächigen Energieeintrags arbeitet dieses Verfahren sehr schnell. [8]

## 2.4 Tabellarischer Vergleich der Verfahrensprinzipien

Abschließend soll ein Rundumschlag über die wichtigsten generativen Fertigungsverfahren aus Abschnitt 2.3 gegeben werden und ein einfacher Vergleich zwischen den Verfahrensprinzipien ermöglicht werden. Dazu zeigt Tabelle 2.1 in übersichtlicher Form die charakteristischen Merkmale der wichtigsten Verfahrensprinzipien. Es werden dort erreichbare Genauigkeiten, minimale Wandstärken, typische Schichtdicken und die realisierbare Bauteilkomplexität der unterschiedlichen Verfahrensprinzipien ebenso miteinander verglichen wie mögliche verwendbare Druckwerkstoffe, die Realisierbarkeit gradierter Bauteileigenschaften und Verarbeitbarkeit verschiedener Bauwerkstoffe in einem Prozess. Aber auch die mechanische und thermische Festigkeit der Bauteile, die Baugeschwindigkeit, erforderliche Nachbearbeitungsschritte, Material- und Anlagenkosten sowie die Erfordernis von Stützstrukturen gehen in den Vergleich mit ein. Ebenfalls berücksichtigt werden die Komplexität der Prozesskinematik, die Handhabung der Druckwerkstoffe und das zugrundeliegende Prinzip der Materialverfestigung.

## 2 Generative Fertigungsverfahren

**Tabelle 2.1:** Vergleichstabelle generativer Fertigungsverfahren

Verfahren	SLA	2PP	SLS	FDI	LLM	3DP	MJM	PJM	MIS
Auflösung, Wandstärken	sehr hoch 0,075 mm ± 0,013 mm (begrenzt durch Fokusbereich) [7]	extrem hoch (bis 100 nm) [37]	gering 0,15 mm, Wanddicken 40 µm bis 0,5 mm (abhängig von Pulver und Laserdurchmesser) [4]	Hobbydrucker 0,1 mm professionell 0,0125 mm [33]	keine dünnen Wandstärken in z-Richtung (> 2mm), Toleranz DIN ISO 2768 mittel [32]	hoch 600 x 540 dpi → 4,2 µm [30]	450 dpi → 5,6 µm [34]	34 µm Wandstärke in z-Richtung, 32 µm Wandstärke in z-Richtung, Maßgenauigkeit ± 0,1% [4]	0,2 mm [31]
typische Schichtdicke	0,05 mm bis 0,1 mm [6]	1 µm [37]	Metalle: 200 µm Kunststoffe 30 µm bis 100 µm [6]	0,025 mm bis 1,25 mm [29]	abhängig von Folendicke 80 µm bis 150 µm [32]	60 µm [28]	16 µm bis 35 µm [39]	16 µm [7]	0,025 mm bis 1,25 mm [29]
Oberflächenqualität	sehr hoch	sehr hoch	gering	sehr gering	mittel	gering	sehr hoch	sehr hoch	mittel
realisierbare Bauteilkomplexität	sehr hoch	sehr hoch, beliebige 3D-Strukturen	hoch, Hohlräume schwer zu reinigen, bewegliche Strukturen herstellbar	sehr hoch, aber minimale Wandstärke von Düsen-durchmesser abhängig	mittel, keine Hinterscheidungen	hoch, Hohlräume schwer zu reinigen, bewegliche Strukturen herstellbar	sehr hoch, feinste Strukturen herstellbar, bewegliche Strukturen herstellbar	sehr hoch, feinste Strukturen herstellbar, bewegliche Strukturen herstellbar	sehr hoch, aber minimale Wandstärke von Düsen-durchmesser abhängig
verwendbare Druckwerkstoffe	photoaktive Monomere (Acryharze, Epoxidharze, Vinyletherharze)	photoaktive Monomere (Acrylate, Epoxidharze)	thermoplastische, metallische und keramische Pulver, Wachs (Partikelgröße: 10 µm bis 150 µm)	Fengusschwache, Polyester, Polycarbonat, ABS (als Draht mit 1,75 mm oder 3 mm Durchmesser)	Papier, Kunststoffrollen, metallische Bleche, keramische Stoffe auf Folenträger	keramische und metallische Pulver, Stärke, Gips, Polyvinylalkohol	Feingusswachs, Polyester, Polycarbonat, ABS (als formlose Stoff vorliegend, z.B. Granulat)	photoaktive Monomere (Acryharze, Epoxidharze, Vinyletherharze)	polymerumtantele Keramik- und Metallpulver, Wachs, thermoplastische Kunststoffe
Realisierbarkeit gradierter Eigenschaften	nicht möglich	nicht möglich	kaum möglich, nur Porosität gradierbar	kaum möglich, nur innerhalb einer Schicht durch Werkstoffwechsel	nicht möglich	möglich durch Variation des eingespritzten Binders	möglich durch parallelen Austrag verschiedener Druckwerkstoffe	möglich, Simulation diverser Werkstoffe durch Kombination von Druckwerkstoffen	kaum möglich, nur innerhalb einer Schicht durch Werkstoffwechsel
Verarbeitung mehrerer Werkstoffe in einem Prozess	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich (mehrere Extruder)	nicht möglich	nicht möglich, aber Farben variabel (z.B. 390.000 Farben [30])	möglich (ähnlich wie beim Tintenstrahldruck verschiedene Tinten druckbar)	möglich (ähnlich wie beim Tintenstrahldruck verschiedene Tinten druckbar)	möglich (mehrere Extruder)
mech./therm. Festigkeit der Bauteile und Alterungsbeständigkeit	gering	gering	nach Nachbearbeitung sehr hoch	sehr gering in z-Richtung (Ablosen der Schichten), hoch in Druckebene	sehr gering in z-Richtung (Ablosen der Schichten), hoch in Druckebene	sehr gering, nach Nachbearbeitung hoch	mittel	gering, aber spezielle hitzebeständige Werkstoffe druckbar	nach Nachbearbeitung sehr hoch
Baugeschwindigkeit	gering bei Laserbelichtung, hoch (20 mm/h in z-Richtung) bei flächiger Belichtung	hoch (bis 5 m/s Vorschubgeschwindigkeit) [37]	hoch (12 mm/h bis 20 mm/h), je nach Pulverwerkstoff bis 150 m/s Laserablenkgeschwindigkeit [38]	mittel (abhängig von Schichtdicke), ca. 50 mm/s Vorschubgeschwindigkeit [33]	gering (2 mm/h bis 4 mm/h), unabhängig von Bauteilgröße [32]	hoch (28 mm/h in z-Richtung) durch Einsatz von Tintenstrahlröhrenkopien [30]	mittel (6,5 mm/h in z-Richtung, aber nahezu unabhängig von der Bauteilgröße) [35]	hoch, nahezu unabhängig von der Bauteilgröße	mittel (abhängig von Schichtdicke), ca. 50 mm/s Vorschubgeschwindigkeit [33]
erforderliche Nachbearbeitungsschritte	Nachvernetzung durch Belichtung, Entfernen von Stützstrukturen	Auswaschen nicht belichteter Bereiche	langames Abkühlen, Entfernen anhaftenden Pulvers (aufwändig), Sinterprozess (indirektes SLS)	Entfernen von Stützstrukturen (thermisch, durch Lösung in Wasser)	Ausbrechen des Bauteils aus umgebendem Material, ansonsten wie Holz bearbeitbar	Infiltration mit Harz, Sintern, Ausstreifen des Binders, Reinigung der Oberfläche	Entfernen von Stützstrukturen (thermisch, durch Lösung in Wasser)	Entfernen von Stützstrukturen (thermisch, durch Lösung in Wasser), Reinigen des Bauteils Sinterprozess	Entfernen von Stützstrukturen (thermisch, durch Lösung in Wasser), Reinigen des Bauteils Sinterprozess
Materialkosten	hoch	hoch	vergleichsweise gering	hoch (Faktor 4 teurer als Pulver bei SLS) [7]	sehr gering	vergleichsweise gering, 20 U.S.-Cent pro cm <sup>3</sup> [35]	hoch (Faktor 4 teurer als Pulver bei SLS) [7]	hoch (Faktor 4 teurer als Pulver bei SLS)	hoch (Faktor 4 teurer als Pulver bei SLS)
Stützstrukturen erforderlich	ja	nein	ja, bei Überhängen mit Winkeln über 45°	nein, umgebendes Material stützt	nein, umgebendes Material stützt	nein, umgebendes Pulver stützt	ja	ja	ja
Komplexität der Prozesskinematik	mittel (Laseroptik, z-Achse)	gering (Laseroptik)	mittel (Laseroptik, z-Achse, Transportwalze)	hoch (x-, y-, z-Achse, mechanischer Extruder)	hoch (Laseroptik, Plotter für Kleber, Förderwalzen)	mittel (Achse für Druckkopf, z-Achse, Transportwalze)	gering (Achse für Druckkopf, z-Achse)	gering (Achse für Druckkopf, z-Achse)	mittel (x-, y-, z-Achse)
Handhabung der Druckwerkstoffe	einfach (flüssig bei RT)	einfach	schwierig (Pulver)	einfach (fester Strang auf Spule)	einfach (feste Folie auf Rolle)	schwierig (Pulver)	schwierig (fester, formloser Thermoplast, Aufschmelzen vor Transport nötig)	schwierig (fester, formloser Thermoplast, Aufschmelzen vor Transport nötig)	schwierig (fester, formloser Thermoplast, Aufschmelzen vor Transport nötig)
Anlagen und Anlagekosten	EOS 150.000 € bis 900.000 € [35]	k.A.	3D Systems Pro 180.000 USD bis 600.000 USD [35]	Hobbydrucker ab 500 € Stratasys Fortus 900mc 400.000 USD [35]	Helisys LOM 1015plus, Helisys LOM 2030, 65.000 € [32]	Z-Corporation ZPrinter 19.000 € [35]	3D Systems PROJET 3500 60.000 USD bis 90.000 USD [35]	USD 350	k.A.
Verfestigungsprinzip	Polymerisation durch Laserlicht (Nd:YAG, 325 nm)	Polymerisation mit Femtosekundenlaser (800 nm)	Aufschmelzen, Verbinden und Erstarren von Pulverpartikeln mit Festkörper-, Faser- oder CO <sub>2</sub> -Laser	Aufschmelzen, Verbinden und Erhalten einer extrudierten Materialauflage	Verkleben einzelner Folien und Zuschneiden mittels Laser, Messer oder Heißfrakt	Eintrag eines Binders in Pulver, anschließendes Tränken mit Harz	Austrag eines Thermoplasten durch einen Tintenstrahlröhrenkopf, anschließendes Erkalten	Austrag durch Tintenstrahl-druckkopf, Polymerisation durch UV-Licht	Aufschmelzen, Ablegen und Erkalten eines verflüssigten Thermoplasten

## 3 Konzeptentwicklung

Im folgenden Kapitel soll zunächst begründet eine Auswahl aus einigen der in Abschnitt 2.3 beschriebenen generativen Fertigungsverfahren in Hinblick auf eine Eignung zur Miniaturisierung getroffen werden. Anschließend werden unter Berücksichtigung der gängigen Konstruktionsmethodik Konzepte für die Miniaturisierung der zuvor ausgewählten generativen Fertigungsverfahren erstellt. Dazu werden zunächst möglichst allgemein die Anforderungen an den miniaturisierten Drucker erfasst und eine detaillierte Analyse der Funktionsstrukturen bestehender generativer Fertigungsverfahren durchgeführt. Auf dieser Basis werden anschließend die Miniaturisierungskonzepte für die einzelnen ausgewählten Verfahren entwickelt. Vor der Durchführung des Konstruktionsprozesses soll jedoch zunächst eine kurze Einführung in die allgemeine Konstruktionsmethodik nach [15] und [16] erfolgen, damit die im Folgenden angewandte Strategie bei der Konzeptentwicklung deutlich wird.

### 3.1 Auswahl von Fertigungsverfahren für die Miniaturisierung

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Vor- und Nachteile soll nun eine kleine Auswahl an generativen Fertigungsverfahrensprinzipien getroffen werden, für die im weiteren Verlauf der Arbeit ein Konzept zur Miniaturisierung einer entsprechenden Fertigungsmaschine entwickelt wird. Zusätzlich zu den bereits genannten Eigenschaften der großskaligen Verfahrensvarianten kommen nun Vergleichsaspekte wie der erforderliche Bauraum von Teilmodulen der Maschine, Komplexität der erforderlichen Kinematik, Handhabbarkeit der Druckwerkstoffe in kleinen Maßstäben und bereits zur Verfügung stehende miniaturisierte Teilsysteme, wie beispielsweise der Druckkopf, zum Tragen. Anhand dieser drei Aspekte sowie unter Berücksichtigung der bereits betrachteten Eigenschaften soll nun die Eignung der genannten Verfahrensprinzipien für die Miniaturisierung bewertet werden. Somit erfolgt eine ganzheitliche Betrachtung unter Beachtung von Aspekten wie erreichbare minimale Schichtdicken, Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten, Herstellbarkeit beliebig komplexer Geometrien und beweglicher Teile, Werkstoffvariabilität und Gradierbarkeit stofflicher Bauteileigenschaften, erzielbare mechanische und thermische Festigkeit, Baugeschwindigkeit, Anzahl erforderlicher Nachbearbeitungsschritte wie Reinigung, Nachvernetzen und Entfernen der Stützstrukturen, Materialkosten, Beherrschbarkeit des Prozesses und Erfordernis von Stützstrukturen.

Aufgrund des erforderlichen Bauraums scheidet zunächst einmal sämtliche Verfahren aus, die auf leistungsstarke Gas-, Excimer- oder Festkörperlaser angewiesen sind. Darunter fallen die Stereolithographie, die Zwei-Photonenpolymerisation, das Selektive Lasersintern und die Laser Chemical Vapor Deposition, die zusätzlich aufgrund der schwierigen Handhabung der Prozessgase für eine Miniaturisierung nicht in Frage kommen. Der Pulverwerkstoff beim Selektiven Lasersintern und beim 3D-Drucken ließe sich zwar generell ohne allzugroße Probleme handhaben, erfordert jedoch zusätzliche Einrichtungen zum Verfestigen und Austragen auf die Druckplattform in Form einer Pulvertransportwalze sowie einer geeigneten Anordnung der Vorratsbehälter. Aus diesem Grund soll neben dem Selektiven Lasersintern, das aufgrund des erforderlichen Bauraums

für den Laser bereits ausgeschieden ist, auch für das 3D-Drucken zunächst kein Konzept für eine Miniaturisierung entwickelt werden. Ein weiterer Grund dafür ist, dass die beim 3D-Drucken hergestellten Bauteile, wie bereits weiter oben erwähnt, über eine schlechte Oberflächenqualität und eine geringe mechanische Festigkeit verfügen. Ebenfalls ungeeignet für eine Miniaturisierung ist das Layer Laminate Manufacturing, da hier eine Schneideinheit für die Zerteilung der Folie erforderlich ist, die wiederum eine komplexe Kinematik erforderlich macht und zudem einen großen Bauraum einnimmt. Des Weiteren ist die Handhabung des Folienwerkstoffes in kleinen Größenskalen äußerst schwierig und auch der Vorteil der hohen Baugeschwindigkeiten bei großflächigen Bauteilen kann aufgrund der geringen Abmessung der hergestellten Bauteile bei einem miniaturisierten Verfahren nach diesem Prinzip nicht ausgespielt werden. Das Problem des zu großen Bauraums von Teilmodulen setzt sich auch beim Ballistic Particle Manufacturing fort. Dort ist eine zusätzliche mechanische Fräseinheit erforderlich, die wiederum einen eigenen Antrieb, eine Lagerung und vor allen Dingen eine Beseitigung entstehender Späne benötigt und damit das Verfahren für eine Miniaturisierung uninteressant macht. Beim Maskensintern ergibt sich, ähnlich wie beim Selektiven Lasersintern und dem 3D-Drucken, wieder ein Problem mit der Handhabung des pulverförmigen Druckwerkstoffes und zudem ist eine leistungsstarke Infrarot-Strahlquelle für das Aufschmelzen des Werkstoffes mit einem großen erforderlichen Bauraum verbunden. Für das Kaltgasstrahlen soll ebenfalls kein Miniaturisierungskonzept erstellt werden, da es einerseits kein klassisches generatives Fertigungsverfahren ist und andererseits das Verfahrensprinzip aufgrund der erforderlichen Einrichtungen zur Beschleunigung der Partikel auf die benötigten hohen Geschwindigkeiten für eine Miniaturisierung ungeeignet erscheint. Ebenfalls ausgeschlossen wird das Fused Deposition Modeling, da hier die Handhabung des in Strangform vorliegenden Druckwerkstoffes bei kleinen Größenmaßstäben problematisch ist.

Somit verbleiben die Multiphase-Jet Solidification, das Multi-Jet Modeling und das Poly-Jet Modeling als Verfahrensprinzipien für eine miniaturisierte generative Fertigungsmaschine. Sie zeichnen sich im Wesentlichen dadurch aus, dass zur Schichterzeugung keine zusätzlichen Einrichtungen nötig sind, die eine komplexe Kinematik erforderlich machen oder einen großen Bauraum einnehmen. Der Druckwerkstoff liegt beim Multi-Jet Modeling und der Multiphase-Jet Solidification in Form eines festen Granulats vor und wird vor dem Austragen thermisch verflüssigt, sodass er einfach zu handhaben ist und keine Abfälle produziert werden. Beim Poly-Jet Modeling ist der Druckwerkstoff noch unproblematischer in der Handhabung, da er zunächst flüssig vorliegt und erst nach dem Austragen durch Belichtung verfestigt wird. Hierdurch ergibt sich auch keine thermische Belastung des Systems. Zudem sind die erzielbaren Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten beim Poly-Jet Modeling wie auch beim Multi-Jet Modeling sehr gut, und auch komplexe und sehr feine Strukturen können gefertigt werden. Aufgrund des flüssigen Druckwerkstoffes kann zum Transport und zum Austragen auf zahlreiche bereits existierende mikrofluidische Systeme wie Pumpen, Schläuche, Kanäle und Durchflussmesser zurückgegriffen werden, was die Konzeption entsprechender miniaturisierter Systeme vereinfacht. Besonders vorteilhaft für eine Miniaturisierung sind die beim Poly-Jet Modeling und Multi-Jet Modeling verwendeten Druckköpfe. Hierbei handelt es sich um Tintenstrahldruckköpfe, die bereits in Form eines Mikrosystems realisiert und technisch ausgereift sind. Somit entfällt hier eine konzeptionelle Eigenentwicklung vollständig. Zudem kann durch Anordnung vieler Düsen in einem Array die gesamte Bauplattform gleichzeitig bedruckt werden. Dies führt einerseits zu einer sehr hohen Baugeschwindigkeit und andererseits dazu, dass auf eine aufwändige und fehleranfällige x- und y-Kinematik verzichtet werden kann und nur noch die Bauplattform oder der Druckkopf in

z-Richtung verfahren werden muss. Diese beiden Vorteile weist die Multiphase-Jet Solidification nicht auf, da sie den Druckwerkstoff nur über eine einzelne Düse austrägt. Jedoch ist hier der Druckkopf wesentlich einfacher aufgebaut und weniger fehleranfällig, was die kompliziertere Kinematik wieder aufwiegt.

## 3.2 Allgemeine Konstruktionsmethodik

Der Konstruktionsprozess gliedert sich nach VDI-Richtlinie 2221 in die vier Phasen *Klären der Aufgabenstellung* (Phase I), *Konzipieren* (Phase II), *Entwerfen* (Phase III) und *Ausarbeiten* (Phase IV). Weiterhin ist in dieser Richtlinie ein Arbeitsplan entwickelt worden, der in Abb. 3.1 zu sehen ist.

Das Klären der Aufgabenstellung umfasst dabei die genaue Definition der zu erzielenden Gesamtfunktion des zu entwickelnden Produkts durch Ermittlung aller Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden. Diese Anforderungen werden in weitgehend standardisierter Form in der Anforderungsliste festgehalten und untergliedern sich in Fest-, Minimal- und Maximalforderungen sowie Wünsche. Forderungen sind dabei auf jeden Fall einzuhalten, eine Realisierung von Wünschen hat im Gegensatz dazu zunächst eine niedrige Priorität. Die Formulierung der Anforderungen sollte stets klar verständlich, lösungsneutral und in quantifizierter Form erfolgen und auch vermeintlich selbstverständliche Aspekte berücksichtigen. Die Anforderungsliste sollte während des Konstruktionsprozesses stets auf dem neuesten Stand gehalten werden und ermöglicht so unter anderem eine spätere Ableitung von Bewertungskriterien für die Auswahl von Lösungsvarianten beim Konzipieren. [16]

Beim Konzipieren werden Überlegungen zur prinzipiellen, qualitativen Realisierung der zu erzielenden Gesamtfunktion des Systems angestellt. Je nach Komplexität der Gesamtfunktion erfolgt hierzu eine Zergliederung in einfacher zu realisierende Teilfunktionen und die Entwicklung einer Funktionsstruktur, in der alle Teilfunktionen des Systems hierarchisch angeordnet und miteinander in Beziehung gesetzt sind. Nun kann auf Basis dieser Funktionsstruktur unter Verwendung verschiedener Methoden nach prinzipiellen Lösungen für die Teilprobleme gesucht werden. Dies kann konventionell durch eine Literaturrecherche, Analyse bestehender technischer Systeme oder natürlicher Vorgänge, intuitiv wie beispielsweise durch Brainstorming oder diskursiv erfolgen. Die diskursive Lösungsfindung, die im späteren Verlauf der Arbeit Anwendung finden soll, umfasst dabei alle Methoden, mittels derer versucht wird, eine Lösung durch bewusst systematisches und schrittweises Vorgehen zu finden. Konkrete diskursive Methoden sind die Erstellung eines morphologischen Kastens oder Konstruktionskataloge. Das Konzipieren schließt darüber hinaus auch eine Kombination der gefundenen Lösungsprinzipien für die Teilprobleme zu einer Gesamtlösung für das Gesamtproblem ein. Dazu werden einige Lösungsvarianten einer Bewertung unterzogen und schlussendlich eine Entscheidung für eine prinzipielle Gesamtlösung getroffen. Die Bewertung erfolgt dabei in zwei Schritten. Zunächst werden bei der Grobbewertung nur diejenigen Lösungskombinationen weiterverfolgt, die mit den in der Anforderungsliste festgehaltenen Anforderungen an das Produkt verträglich und grundsätzlich realisierbar sind. In der daran anschließenden Feinbewertung erfolgt eine Nutzwertanalyse, bei der die verbliebenen Lösungsvarianten einer genauen quantitativen Bewertung anhand zuvor definierter Kriterien unterzogen werden.

Das sich an die Konzeptphase anschließende Entwerfen umfasst die Erstellung der konkreten

baulichen Struktur und die gestalterische Festlegung eines Produktes nach der in der Konzeptphase entwickelten Gesamtlösung. Es erfolgt in diesem Konstruktionsschritt unter anderem die exakte Festlegung der Geometrie und der verwendeten Werkstoffe. Zu Beginn des Entwurfsprozesses sollten alle gestaltbestimmenden Anforderungen ermittelt und das Produkt in Form von Baugruppen in einfach realisierbare Module unterteilt und so eine modulare Struktur erstellt werden. Anschließend werden die maßgebenden Module zunächst unter Berücksichtigung auftretender Belastungen überschlägig ausgelegt und danach beispielsweise unter Zuhilfenahme einer CAD-Software vorgestaltet. Unter Beachtung bestimmter Gestaltungsgrundregeln, wie beispielsweise zum festigkeits-, fertigungs-, montage-, kosten- und entsorgungsgerechten Gestalten, werden die Vorentwürfe weiterentwickelt und die endgültige Gestaltung des gesamten Produkts vorgenommen. Während des gesamten Entwurfsprozesses ist kontinuierlich zu prüfen, ob das zuvor gesetzte Kostenziel eingehalten werden kann. Ein weiterer Teil der Entwurfsphase ist das Erstellen von Entwurfsdokumenten sowie vorläufiger Stücklisten und Fertigungs- und Montageanweisungen. Zudem findet vor der endgültigen Fertigstellung des Gesamtentwurfs eine Kontrolle der Funktion, Haltbarkeit und der räumlichen Verträglichkeit statt.

Die letzte Konstruktionsphase, das Ausarbeiten, befasst sich mit der endgültigen maßlichen und normgerechten Festlegung des Entwurfs und der Feingestaltung des Produkts. Zudem wird die Produktdokumentation in Form von Gesamt-, Baugruppen- und Einzelteil-Zeichnungen, Fertigungszeichnungen, Stücklisten, Prüf-, Montage- und Transportvorschriften sowie Betriebs- und Instandhaltungsanweisungen erstellt. Die Erstellung dieser Dokumente erfolgt dabei teils manuell und teils automatisiert mittels CAD-Software.

## 3.3 Entwicklung der Miniaturisierungskonzepte

In den folgenden Unterkapiteln werden nun systematisch die vier methodischen Teilschritte der oben erläuterten Konzeptphasen der Konstruktion durchlaufen. Diese umfassen die Klärung der Aufgabenstellung und Erfassung von Anforderungen, die Aufstellung der Funktionsstruktur, die Erarbeitung eines Wirkkonzeptes und schließlich die Bewertung der gefundenen Lösungen. Die ersten beiden Teilschritte werden in einem möglichst allgemeinen Rahmen durchgeführt und gehen so wenig wie möglich auf eine konkrete Verfahrensausprägung ein. Erst bei der Erarbeitung des Wirkkonzeptes und der Bewertung der Lösungen wird eine Unterscheidung zwischen den in Abschnitt 3.1 ausgewählten Verfahrensprinzipien generativer Fertigungsverfahren vorgenommen, da hier aufgrund der Unterschiede in den Verfahrensprinzipien hinsichtlich des Aushärtungsmechanismus des Druckwerkstoffes eine Individualisierung unabdingbar ist. Zudem soll am Ende dieses Kapitels eine kleine Auswahl an Konzepten zur Verfügung stehen, sodass ein Vergleich durchgeführt und die Auswahl eines der Gesamtkonzepte für eine potentielle Weiterentwicklung vorgenommen werden kann.

### 3.3.1 Klärung der Aufgabenstellung

Zunächst muss eine Klärung der Aufgabenstellung in allgemeiner Form erfolgen. Hierzu werden in einer Anforderungsliste alle Anforderungen festgehalten, die im Speziellen an das miniaturisierte System zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens gestellt werden. Die Erstellung der Anforderungsliste erfolgt dabei anhand einer Leitlinie mit Hauptmerkmalen zur Aufstellung einer Anforderungsliste nach [16]. Hier wird insbesondere auf die Geometrie, wirkende Kräfte, Energie-,



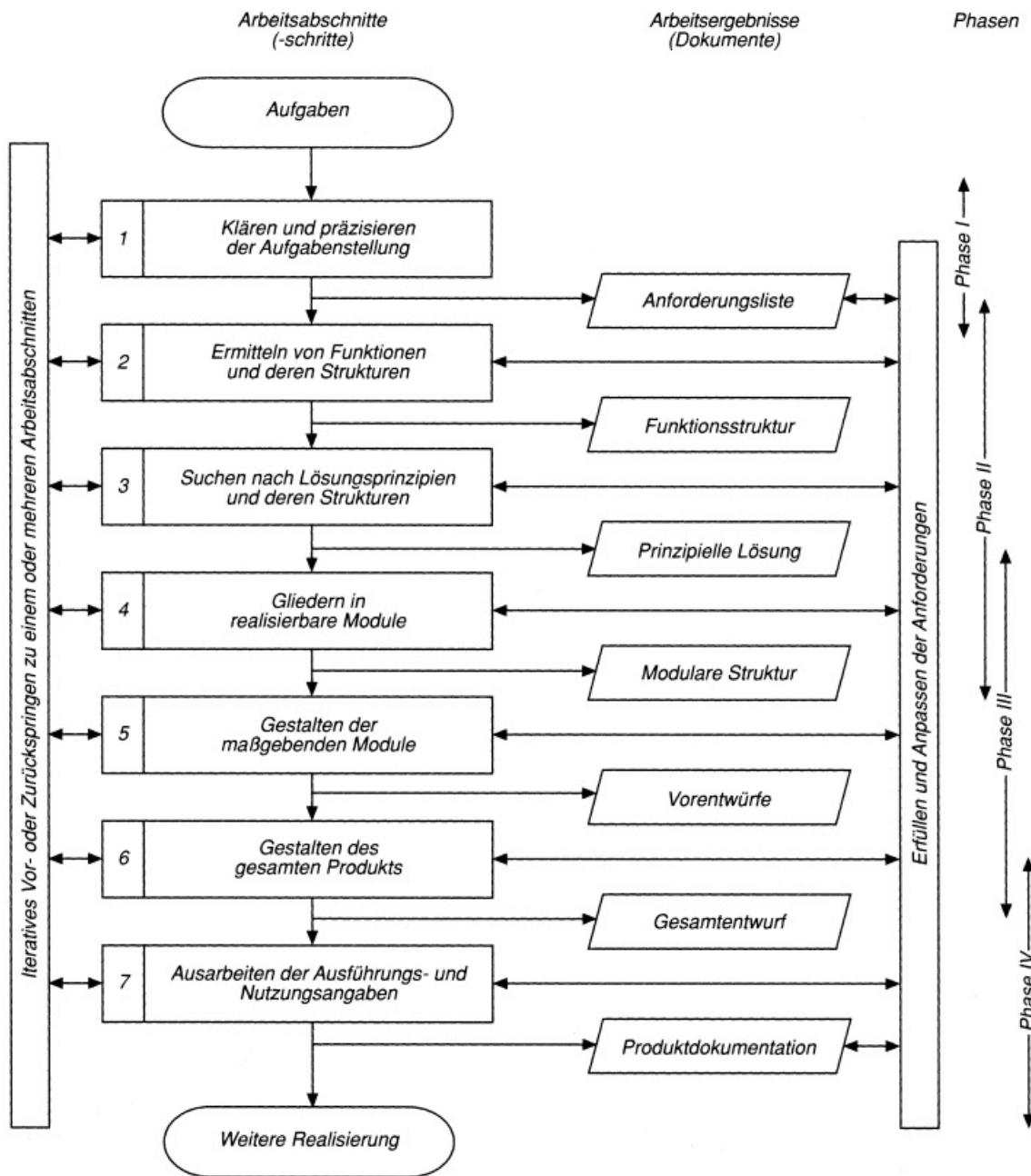


Abbildung 3.1: Arbeitsfluss beim Konstruieren nach VDI-Richtlinie 2221 [17]

Stoff- und Signalflüsse, die Kinematik, die Betriebssicherheit, Ergonomie, Fertigungsaspekte, Kontrolle der Systemfunktionalität nach der Fertigung, Montage, Instandhaltung, den Gebrauch und das Recycling des Miniaturdruckers eingegangen. Die vollständige Anforderungsliste ist in Tabelle 3.1, Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 zu finden. Es sei darauf hingewiesen, dass die spezifizierten Anforderungen bereits für alle im weiteren Verlauf der Arbeit zur Miniaturisierung vorgesehenen Verfahrensausprägungen, also Multi-Jet Modeling, Multiphase-Jet Solidification und Poly-Jet Modeling gültig sind, sodass hier bei der Klärung der entsprechenden spezialisierten Aufgabenstellungen keine separaten Anforderungslisten mehr erstellt werden müssen.

Aufgabe des Konstruktionsprozesses ist die Erstellung eines Systems zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens mit allen sich daraus ergebenden Anforderungen. Speziell die Zielsetzung einer möglichst kompakten Anlage führt zu weiteren Anforderungen. So sollen die Außenmaße möglichst klein sein, die Komponenten möglichst dicht gepackt und ein Bauraum von mindestens  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  bei möglichst geringer Gesamtmasse realisiert werden. Zudem werden die im Betrieb auftretenden Kräfte spezifiziert. Dies sind einerseits Trägheitskräfte, die während des Betriebs der Anlage auftreten, und andererseits Grenzwerte für die mechanische Belastbarkeit des Systems durch von außen einwirkende Kräfte. In Hinblick auf Energien werden alle Hauptleistungsflüsse des Systems, Wärmeströme, parasitäre Effekte wie Reibung sowie Zustandgrößen wie Drücke und Temperaturen betrachtet. Ebenfalls wichtig ist eine Spezifikation der im System auftretenden Stoffe. Diese umfassen neben den Stoffflüssen sowohl die zum Aufbau des Systems verwendeten Werkstoffe als auch die potentiell einsetzbaren Druckwerkstoffe. Darüber hinaus werden Anforderungen an die Informationsflüsse des Systems gestellt. Dies sind Stellsignalen für alle Aktoren des Systems, Messsignale aus den Sensoren sowie interne Signalflüsse innerhalb des Rechners des Druckers. Kinematisch muss das System über drei Achsen (MJS) beziehungsweise eine Achse (PJM und MJM) mit entsprechendem Stellweg bei gleichzeitig hoher Wegauflösung verfügen. Es sollen dabei hohe Vorschubgeschwindigkeiten von beispielsweise  $600\text{ m/min}$  und Beschleunigungen von  $500\text{ m s}^{-2}$  erzielt werden. Weitere Anforderungen werden an die Betriebssicherheit des Systems, die Ergonomie, Fertigung, Kontrolle, Montage, Gebrauch, Instandhaltung und Recycling gestellt. Die Kosten sollten gerade in Hinblick auf die Umsetzung des eingangs erwähnten parallelisierten Drucker-Arrays möglichst gering ausfallen.

#### 3.3.2 Aufstellen der Funktionsstruktur

Nachdem nun die Anforderungen an das miniaturisierte System zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens geklärt sind, soll im Folgenden die Funktionsstruktur der generativen Fertigungsverfahren in möglichst generalisierter Form aus der Analyse der bereits bestehenden Fertigungsmaschinen abstrahiert werden. Diese Funktionsstruktur umfasst dabei lediglich Teilfunktionen auf vergleichsweise hohem Abstraktionsniveau, da sich eine detailliertere Zerlegung bis auf die Ebene der zugrundeliegenden physikalischen Grundstrukturen an dieser Stelle aufgrund der hohen Modularität des Systems als nicht sinnvoll erwies. Dies liegt daran, dass für die einzelnen Subsysteme teils vollständige existierende technische Lösungen vorliegen. Eine Zergliederung des Gesamtproblems auf dieser niedrigen Abstraktionsebene würde dazu führen, dass eine Kombination und Bewertung der zu den entsprechenden Teilproblemen gefundenen Teillösungen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eben diese technischen Gebilde führen würde. Um den Sachverhalt konkreter zu machen, sei unabhängig vom vorliegenden konstruktiven Problem als Beispiel ein elektromechanisches Relais angegeben. Hier könnte die Gesamtfunktion damit

Tabelle 3.1: Anforderungsliste für das miniaturisierte System - Seite 1

TU Braunschweig L. Bommes	Anforderungsliste für ein miniaturisiertes System zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens	Seite: 1 von 3 Datum: 29.10.2015
Hauptmerkmal	Anforderung	F M W
Geometrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maße des Bauraums (L x B x H): 50 mm x 50 mm x 40 mm</li> <li>- kompakte quaderförmige Außenkontur</li> <li>- Integration aller Subsysteme in ein Gehäuse</li> <li>- geringe Gesamtmasse, z.B. 50 g</li> </ul>	F F F W
Kräfte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- im Betrieb auftretende Kräfte                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- impulsartig auftretende Trägheitskräfte in Achsenrichtung durch Achsenbeschleunigung</li> <li>- Kräfte bei Zufuhr des Druckwerkstoffes</li> <li>- Kräfte bei Aus- und Auftrag des Druckwerkstoffes</li> <li>- Einwirkende Kräfte bei Manipulation des Systems durch Nutzer (z.B. bei Entnahme des Bauteils)</li> <li>- thermische Spannungen durch erhöhte Prozesstemperaturen</li> </ul> </li> <li>- mechanische Anforderungen an das System                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Steifigkeit des Gesamtsystems für präzise Positionierung</li> <li>- geringe zulässige Verformung des Gesamtsystems</li> <li>- ausreichende mechanische Stabilität des Gehäuses</li> <li>- Resonanz des Gesamtsystems beachten</li> </ul> </li> </ul>	F F F F
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leistungen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe elektrische Leistungsaufnahme, z.B. 20 W</li> <li>- ausreichende Leistung des Druckwerkstoff-Fördersystems</li> <li>- ausreichende Leistung der Bauplattform-Heizung</li> <li>- ausreichende Leistung der Reservoir-Heizung (bei MJS und MJM)</li> <li>- ausreichende Leistung der UV-Strahlungsquelle (bei PJM)</li> </ul> </li> <li>- hoher Wirkungsgrad der Antriebe und Heizelemente</li> <li>- geringe Reibung zwischen relativ zueinander bewegten Komponenten</li> <li>- Zufuhr elektrischer Energie von außen</li> <li>- Energieumformung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- elektrisch -&gt; mechanisch in Fördersystem für Druckwerkstoff und Aktorik der Achsen</li> <li>- elektrisch -&gt; thermisch in Heizung der Bauplattform und zur Verflüssigung des Werkstoffes im Reservoir (bei MJS und MJM)</li> <li>- elektrisch -&gt; Strahlung bei UV-Belichtungssystem (bei PJM)</li> </ul> </li> <li>- Wärmeströme                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärmezufuhr ins Werkstoffreservoir zum Aufschmelzen des Druckwerkstoffes (bei MJS und MJM)</li> <li>- Wärmeabfuhr aus dem Bauraum zur Einhaltung der Prozesstemperatur</li> </ul> </li> <li>- Temperaturen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Extrusionstemperatur (bei MJS und MJM) max. 150 °C</li> <li>- Temperatur im Bauraum max. 50 °C, möglichst konstant während des Prozesses</li> </ul> </li> <li>- Prozessdruck bei Zufuhr von Druckmedium</li> </ul>	F F F F F W F F F F F F F F F F
Ersetzt Ausgabe Nr. 2 vom 05.09.2015		Ausgabe Nr: 3

Tabelle 3.2: Anforderungsliste für das miniaturisierte System - Seite 2

TU Braunschweig L. Bommes	Anforderungsliste für miniaturisiertes System zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens	Seite: 2 von 3 Datum: 29.10.2015
Hauptmerkmal	Anforderung	F M W
Stoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Werkstoffe                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Silizium als Werkstoff für mikrotechnische Komponenten</li> <li>- Gehäuse aus Aluminium oder ebenfalls Silizium</li> </ul> </li> <li>- Druckmedien                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- verschiedene photoaktive Monomere als Bauwerkstoff, Wachs als Stützwerkstoff (bei PJM)</li> <li>- formloser thermoplastischer Kunststoff oder Wachs als Bauwerkstoff, wasserlöslicher Werkstoff als Stützstruktur (bei MJS und MJM)</li> </ul> </li> <li>- Materialfluss vom Reservoir in die Druckdüsen und Austrag auf Bauplatzform, Antrieb durch Fördermechanismus</li> <li>- Nachfüllen des Reservoirs ermöglichen</li> </ul>	<p>F W  F F F F</p>
Signal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgangssignale                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stellsignal für Aktoren aller Achsen</li> <li>- Stellsignal für Leistungen von Bauplatzform- und Reservoir-Heizung</li> <li>- Stellsignal für Volumenstrom vom Reservoir in den Druckkopf</li> <li>- Stellsignal für einzelne Düsen des Druckkopfes (bei MJM und PJM)</li> <li>- Stellsignal für Aktivierung der UV-Lichtquelle</li> </ul> </li> <li>- Eingangssignale                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- analoges Messsignal zur Bestimmung der Achsenpositionen</li> <li>- analoge Messsignale zur Bestimmung der Temperaturen von Bauplatzform, Extruder und Reservoir</li> <li>- analoges Messsignal für Volumenstrom des Druckmediums</li> </ul> </li> <li>- Signalauswertung und automatische Systemsteuerung entsprechend der Druckbefehle durch internen Controller</li> <li>- manuelle Steuerung des Systems über externen PC mit Host-Software</li> </ul>	<p>F F F F F  F F W F F</p>
Kinematik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- translatorische Relativbewegung zwischen Druckkopf und Bauplatzform auf drei orthogonalen Achsen (nur z-Achse bei PJM und MJM)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- x-Achse: Auslenkung 0 mm bis 50 mm, Auflösung: <math>\leq 10 \mu\text{m}</math></li> <li>- y-Achse: Auslenkung 0 mm bis 50 mm, Auflösung: <math>\leq 10 \mu\text{m}</math></li> <li>- z-Achse: Auslenkung 0 mm bis 40 mm, Auflösung: <math>\leq 5 \mu\text{m}</math></li> </ul> </li> <li>- mechanische Endanschläge für Achsen</li> <li>- rotatorische oder translatorische Pumpbewegung zum Transport des Druckwerkstoffes</li> <li>- hohe Maximalgeschwindigkeiten, z.B. 600 m/min</li> <li>- hohe Beschleunigungen, z.B. 500 m/s<sup>2</sup></li> </ul>	<p>F F F F F F F F</p>
Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maximale Temperatur der Außenflächen 50 °C</li> <li>- keine gasförmigen oder flüssigen Medien beim Betrieb freisetzen</li> <li>- Schutzvorrichtung vor sich bewegenden und heißen Maschinenteilen bei Entnahme des Bauteils</li> <li>- keine scharfen Kanten</li> <li>- Giftstoffe beim Betrieb und im System selbst vermeiden</li> </ul>	<p>F F F F F</p>
Ersetzt Ausgabe Nr. 2 vom 05.09.2015		Ausgabe Nr: 3

Tabelle 3.3: Anforderungsliste für das miniaturisierte System - Seite 3

TU Braunschweig L. Bommers	Anforderungsliste für miniaturisiertes System zur Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens	Seite: 3 von 3 Datum: 29.10.2015
Hauptmerkmal	Anforderung	F M W
Ergonomie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manipulation des Systems durch den Nutzer ermöglichen</li> <li>- einfache Entnahme des fertigen Bauteils ermöglichen</li> <li>- intuitive Bedienbarkeit der Host-Software zur Steuerung des Druckers</li> <li>- Einsicht in den Bauraum während des Bauprozesses ermöglichen</li> <li>- Beleuchtung des Bauraums</li> <li>- optisch ansprechendes Design</li> </ul>	F F W W W W
Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fertigung unter Anwendung üblicher Fertigungsverfahren der Mikrosystemtechnik (Lithographie, Dünnschichttechnik, Dotierung, Ätztechnik, laserbasierte Materialbearbeitung, LIGA, Aufbau- und Verbindungstechnik) und der Feinwerktechnik</li> <li>- Einhaltung erforderlicher Toleranzen zur Gewährleistung eines zuverlässigen Betriebs</li> <li>- Verwendung von Zukaufteilen für Subsysteme (Druckköpfe, Aktoren)</li> </ul>	F  F W
Kontrolle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwendung üblicher Fertigungsmessmittel der Mikrotechnik (Schichtdickenmessung, Oberflächenanalytik, Topographieuntersuchung, Überprüfung mechanischer und physikalischer Eigenschaften) zur Kontrolle während der Fertigung</li> <li>- Überprüfung der korrekten Funktion der Maschinensteuerung und Korrektheit aller elektrischer Signale</li> <li>- Überprüfung der korrekten Funktion der Aktorik und Sensorik</li> <li>- Überprüfung der Druckmedienzufuhr</li> <li>- Überprüfung der erzielten Druckergebnisse (Genauigkeit, Reproduzierbarkeit)</li> </ul>	F  F F F
Montage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Montage unter Reinraumbedingungen</li> <li>- einfache Montierbarkeit aller Subsysteme, d.h. Zugänglichkeit beim Montageprozess, gewährleisten</li> </ul>	F F
Gebrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Betrieb in Wohnräumen (bei 10 °C bis 25 °C Lufttemperatur und 40 % bis 70 % rel. Luftfeuchtigkeit)</li> <li>- geringer Geräuschpegel, max. 55 dB</li> <li>- beständig gegen Korrosion und chemischen Angriff durch Druckmedien</li> <li>- geringer Verschleiß und keine Entstehung von unzulässigem Spiel in den Achsen während einer längeren Einsatzdauer</li> </ul>	F F F F
Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- automatische Reinigung des Druckkopfes (PJM, MJM) bzw. des Extruders (MJS) in bestimmten Zeitabständen</li> <li>- manuelle Reinigung von Bauplattform und Druckmedien-Reservoir</li> <li>- Austausch einzelner Subsysteme ermöglichen</li> </ul>	F F W
Recycling	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine Giftstoffe enthalten</li> <li>- Entsorgung im Hausmüll ermöglichen</li> </ul>	F W
Kosten	- möglichst geringe Entwicklungs- und Fertigungskosten	W
Transport	/	
Termin	/	
Ersetzt Ausgabe Nr. 2 vom 05.09.2015		Ausgabe Nr: 3

beschrieben werden, dass ein elektrischer Stromkreis durch Auslösung eines Steuersignals zu beliebigem Zeitpunkt geöffnet oder geschlossen wird. Dies wäre die in der folgenden aufgestellten Funktionsstruktur vorliegende tiefste Abstraktionsebene. Es könnte aber eine weitere Untergliederung der Gesamtfunktion in die Teilfunktionen Erzeugung eines Magnetfeldes durch den elektrischen Strom in einer Spule, Erzeugung eines magnetischen Flusses in einem Eisenkreis, Erzeugung mechanischer Energie mithilfe eines Eisen-Ankers, Speicherung der mechanischen Energie in einer Feder, Übertragung der mechanischen Energie vom Anker auf den Schalter und das Betätigen des Schalters mithilfe dieser mechanischen Energie vorgenommen werden [18]. Es zeigt sich an dieser Stelle, dass bereits ein so simples technisches Gebilde wie ein elektromagnetisches Relais auf eine verhältnismäßig komplexe Funktionsstruktur führt. Würde dies für sämtliche Komponenten der zu konzipierenden generativen Fertigungsmaschine in diesem Umfang durchgeführt, so ergäbe sich eine Funktionsstruktur in einem Detailgrad wie er für die vorliegende Anwendung nicht erforderlich ist. Es genügt schließlich, im späteren Lösungsfindungsprozess beispielsweise festzulegen, dass das Heizelement des Extruders bei der Multiphase-Jet Solidification über ein elektromagnetisches Relais angesteuert wird. Dazu ist keine genaue Kenntnis der inneren Funktionsstruktur des Relais erforderlich.

#### 3.3.2.1 Formulierung des Gesamtproblems

Bevor die Zergliederung des Gesamtproblems in Teilprobleme erfolgen kann, ist zunächst das Gesamtproblem zu formulieren. Dieses lässt sich, wie auch in Kapitel 2 detailliert ausgeführt, bei allen generativen Fertigungsverfahren damit beschreiben, dass nach einem zuvor mittels rechnerunterstützten Konstruierens erstellten dreidimensionalen Modell des zu fertigenden Bauteils ein Ausgangswerkstoff in einen fließfähigen Zustand überführt wird, sofern er nicht bereits als Flüssigkeit vorliegt, dieser anschließend schichtweise auf eine bewegliche Bauplattform ausgetragen und dabei durch einen Aushärtungsmechanismus verfestigt wird und auf diese Weise die feste Geometrie entsprechend des 3D-Modells erzeugt. Da dies eine sehr komplexe Gesamtfunktion ist, bietet es sich an, eine Untergliederung in Teilfunktionen auf zwei Ebenen vorzunehmen, zum einen eine grobstrukturierte Funktionsebene und zum anderen eine feinstrukturierte, in der die Teilfunktionen einzelner Systeme aufgegliedert sind. Anschließend müssen die Teilfunktionen hierarchisch gegliedert und miteinander in Beziehung gesetzt werden. Hierzu bietet sich als Strukturierungshilfe die Betrachtung von Stoff-, Energie- und Signalflüssen innerhalb des Systems an. Anhand dieser Flüsse kann sehr einfach dargestellt werden, wie beispielsweise der Druckwerkstoff einzelne Teilmodule des Systems durchläuft und dabei sein Aggregatzustand geändert wird. Gleiches gilt für die Energieflüsse, wobei hauptsächlich elektrische, mechanische und thermische Energie auftreten und ein Energiestrom unter oftmaliger Umwandlung einer Energieform in eine andere durch sämtliche Subsysteme erfolgt. Auch der Signal- beziehungsweise Informationsfluss durch sämtliche Module eines generativen Fertigungssystems lässt sich auf diese Weise sehr einfach beschreiben.

#### 3.3.2.2 Entwicklung der konkreten Funktionsstruktur

Im Folgenden soll eine Funktionsstruktur nach diesen Gesichtspunkten entwickelt werden. Die fertige Struktur ist in Abb. 3.2 dargestellt, wobei die Module der Grobstruktur in gestrichelte Kästen eingerahmt und die Module der Feinstruktur in durchgezogene Rahmen eingefasst

sind. Energieflüsse werden durch durchgehende Pfeile, Stoffflüsse durch gestrichelte Pfeile und Signalflüsse durch gepunktete Pfeile dargestellt. Die Grobstruktur enthält dabei als Subsysteme den externen Steuerungs-Computer, die interne Steuerelektronik der Maschine, die Einheit zur Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes, das Aggregat zur Zuführung des fließfähigen Druckwerkstoffes in die aktive Druckeinheit und die aktive Druckeinheit, die wiederum untergliedert ist in den eigentlichen Druckkopf, die Heizung der Bauplattform und das Antriebssystem, welches eine gezielte Relativbewegung zwischen Druckkopf und Bauplattform ermöglicht. An dieser Stelle soll nun detailliert auf die in diesen Subsystemen enthaltenen Teilsysteme und deren Teilfunktion, das heißt die Feingliederung der Funktionsstruktur, eingegangen werden.

**Externer Steuerungs-Computer** Der externe Steuerungs-Computer, der aus handelsüblicher Desktop-Hardware und einem gängigen Betriebssystem besteht, dient der Ausführung der CAD-Software, mit deren Hilfe das zu fertigende Bauteil modelliert wird. Es erfolgt innerhalb des CAD-Programms die Konvertierung des Volumenmodells in eine STL-Datei, siehe auch Abschnitt 2.2. Eine weitere Software, der sogenannte Slicer, erzeugt aus der STL-Datei einen von der Maschinensteuerung interpretierbaren Code, der sich aus einzelnen Steuerungsbefehlen, den G- und M-Codes, zusammensetzt. Hier findet auch die Zerlegung des Volumenkörpers in einzelne Schichten statt. Außerdem kann im Slicer der Nullpunkt des Bauteils sowie dessen Orientierung auf der Bauplattform festgelegt werden. An den Slicer schließt sich eine Host-Software an, die der Steuerung und Überwachung des Systems dient. Sie stellt die Anwendungsebene der Schnittstelle dar und steht über die Schnittstellen-Hardware in direktem Kontakt mit der CPU der internen Maschinensteuerung. Daher ist die Host-Software auch für die Übermittlung sämtlicher manueller Steuerungsbefehle, wie die Aktivierung der Heizelemente, das Starten oder Unterbrechen des Druckprozesses oder das Auslösen eines Notstopps sowie automatischer Druckbefehle entsprechend der G-Code-Datei, zuständig. Außerdem erfolgt in der Host-Software die Einrichtung der Maschine, die das Festlegen der Prozess- und Maschinenparameter sowie die Kalibrierung der Maschine umfasst. Prozessparameter sind dabei Subsystemtemperaturen, beispielsweise die Temperaturen des Verflüssigungsaggregats oder des Heizbettes, Maximalgeschwindigkeiten der Achsen sowie des Eilgangs und Volumenströme respektive Extrusionsgeschwindigkeiten. Die Maschinenparameter umfassen im Gegensatz dazu alle Parameter, die die Schnittstelle betreffen, bei der Multiphase-Jet Solidification die Anzahl der Extruder sowie der Extruderdaten wie Düsendurchmesser und Positions-Offsets, Grenzwerte für die Prozessgrößen Temperatur und Volumenstrom, den maximalen Druckbereich, das heißt die maximal mögliche Auslenkung der Achsen und den Nullpunkt der Maschine. Zudem können die Skalenrichtungen der Achsen, die Art der Kinematik des Druckers, also Anzahl und Orientierung der Achsen, und das Verhalten des Systems bei Erreichen eines bestimmten Prozesszustandes, wie beispielsweise die Fertigstellung des Bauteils, bestimmt werden. Die Kalibrierung der Maschine, die ebenfalls über die Host-Software erfolgt, beschränkt sich in der Regel auf das manuelle Anfahren einer Position und die anschließende Festlegung dieser Position als Nullpunkt. Die Endstellungen der Achsen können automatisch aus diesem Punkt und dem in den Maschinenparametern angegebenen maximalen Druckbereich berechnet werden. Weitere Subsysteme des externen Steuerungs-Computers sind die Schnittstellen-Hardware, die zur Kommunikation mit der internen Maschinensteuerung dient, und ein Netzteil, das Energie aus dem elektrischen Versorgungsnetz entnimmt und diese ebenfalls an die Steuerelektronik weitergibt.

### 3 Konzeptentwicklung

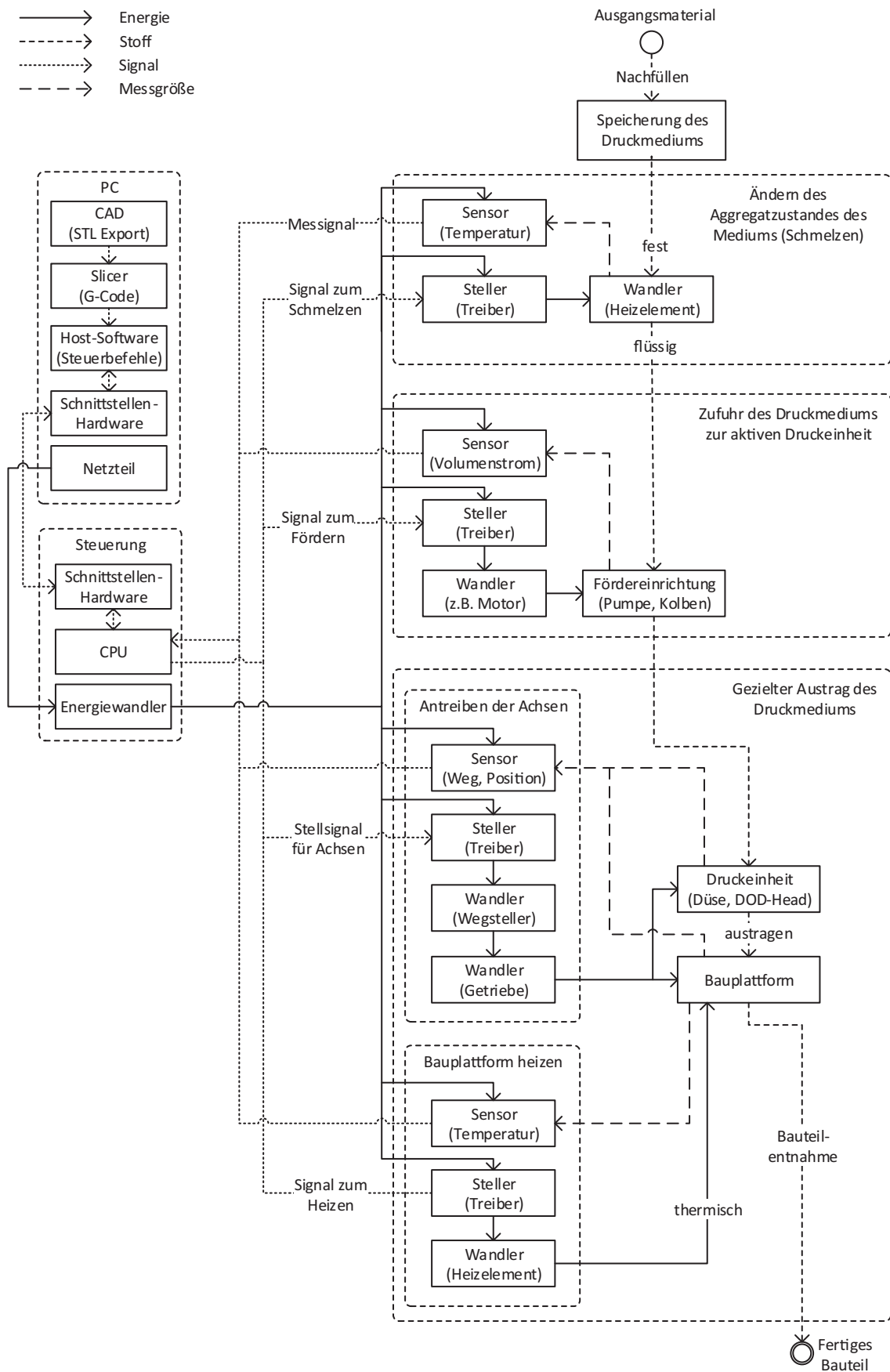


Abbildung 3.2: Allgemeine Funktionsstruktur einer generativen Fertigungsmaschine



**Interne Maschinensteuerung** Nächstes Glied in der Informationsflusskette ist die interne Maschinensteuerung, die sich aus den Teilsystemen der Schnittstellen-Hardware, einer zentralen Recheneinheit und einem Energiewandler zusammensetzt. Die Schnittstellen-Hardware dient dabei dem Empfangen von Daten vom externen Steuerungs-Computer sowie Senden von Daten an diesen. Der Austausch ist an dieser Stelle also bidirektional. Die zentrale Recheneinheit (CPU) übernimmt die Ansteuerung sämtlicher weiterer Subsysteme der Maschine entsprechend der vom PC an die Steuerung übertragenen Befehle, wie beispielsweise das Ein- oder Ausschalten eines Heizelements. Zudem sendet sie über die Schnittstelle Prozesszustandsdaten wie Temperaturen und Achsenpositionen der Maschine an die Host-Software, wo diese Daten zum Zwecke einer Überwachung des Druckprozesses angezeigt und gespeichert werden. Der Energiewandler schlussendlich ist vielmehr ein Energieübertrager, da er die elektrische Energie nicht in eine andere Energieform überträgt, sondern nur die Größen Spannung und Strom entsprechend der Anforderungen der Subsysteme verändert.

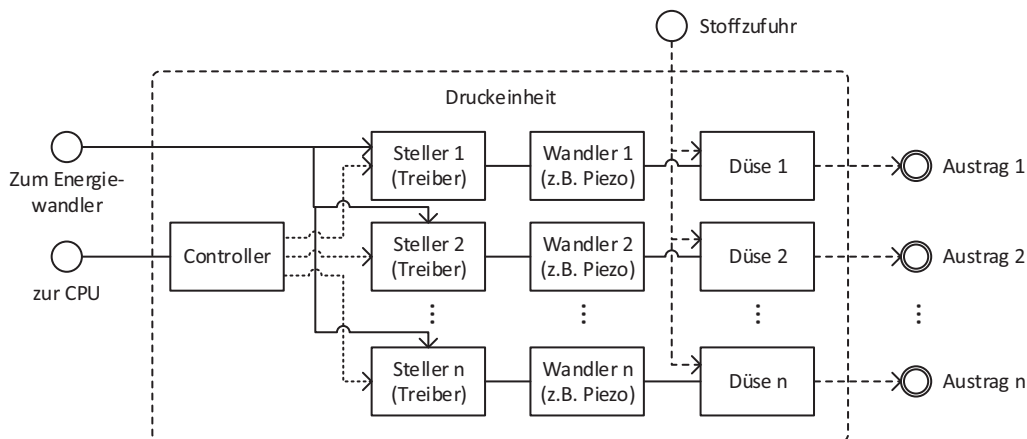
**Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes** Die Betrachtung der übrigen Subsysteme soll anhand des Stoffflusses durch das gesamte System erfolgen. So stellt das in einem beliebigen Aggregatzustand vorliegende Druckmaterial, welches in einem Reservoir gespeichert wird, den Ausgangszustand dar. Dieses wird zunächst der Einheit zur Änderung des Aggregatzustandes zugeführt. Dieses Subsystem enthält eine sensorische und eine aktorische Teilkomponente, wobei letztere nach [19] aus zwei Subsystemen in Form eines Energiestellers und eines Energiewandlers besteht. Der Energiesteller erhält elektrische Hilfsenergie aus dem Energiewandler der Maschinensteuerung und stellt mit deren Hilfe den Wandler, der elektrische in thermische Energie umwandelt. Diese thermische Energie wird dem festen Ausgangswerkstoff zugeführt, wodurch dieser aufgeschmolzen wird und in die flüssige Phase übergeht. Gleichzeitig erfasst nach [20] ein sensorisches Element unter Aufnahme von Hilfsenergie die Temperatur des Wandlers als physikalische Messgröße, stellt ein elektrisches Ausgangssignal entsprechend des Werts der Messgröße und leitet dieses an die CPU in der Maschinensteuerung weiter. Dort wird intern über einen PID-Regler die Temperatur des Wandlers über den Steller auf den Zielwert eingestellt.

**Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinrichtung** Der verflüssigte Druckwerkstoff wird nun an das Aggregat zur Zuführung des Druckmediums an die aktive Druckeinheit weitergeleitet. Deren Aufgabe besteht darin, kontrolliert kinetische Energie in das Fluid einzubringen, sodass ein Austrag des Druckwerkstoffes mit vorgegebenem, gezielt beeinflussbarem, Volumenstrom erfolgen kann. Hierzu verfügt dieses Subsystem ebenfalls über alle Komponenten eines Regelkreises, also über einen Sensor zur Erfassung des Volumenstroms, ein Stellglied und einen Wandler, der elektrische in mechanische Energie umwandelt. Eine Fördereinrichtung überträgt diese mechanische Energie an den flüssigen Druckwerkstoff.

**Gezieltes Austragen des Druckmediums** Das Subsystem zur Austragung des Druckmediums, also die aktive Druckeinheit, enthält neben der Bauplattform und der eigentlichen Druckeinheit, wie bereits oben erwähnt, wiederum zwei Subsysteme, die den Antrieb der Achsen und das Heizen der Bauplattform übernehmen. Das System zur Beheizung der Bauplattform ist analog zum Subsystem zur Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes aufgebaut, enthält also einen Sensor zur Erfassung der Temperatur der Bauplattform, ein Stellglied und einen Wandler,

der elektrische in thermische Energie umwandelt. Es erfolgt wiederum eine PID-Regelung der Temperatur mithilfe der in der CPU ausgeführten Steuerlogik als Regler. Das Subsystem, welches den Antrieb jeweils einer Maschinenachse realisiert, enthält wiederum ganz ähnliche Teilsysteme. Es sei dabei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Subsystem entsprechend der Anzahl der Achsen mehrfach vorhanden ist und die Darstellung in Abb. 3.2 lediglich der Übersichtlichkeit halber auf nur ein System reduziert wurde. Das sensorische Element dient hierbei der Erfassung des zurückgelegten Weges oder der Position der jeweiligen Achse und der Steller speist einen ersten Wandler, der elektrische in mechanische Energie umwandelt. Diese mechanische Energie wird anschließend über einen weiteren Wandler beziehungsweise Überträger an die Bauplattform und die Druckeinheit abgegeben und realisiert auf diese Weise die Relativbewegung zwischen Bauplattform und Druckeinheit. Der Überträger transformiert dabei Kräfte und Wege bei translatorischen oder Drehmomente und Winkelgeschwindigkeiten bei rotatorischen Bewegungen. Der Materialfluss erfolgt von der Fördereinrichtung des vorgeschalteten Subsystems direkt in die Druckeinheit, wo eine Verteilung des Druckmediums und daran anschließend der Austrag auf die Bauplattform beziehungsweise auf bereits ausgetragene Materialschichten stattfindet. Nach Abschluss des Bauprozesses wird der Druckwerkstoff, der nunmehr wieder in fester Form vorliegt, als fertiges Bauteil entnommen.

Die Funktion der Druckeinheit kann bei den Verfahren mit parallelem Werkstoffaustrag, also Multi-Jet Modeling und Poly-Jet Modeling wie in Abb. 3.3 dargestellt, noch weiter in Teilfunktionen untergliedert werden. So verfügt dieses Subsystem über eine große Anzahl einzelner Düsen, durch die flüssiger Werkstoff parallel auf die Bauplattform ausgetragen wird. Jede Düse verfügt über einen vorgeschalteten Steller und einen Wandler. Der Steller leitet entsprechend eines Eingangssignals zugeführte elektrische Energie an den Wandler weiter. Dieser wandelt entweder elektrische in kinetische Energie um, die direkt als kinetische Energie in das flüssige Druckmedium eingebracht wird, oder aber es erfolgt eine Umwandlung elektrischer in thermische Energie, die zu einer lokalen Verdampfung des Fluids in der Düse und damit einer Volumenvergrößerung führt, was letztlich wiederum für eine Zunahme der kinetischen Energie des Druckwerkstoffes sorgt. Weiterhin verfügt die Druckeinheit über einen eigenen Controller, der mit der CPU der internen Maschinensteuerung kommuniziert und für die Signalweiterleitung an die einzelnen Steller verantwortlich ist.



**Abbildung 3.3:** Funktionsstruktur eines Druckkopfes mit paralleler Düsenanordnung

Beim Verfahrensprinzip der Multiphase-Jet Solidification ist der Druckkopf in seiner Funktion erheblich weniger komplex. Es gibt lediglich eine Düse, durch die der gesamte Volumenstrom des Druckmediums hindurchtritt. Die Teilaufgaben des Druckkopfes bestehen hierbei lediglich in einem mechanisch gerichteten und geometrisch einfach zu beherrschenden Austrag des Druckwerkstoffes durch die Düse sowie einem leichten Anpressen des extrudierten Werkstoffes an die bedruckte Oberfläche. Dies gewährleistet einen sicheren Stoffzusammenhalt der erzeugten Bauteilschichten untereinander.

**Unterschiede zwischen den Verfahrensprinzipien** Erwähnt werden muss die Tatsache, dass die hier erstellte Funktionsstruktur in der Form nur für die Verfahren Multi-Jet Modeling und Multiphase-Jet Solidification gültig ist, bei denen ein thermoplastischer Kunststoff oder Wachs verflüssigt, anschließend ausgetragen und dabei durch Abkühlen und Erstarren verfestigt wird. Um die Funktionsstruktur für das Poly-Jet Modeling zu erhalten, sind leichte Modifikationen vorzunehmen. So liegt der Druckwerkstoff dort bereits in flüssiger Form vor und muss dementsprechend vor der Zufuhr in die aktive Druckeinheit nicht erst aufgeschmolzen werden. Deshalb fällt hier das Teilmodul, welches für die Überführung des Druckwerkstoffes in die flüssige Phase verantwortlich ist, vollständig weg. Dafür muss parallel zu Druckeinheit und Bauplattform ein Subsystem geschaltet werden, das die Aushärtung des flüssigen Druckmediums nach dem Austrag aus dem Druckkopf mithilfe von UV-Strahlung übernimmt. Dieses Subsystem enthält lediglich einen Steller und einen Wandler, wobei der Wandler elektrische Energie in Strahlungsenergie im ultravioletten Wellenlängenbereich umwandelt.

**Mechanische Funktionen** Zum Schluss sei noch darauf hingewiesen, dass die vorliegende Funktionsstruktur aufgrund der Gliederung der Subsysteme unter Berücksichtigung der Stoff-, Signal- und Energieflüsse keine exakte Darstellung der mechanischen Funktionen und Teilfunktionen der Subsysteme erlaubt. Daher wird an dieser Stelle kurz auf diesen zusätzlichen Aspekt eingegangen. So ist es erforderlich, die Subsysteme zur Erzielung der in der Anforderungsliste aufgestellten kinematischen Erfordernisse relativ zueinander anzuordnen und ihre Freiheitsgrade entsprechend einzuschränken. So muss beispielsweise die Bauplattform parallel zur Druckebene, also der Ebene, in der sich der Druckkopf bewegt, liegen. Dies muss unter Umständen durch zusätzliche Einrichtungen mittels manueller oder automatischer, sensorisch unterstützter Justierung erzielt werden. Weiterhin müssen die Achsen relativ zueinander angeordnet und fixiert werden. Im einfachsten Fall stehen die Achsen dabei orthogonal zueinander. Die Bauplattform und der Druckkopf sind zudem so anzuordnen, dass eine genaue Positionierung erfolgt, dabei jedoch entsprechend der erforderlichen Relativbewegung zwischen beiden Komponenten die translatorischen Freiheitsgrade in einem bestimmten Bereich nicht fixiert werden.

#### 3.3.3 Erarbeiten der Wirkkonzepte

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt eine Funktionsstruktur für die wichtigsten Komponenten der generativen Fertigungsmaschine aufgestellt wurde, kann nun die Ermittlung von Lösungsprinzipien beginnen. Ziel der Lösungsfindung ist es, für die einzelnen Teilprobleme der Funktionsstruktur zunächst eine möglichst große Auswahl an Lösungen zu finden. Damit dabei ein möglichst großes Suchfeld erschlossen werden kann, ist es nach [16] unabdingbar, die Teilfunktionen im richtigen Abstraktionsgrad zu formulieren. Dieser ist dann erreicht, wenn die Formulierung

einer Teilfunktion zwischen einer anschaulich-bildlichen und einer mathematisch-abstrakten Formulierung liegt. Praktisch bedeutet dies, dass bei der Aufstellung der Teilfunktionen keinesfalls bereits eine Einschränkung möglicher Lösungen vorgenommen werden darf, sondern so allgemein wie möglich formuliert werden sollte. Wurde ein sinnvoller Abstraktionsgrad gewählt, so können Teillösungen durch Betrachtung physikalischer Wirkprinzipien gefunden werden. Das eigentliche Lösungsfeld erstreckt sich dabei ebenfalls nach [16] über mechanische, fluidische, magnetische, kernphysikalische und elektrische Wirkprinzipien. Letztere gliedern sich weiter auf in elektrostatische, elektrodynamische, dauermagnetische und elektronische Wirkprinzipien und die fluidischen sind ebenfalls unterteilt in pneumatische und hydraulische Lösungsprinzipien. Diese und einige weitere Aspekte wurden im folgenden bei der Aufstellung der Teilprobleme und Teillösungen beachtet.

Für die konkrete strukturelle Suche kommt, wie bereits in Abschnitt 3.2 erläutert, ein morphologischer Kasten zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein strukturelles Schema, das eine systematische, schrittweise Suche nach Lösungen erlaubt. Hierzu wird, wie im Anhang A.1 zu sehen, für jedes Subsystem eine Tabelle aufgestellt, in deren Spalten zunächst die jeweiligen Teilfunktionen eingetragen werden, und anschließend in den Zeilen für jedes Teilproblem unter Berücksichtigung oben genannter Wirkprinzipien und entsprechender Literatur nach Lösungen gesucht. Es ergibt sich somit eine Matrix aus Teillösungen und Teilproblemen, die eine einfache Verknüpfung von Teillösungen zu einer prinzipiellen Gesamtlösung für das jeweilige Subsystem erlaubt. Um eine Lösung für ein Subsystem aufzustellen, werden dabei, wie im Anhang A.1 geschehen, einzelne Teillösungen von links nach rechts mit Linien verknüpft. Aus jeder Spalte muss dabei genau eine Teillösung in der Gesamtlösung vorkommen. Wie die Teillösungen miteinander kombiniert werden, liegt im Ermessen des Konstrukteurs und muss unter Berücksichtigung der Verträglichkeit mit der zu erfüllenden Aufgabe des Gesamtsystems und den in der Anforderungsliste aufgestellten Anforderungen erfolgen. Weiterhin zu beachten ist, dass die Teillösungen untereinander verträglich sind. So macht es beispielsweise wenig Sinn, als Energiewandler einen Elektromotor mit rotierender Ausgangswelle mit einer Hebelmechanik als Getriebe zu verknüpfen, sondern es müsste beispielsweise zur Kraft- und Momentenübersetzung ein Stirn- oder Planetengetriebe eingesetzt werden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen können prinzipiell sehr viele verschiedene Lösungsvarianten, die sich alle in Teilaspekten voneinander unterscheiden, zusammengestellt werden. Im Folgenden soll jedoch für jedes Subsystem eine Auswahl von vier Lösungsvarianten aufgestellt werden. Betrachtet werden dabei wiederum die Subsysteme zur Speicherung des Druckwerkstoffes, zur Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes, zum Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinheit und die Druckeinheit selbst mit der Bauplattform-Heizung und den Achsantrieben. Es sollen allerdings keine morphologischen Kästen für die jeweiligen Druckköpfe der Verfahren aufgestellt werden. Dies ist insofern sinnvoll, als dass für die Verfahren Multi-Jet Modeling und Poly-Jet Modeling bereits Konzepte und sogar ausgereifte technische Produkte für die hier vorgesehenen mikrotechnisch realisierten Tintenstrahl-Druckköpfe existieren. Für die Multiphase-Jet Solidification kommt lediglich eine einfache Düse zum Einsatz, die keiner konzeptionellen Vorüberlegung bedarf. Weiterhin nicht näher betrachtet werden der externe Steuerungs-Computer und die interne Maschinensteuerung, da es sich hierbei um komplexe elektrotechnische Systeme und Software handelt, deren genaue funktionelle und strukturelle Untersuchung an dieser Stelle zu weit führen würde. Die technische Realisierung ist jedoch bei Verwendung kommerziell erhältlicher eingebetteter Systeme oder Mikroprozessoren als lösbares Problem anzusehen.

Abschließend sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es theoretisch möglich wäre, die erhaltenen Lösungsvarianten für die Subsysteme miteinander zu kombinieren. Da jedoch Miniaturisierungskonzepte für existierende generative Fertigungsverfahren, die sich durch charakteristische Merkmale auszeichnen, erstellt werden sollen, ist es nicht erforderlich, eine solche Variation der Subsysteme vorzunehmen. Stattdessen wird versucht, vier Lösungsvarianten zu erstellen, die sich durch alle Subsysteme erstrecken und sich durch Eigenschaften wie Miniaturisierungsgrad und Komplexität der technischen Umsetzung unterscheiden.

#### 3.3.3.1 Suchen von Teillösungen

In diesem Abschnitt soll nun in aller Kürze auf die im Anhang A.1 dargestellten morphologischen Kästen sowie die darin aufgestellten Lösungsprinzipien eingegangen werden. Eine detaillierte Darstellung der Lösungsprinzipien würde den Rahmen dieser Betrachtung sprengen, sodass bei Bedarf auf die weiterführende Literatur verwiesen wird. Die Aufstellung der Teilfunktionen erfolgt dabei in direkter Anlehnung an Abschnitt 3.3.2.2, sodass hier nicht mehr detailliert auf die Funktionstruktur eingegangen wird, sondern lediglich die Teilfunktionen und die gefundenen Lösungsprinzipien genannt und bei Bedarf kurz erläutert werden.

**Speicherung des Druckwerkstoffes** Die Speicherung des Druckwerkstoffes hängt vom Verfahren ab. Beim Multi-Jet Modeling und der Multiphase-Jet Solidification liegt er zunächst in fester Form vor, beim Poly-Jet Modeling ist er flüssig. Dies muss bei Lösungsfindung für den Speicher berücksichtigt werden. Dieser muss die Teilfunktionen *Druckwerkstoff speichern* und *Druckwerkstoff nachfüllen* erfüllen. Der zugehörige morphologische Kasten ist in Tabelle A.1 dargestellt.

Die Speicherung kann dabei in einem festen Reservoir erfolgen, das durch eine Verbindung von Substratmaterial zu einem quaderförmigen Tank gebildet werden kann. Alternativ kann ein Tank aus einem metallischen Werkstoff oder Kunststoff gefertigt werden. Auch ein zylinderförmiger Tank aus einem verschlossenen Quarz-, Silizium-, Keramik- oder Glasrohr ist denkbar. Weitere Lösungsmöglichkeiten wären eine Gummiblase oder ein softlithographisch hergestelltes Reservoir aus PDMS. Für kleinere Flüssigkeitsvolumina und Integration des Tanks in ein Mikrosystem würden sich zudem Kanalstrukturen oder Kapillare innerhalb des Substrats als Fluidspeicher anbieten.

Das Nachfüllen des Druckwerkstoffes erfordert bei thermoplastischen Druckwerkstoffen, diese entweder zunächst zu verflüssigen und anschließend in flüssiger Form in den Tank einzufüllen oder aber der Tank ist offen, sodass auch ein Feststoff, beispielsweise ein Granulat, eingefüllt werden kann. Ob der Tank offen oder druckdicht geschlossen ausgeführt werden kann, ist von der Fördereinrichtung abhängig, die den Druckwerkstoff aus dem Reservoir in die Druckeinheit befördert. Auf diesen Aspekt wird weiter unten eingegangen. Lösungsmöglichkeiten für das Nachfüllen bei einem geschlossenen Tank wären zum Beispiel ein Ventil oder eine Gummimembran, durch das beziehungsweise die flüssiger Werkstoff eingespritzt werden kann. Ein offener Tank kann entweder einfach durch Eingießen befüllt werden oder durch Ausnutzung der Oberflächenkräfte im Fluid in dünnen Kanalstrukturen, das heißt Kapillarkräfte.

**Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes** Beim Subsystem zur Änderung des Aggregatzustandes muss ebenfalls strikt nach den Verfahrensprinzipien unterschieden wer-

den. So wird beim Multi-Jet Modeling und der Multiphase-Jet Solidification eine Einrichtung zum Aufschmelzen des thermoplastischen Druckwerkstoffes benötigt, beim Poly-Jet Modeling hingegen muss eine Polymerisation eines unvernetzten Monomers mittels UV-Strahlung erfolgen. Tabelle A.2a zeigt den morphologischen Kasten für das entsprechende Subsystem für das Multi-Jet Modeling und die Multiphase-Jet Solidification. Dort gliedert sich die Gesamtfunktion in die Teilfunktionen *Energie stellen*, *elektrische in thermische Energie umwandeln* und *Temperatur messen* auf.

Das Stellen der Energie kann dabei auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. So können beispielsweise Halbleiterschalter, wie bipolare Transistoren, Feld-Effekt-Transistoren oder Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT) zum Einsatz kommen. Der bipolare Transistor wird dabei über einen schwachen Steuerstrom angesteuert, FETs und IGBTs können demgegenüber fast leistungslos durch eine Spannung geschaltet werden. Im morphologischen Kasten wird jedoch nicht zwischen den Transistortypen unterschieden, vielmehr geht es darum, welche Form das Ausgangssignal hat. So kann mithilfe eines Transistors einerseits eine analoge Ausgangsspannung eingestellt werden, andererseits kann das Verfahren der Pulsweitenmodulation zum Einsatz kommen, das eine Leistungsstellung an einem Verbraucher bei konstanter Gleichspannung durch Variation von Pulslängen ermöglicht. Zudem ist es möglich, den Transistor als einfachen Schalter zu verwenden. Die Alternativen zu Halbleiterschaltern sind ein elektromechanisch betätigter Schalter, auch Relais genannt, oder ein einstellbarer Widerstand, der jedoch den großen Nachteil hat, dass in ihm sämtliche nicht dem Wandler zur Verfügung gestellte elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt wird. Zudem wäre in kleinen Größenmaßstäben ein elektrostatisch betätigtes Mikrorelais denkbar, aber auch ein elektrothermisch betätigtes Schaltelement in Form eines Bimetallschalters wäre eine mögliche Lösung zur Energiestellung. Für weiterführende Informationen siehe [19] und [2].

Die Umwandlung elektrischer in thermische Energie kann im einfachsten Fall über einen elektrischen Widerstand erfolgen. Dieser kann entweder als Draht ausgeführt sein oder in Form einer dünnen Schicht auf einem Substrat. Zudem könnte ein Kaltleiter eingesetzt werden, dessen Widerstands-Temperatur-Kennlinie nichtlinear ist. Bei höheren Temperaturen steigt sein elektrischer Widerstand überproportional an und es kommt automatisch zu einer Strombegrenzung. Weiterhin möglich wäre die Verwendung eines Peltier-Elements, das sich den thermoelektrischen Peltier-Effekt zunutze macht, bei dem durch einen Stromfluss durch zwei unterschiedliche dotierte Halbleiter, ein Thermopaar, Wärme von einer Seite des Elements zur anderen transportiert wird. Zuletzt könnte auch der elektrokalorische Effekt zur Umwandlung elektrischer in thermische eingesetzt werden. Dabei ändert sich die Temperatur eines bestimmten elektrokalorischen Materials durch Änderung der elektrischen Feldstärke im Material. Die beiden letztgenannten Lösungen sind jedoch im Vergleich zu Widerständen die erheblich teurere und aufwändigere Lösung. Weitere Informationen zu Peltier-Elementen können [21] entnommen werden.

Die Messung der Temperatur kann wiederum über verschiedene physikalische Wirkprinzipien erreicht werden, so zum Beispiel thermoresistiv durch Änderung des elektrischen Widerstandes eines Bauteils bei Änderung seiner Temperatur. Dies kann über einen NTC- oder PTC-Thermistor mit nichtlinearer Kennlinie, einen Platin-Messwiderstand mit linearer Kennlinie oder einen auf ein Substrat aufgebrachtten Dünnschicht-Messwiderstand erfolgen. Auch Halbleiter eignen sich zur Temperaturmessung, da sich die Flussspannung bei Transistoren und Dioden in Abhängigkeit von der Temperatur ändert. Dies machen sich auch integrierte Halbleiter-Temperatur Sensoren zunutze, die einen zur Temperatur proportionalen Ausgangsstrom liefern. Für die Mikrominiatur-

risierung besonders interessant ist die Lösung der Temperaturmessung mittels eines in Resonanz befindlichen Schwingers aus Quarz. Dessen Resonanzfrequenz steht in direktem Zusammenhang mit der Temperatur und erlaubt somit eine einfache Temperaturmessung. Auch der Seebeck-Effekt, der bei Thermoelementen ausgenutzt wird, eignet sich zur Temperaturmessung. Dabei entsteht an zwei unterschiedlichen, am Messpunkt miteinander verbundenen Metalldrähten eine Spannung, die proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen ist. Weitere Varianten wären in der Form von Thermopiles denkbar, die ebenfalls auf dem thermoelektrischen Effekt beruhen, allerdings keine Wärme durch Leitung, sondern stattdessen durch Strahlung vom Messobjekt aufnehmen. Dieses charakteristische Merkmal der berührungslosen Messung findet sich auch beim Bolometer wieder, das jedoch thermoresistiv die Temperatur ermittelt. Zudem könnten auch ein Bimetallbalken oder ein pyroelektrisches Element zum Einsatz kommen. Letzteres basiert auf dem Effekt, dass piezoelektrische Materialien auf eine zeitliche Temperaturänderung mit einer Ladungstrennung reagieren, die als Spannung am Kristall gemessen werden kann. Zu guter Letzt wäre auch ein Silizium-Spreading-Resistance-Sensor, bei dem die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von n-dotiertem Silizium ausgenutzt wird, eine Möglichkeit zur Temperaturmessung. Näheres ist in [22] und [23] nachzulesen.

Beim Poly-Jet Modeling müssen, wie in Tabelle A.2b zu sehen, lediglich die beiden Teilfunktionen *Energie stellen* und *elektrische Energie in Strahlungsenergie umwandeln* erfüllt werden. Das Stellen der Energie kann dabei mit denselben prinzipiellen Lösungen durchgeführt werden, die oben bereits beschrieben wurden. Für das Umwandeln elektrischer Energie in UV-Strahlung kann entweder eine UV-Laserdiode eingesetzt werden, die jedoch den Nachteil hat, dass sie nicht zur flächigen Bestrahlung des Bauteils geeignet ist und zeilenweise über dieses geführt werden müsste, oder es können UV-Leuchtdioden verwendet werden, die dieses Problem nicht aufweisen. Ebenfalls geeignet, jedoch mit größerem erforderlichem Bauraum, wäre eine Quecksilberdampf-Lampe oder eine Quecksilberdampf-Niederdruck-Lampe.

**Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinrichtung** Der Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinheit setzt sich aus den Teilfunktionen *Druckwerkstoff leiten*, *Energie stellen*, *elektrische in mechanische Energie umwandeln*, *Volumenstrom messen* und *Druckwerkstoff fördern* zusammen. Mögliche Teillösungen sind im morphologischen Kasten in Tabelle A.3 aufgelistet.

Die Leitung des Druckwerkstoffes kann beispielsweise über flexible Mikroschläuche aus Kunststoff oder metallische, keramische oder aus Kunststoff bestehende Rohre geleitet werden. Auch Kapillare und Kanalstrukturen innerhalb eines Substrates können zum Transport des flüssigen Druckwerkstoffes eingesetzt werden [23].

Auf das Stellen der Energie muss an dieser Stelle nicht mehr näher eingegangen werden, da hier genau die gleichen Lösungen zum Einsatz kommen können, die weiter oben schon erläutert wurden. Zur Umwandlung der elektrischen in mechanische Energie hingegen konnten wieder diverse Lösungen gefunden werden, die auf verschiedenen Prinzipien beruhen. Zunächst einmal muss gesagt werden, dass die Art des Wandlers die spätere Fördereinrichtung beeinflusst. Soll der Werkstoff durch Druckbeaufschlagung des Reservoirs gefördert werden, bieten sich Linearaktoren an. Soll die Förderung stattdessen über Pumpeinrichtungen mit rotierenden Elementen erfolgen, sind Aktoren mit rotatorischem Antrieb wie beispielsweise Elektromotoren besser geeignet. Der auf Elektromagnetismus basierende Motor stellt auch die erste Lösung für diese Teilfunktion dar. Andere Varianten wären ein piezoelektrisch betätigter Ultraschallmotor,

ein elektrostatischer Mikromotor oder ein Inchworm-Antrieb. Letzterer ist ein Linearaktor und basiert auf der Klemmung eines zylindrischen Stabes durch drei separat ansteuerbare piezokeramische Elemente, die den Stab in Längsrichtung transportieren. Weitere Linearaktoren könnten durch massive Piezokeramiken in Form von Stapeln, Stapeln mit Hebelübersetzung, Biegewandlern, Biegescheiben, Streifen oder Tubusse realisiert werden. Ebenfalls möglich wären Bimetalle zum Auslenken eines Kolbens, ein thermopneumatisch angetriebener Kolben, bei dem ein Gas durch Erwärmung expandiert und die dabei nötige Arbeit verrichtet, oder ein Dehnstoffelement, das durch Erhitzen und Verflüssigen eines Feststoffes wie Wachs Arbeit verrichtet. Die letzte gefundene Lösungsmöglichkeit wäre eine Formgedächtnislegierung, die je nach Ausführung temperaturbedingt einen intermetallischen Phasenwechsel vom Martensit in Austenit durchläuft und dabei durch Umklappen des Metallgitters ihr Volumen ändert. Dieser Effekt könnte ebenfalls zum Antrieb eines Kolben verwendet werden. Weiterführende Details sind in [2], [20], [24] sowie [25] einzusehen.

Zur Messung des Volumenstroms gibt es wieder eine Vielzahl möglicher Varianten. Es sollen hier lediglich die Varianten betrachtet werden, die prinzipiell einfach technisch zu realisieren sind und für eine Miniaturisierung in Frage kommen. Einen vollständigen Überblick über Strömungssensoren ist in [22] gegeben. Die hier gefundenen Lösungen entstammen zudem [23] und [19]. So ist ein oft in der Mikrofluidik anzutreffender Strömungssensor ein Hitzdrahtanemometer. Hierbei wird ein in die Strömung ragender Draht durch einen elektrischen Strom erhitzt, sodass ein von der Strömungsgeschwindigkeit abhängiger Wärmestrom vom Draht in das Fluid übergeht. Durch die Messung des Stromes kann so auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Andere Varianten messen die Kraftwirkung auf eine Membran unter Ausnutzung des piezoresistiven Effektes oder einer elektrostatischen Wirkung. Auch mechanische Zähler in Form von Zahnradzählern, Turbinen oder Schwebekörper, die aufgrund des Staudruckes im Fluid ausgelenkt werden, sind denkbare Lösungen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Druckmedium durch ein Magnetfeld strömen zu lassen. Aufgrund der Lorentzkraft auf die Ladungsträger im Fluid kommt es dabei zur Ladungstrennung und Entstehung einer Spannung, die gemessen werden kann und die proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Druckwerkstoffes ist. Zu guter Letzt könnte auch eine Ultraschall-Durchflussmessung erfolgen. Hierbei kommt es durch das strömende Fluid zwischen Ultraschallsender und -empfänger zu einer Laufzeitverzögerung des Signals, durch deren Erfassung auf die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids geschlossen werden kann.

Die letzte Teilaufgabe sieht die Förderung des Druckwerkstoffes vor. Diese kann, wie bereits weiter oben angesprochen, durch Beaufschlagen des Tanks mit einem Überdruck oder durch eine Impulsübertragung an das Fluid erfolgen. Beispiele für letztere Variante sind Dreh- und Kreiskolbenpumpen, Drehschieberpumpen, Zahnradpumpen, Förderschnecken sowie Exzentrerschnecken, Impellerpumpen, Hubkolbenpumpen und Sinuspumpen. Die Förderung durch Beaufschlagung des Druckwerkstofftanks mit Überdruck hingegen könnte entweder durch einen mit einem Linearaktor angetriebenen Kolben erfolgen oder durch Erwärmen und Expandieren eines ebenfalls im Tank befindlichen Treibgases. Dieses könnte auch hinter einer Membran eingeschlossen sein, um zu verhindern, dass es bei geöffnetem Tank entweicht. In [23] sind zudem vier verschiedene Typen von Mikropumpen angegeben, die sich ebenfalls für die Förderung des Druckwerkstoffes eignen. Eine oft in der Mikrofluidik anzutreffende Pumpenvariante besteht dabei aus einer Membran, die das Fluid aus einer Kavität verdrängt, die durch zwei Ventile abgesperrt ist. Diese Ventile erlauben nur einen Fluidstrom in eine Richtung, sodass die gesamte Anordnung



zur Förderung des Fluids geeignet ist. Die Auslenkung der Membran kann hierbei entweder thermopneumatisch, das heißt durch Erhitzen und Expandieren eines Gases mithilfe eines Dünnschichtwiderstandes, piezoelektrisch oder elektrostatisch erfolgen. Eine weitere Mikropumpe nutzt den elektrohydrodynamischen Effekt. Dabei werden durch ein äußeres elektrisches Feld verschiedene Raumladungszonen in einer Flüssigkeit mit niedriger elektrischer Leitfähigkeit, die zu einer Kraftwirkung auf das Fluid im elektrischen Feld führen, erzeugt. Die mit einer solchen Pumpe erzeugten Volumenströme und Gegendrücke sind vergleichsweise hoch.

**Antreiben der Achsen** Das Antreiben der Achsen ist ebenso wie das weiter unten behandelte Heizen der Bauplattform Teil der übergeordneten Funktion des gezielten Austrags des Druckwerkstoffes. Der Antrieb der Achsen erfordert die Lösungsfindung für die Teilfunktionen *Energie stellen, elektrische in mechanische Energie umwandeln, mechanische in mechanische Energie umwandeln, Weg oder Position messen, Achsen mit einem Freiheitsgrad mechanisch fixieren* und *Bauplattform parallel ausrichten*. Der zugehörige morphologische Kasten ist in Tabelle A.4 dargestellt. Auf die ersten beiden Teilfunktionen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, da die hierfür gefundenen Lösungen bereits in den zuvorstehenden Abschnitten erläutert wurden.

Die Übertragung mechanischer in mechanische Energie bedarf jedoch einer Erklärung. Gemeint ist hiermit, die Übertragung mechanischer Energie unter Umformung der Größen Kraft und Weg bei translatorischen oder Moment und Winkelgeschwindigkeit bei rotatorischen Antrieben. Dies wird durch Getriebe erzielt, die verschiedene Ausprägungsformen annehmen können. So zum Beispiel käme hierfür eine Hebel-Kinematik, ein Schraubgetriebe, also eine Gewindespindel, ein Zahnriemen, ein Zahnradgetriebe wie zum Beispiel Stirn- oder Planetengetriebe oder ein Schneckengetriebe als Lösung in Frage. Ebenfalls einsetzen ließen sich ein Reibradgetriebe, bei dem die Leistung durch reibschlüssige Übertragung stattfindet, oder ein Kurvengetriebe, zu denen beispielsweise auch die Nockenwelle mit den zugehörigen Nocken in Hubkolbenmotoren gehört. Es wäre aber genauso gut denkbar, überhaupt kein Getriebe einzusetzen und die mechanische Energie, die der Aktor bereitstellt, direkt zu nutzen. Für weitere Informationen zu Getrieben empfiehlt sich die Lektüre von [26].

Die Messung der absoluten Position oder des zurückgelegten Weges auf einer der Achsen erfolgt im einfachsten Fall resistiv durch eine Anordnung, bei der ein Schleifer auf einer Widerstandsbahn mitgeführt wird. Der eingestellte Widerstand hängt somit direkt mit der Position zusammen. Auch induktive Wegaufnehmer sind prinzipiell geeignet. Repräsentativ wurde hier im morphologischen Kasten ein Differentialtransformator aufgeführt, bei dem eine Spule in Längsrichtung mittig zwischen zwei weiteren Spulen angeordnet ist. Eine Auslenkung der mittleren Spule führt zu einer entsprechenden Asymmetrie der beiden Sekundärspannungen der äußeren Spulen, wodurch direkt auf die Auslenkung der Kernspule geschlossen werden kann. Vereinfachte Varianten nutzen keine innere Spule, sondern stattdessen einen Permanentmagneten. Prinzipiell auch einsetzbar, hier aber aufgrund der höheren Komplexität nicht aufgeführt, wären gepulste induktive Linear-Positionssensoren. Näheres hierzu ist ebenso wie zu allen anderen hier genannten Weg- und Positionssensoren in [22], [19] und [27] nachzulesen. Ein weiteres induktives Abstandsmesssystem ist ein Wirbelstromsensor, der im Wesentlichen aus einer Spule besteht, die einen Wirbelstrom in ein elektrisch leitendes Messobjekt induziert. Dieser Wirbelstrom erzeugt wiederum ein Magnetfeld, das gemäß der Lenzschen Regel ein dem erzeugenden

Primärfeld entgegengerichtetes Magnetfeld erzeugt. Diese Rückwirkung ist messtechnisch durch die Änderung der Spulenimpedanz feststellbar und erlaubt somit einen Rückschluss auf die Entfernung zwischen Messspule und Messobjekt. Ebenfalls zur Abstandsmessung ausnutzen lässt sich die Änderung der Kapazität eines Plattenkondensators bei Variation des Plattenabstandes. Durch Schaltung des Messkondensators in einen RC-Schwingkreis kann über die Änderung der Resonanzfrequenz auf den Abstand geschlossen werden. Kapazitive Wegaufnehmer zeichnen sich durch hohe Wegauflösung und Temperaturstabilität aus, reagieren jedoch im Gegensatz zu induktiven Wegaufnehmern sehr empfindlich auf Verschmutzung. Weitere einsetzbare Lösungen wären magnetische Abstandssensoren, diese können beispielsweise auf dem Hall-Effekt basieren. Hierbei wird ausgenutzt, dass an einem Halbleiter-Plättchen, das in Längsrichtung von einem Strom durchflossen und senkrecht dazu einem Magnetfeld ausgesetzt ist, bedingt durch die Lorentzkraft auf die Ladungsträger, eine elektrische Spannung, die Hall-Spannung, in vertikaler Richtung abfällt. Wird der Abstand zwischen Hall-Sensor und dem Erzeuger des Magnetfeldes, also einer Spule oder eines Permanentmagneten, geändert, so verändert sich dementsprechend die Hall-Spannung, was zur Abstandsmessung ausgenutzt werden kann. Ein anderer nutzbarer Effekt ist der magnetoresistive Effekt, der bei allen leitfähigen Materialien auftritt. Hierbei ändert sich der elektrische Widerstand durch Anlegen eines äußeren magnetischen Feldes. Dies kann wiederum durch dieselbe Anordnung wie beim Hall-Sensor zur Abstandsmessung verwendet werden. Sollen größere Wegänderungen erfasst werden, ist jedoch die Hintereinanderschaltung vieler einzelner magnetoresistiver Aufnehmer, an denen das äußere Magnetfeld in Längsrichtung entlanggeführt wird, erforderlich. Man erhält durch Analyse der Widerstände der einzelnen Aufnehmer ein charakteristisches Signal, durch das auf die aktuelle Position des Erregers geschossen werden kann. Ebenfalls oft anzutreffen sind PLCD-Aufnehmer, bei denen ein weichmagnetischer Kern auf ganzer Länge von einer Sekundärspule und an beiden Ende von jeweils einer kurzen Primärspule umwickelt ist. Ein Dauermagnet wird entlang dieser Anordnung bewegt und führt zu einer magnetischen Sättigung und damit Auftrennung des Kerns. So können die jeweiligen Primärspulen nur noch auf einen Teil der Sekundärspule wirken und das an der Sekundärspule anliegende Ausgangssignal hängt in Amplitude und Phasenlage von der Position des Dauermagneten ab. Somit kann recht einfach eine Abstandsmessung erfolgen. Weiterhin nutzbar sind Foliensensoren, bei denen ein Magnet durch Annäherung eine lokale Sättigungszone in einer weichmagnetischen Folie erzeugt. Diese führt zu einer Abnahme der effektiven Foliensfläche, die dadurch erfasst werden kann, dass die Folie als Kern einer Auswertespule, als Abschirmschicht eines Wirbelstromaufnehmers oder als Kopplungsschicht eines transformatorischen Aufnehmers eingesetzt wird. Eine weitere Familie von Abstandssensoren nutzt den magnetostruktiven Effekt aus. Hierbei kommt es durch Anlegen eines äußeren magnetischen Feldes an bestimmte Materialien zu einem elastischen Verformungsimpuls, der sich mit Schallgeschwindigkeit im Material ausbreitet. Durch geeignete Anordnung eines Wellenleiters und eines äußeren Magneten kann durch Messung der Laufzeit dieses Impulses direkt auf die Position des Magneten relativ zum Aufnehmer geschlossen werden. Neben den bereits genannten Sensoren können auch Ultraschallsensoren, bei denen durch Messung der Signallaufzeit auf den Abstand geschlossen werden kann, und optische Sensoren eingesetzt werden. Ein Beispiel für einen optischen Sensor wäre ein Interferometer, bei dem ein Lichtstrahl durch eine geeignete Anordnung von Spiegeln und einen Strahlteiler geleitet und zur Interferenz gebracht wird. Wird ein Spiegel in Längsrichtung bewegt, ändert sich das Interferenzmuster entsprechend und es kann hierdurch auf die Wegänderung des Spiegels geschlossen werden. Ein anderer optischer Sensor wäre ein Triangulationssensor, bei

dem eine Lichtquelle auf das Messobjekt strahlt und der reflektierte Lichtstrahl durch eine Optik auf einen positionsempfindlichen Detektor gelangt. Eine Änderung des Abstandes zwischen Lichtquelle und Messobjekt führt zu einer Änderung des Winkels zwischen einfallendem und vom Detektor empfangenen Strahl. Aufgrund dieser Winkeländerung wird der Detektor nun an einer anderen Stelle beleuchtet, sodass durch die Verschiebung des Lichtpunktes auf dem Detektor auf die Abstandsänderung zwischen Messobjekt und Lichtquelle geschlossen werden kann. Zu guter Letzt ließe sich auch eine Anordnung aus einer Lichtquelle wie beispielsweise einer Leuchtdiode, eines Empfängers, eines in Längsrichtung verschiebbaren optischen Gitters und eines Abtastgitters zur Abstandsmessung nutzen. Wird das verschiebbare Gitter relativ zum Abtastgitter verschoben, kommt es zu periodischen Helligkeitsschwankungen, die durch den Empfänger erfasst und auf eine Abstandsänderung zurückgeführt werden können.

Die mechanische Fixierung der Achsen muss alle sechs Freiheitsgrade bis auf einen translatorischen Freiheitsgrad fixieren. Hierzu kommen klassische Linearführungen wie Achsen mit Kugelumlauf-Linearlagern oder Gleitlagern und Schienen mit Nadellagern oder Gleitlagerschienen in Frage. Ebenfalls denkbar und weniger konventionell wäre eine magnetische oder elektrostatische Einspannung des sich auf den Achsen bewegenden Schlittens. Je nach Ausführung des mechanischen Getriebes wäre es zudem auch möglich, ganz auf eine Führung zu verzichten, wenn beispielsweise spielfreie Gewindespindeln eingesetzt werden, die bereits eine hinreichend exakte Führung ermöglichen.

Die Ausrichtung der Bauplattform parallel zur Druckebene ist für gute Druckergebnisse unabdingbar. Hierzu muss die Bauplattform an allen vier Ecken durch eine Anordnung unterstützt werden, die in ihrer Höhe verstellbar ist. Durch geeignete Änderung der Höhen der Ecken kann die Plattform parallel zum Druckkopf ausgerichtet werden. Hierzu in Frage kommen prinzipiell alle Aktormechanismen, die elektrische in mechanische Energie umsetzen, wie beispielsweise Piezoaktoren, Formgedächtnislegierungen und Dehnstoffelemente, die bereits in den zuvorstehenden Abschnitten erläutert wurden. Zusätzlich könnte eine manuelle Einstellung über Stellschrauben oder einen Hebelmechanismus erfolgen, was jedoch aufgrund der geringen Abmessungen des Systems Schwierigkeiten bereiten könnte. Weiterhin könnte die Bauplattform in vier Spulen gelagert werden, sodass durch Einstellung des elektrischen Stromes in den Spulen die Auslenkung der Bauplattform beeinflusst werden könnte. Auch die Ausnutzung des magnetostriktiven Effektes, das heißt die Geometrieänderung durch Anlegen eines Magnetfeldes, könnte an dieser Stelle sinnvoll ausgenutzt werden. Es sei angemerkt, dass für die Ansteuerung der genannten Energiewandler wiederum ein vollständiger Regelkreis aus Energiesteller, Abstandssensor und Regler erforderlich ist. Der Einfachheit halber wurde dies jedoch bei der Aufstellung der Funktionsstruktur in Abschnitt 3.3.2.2 vernachlässigt.

**Bauplattform heizen** Das ebenfalls zum übergeordneten Subsystem des gezielten Austrags des Druckwerkstoffes gehörige Untersystem zur Heizung der Bauplattform kann funktionell in die Teilfunktionen *Energie stellen*, *elektrische in thermische Energie umwandeln*, *thermische Energie in Plattform einleiten* und *Temperatur messen* aufgegliedert werden. Das Heizen der Bauplattform erfolgt dabei zum Zwecke besserer Haftung des ausgetragenen Druckwerkstoffes an die Plattform. Dargestellt ist der Lösungsfindungsprozess im morphologischen Kasten in Tabelle A.5.

Das Stellen der elektrischen Energie sowie die Umwandlung in thermische Energie und die

Messung der Temperatur bedürfen an dieser Stelle keiner weiteren Erklärung, da sie bereits zuvor ausführlich behandelt wurden. Die Einleitung der thermischen Energie in die Bauplattform kann jedoch auf unterschiedliche Arten, die hier kurz beschrieben werden sollen, erfolgen. So kann das Heizelement in direktem Kontakt mit der Bauplattform stehen und die Wärme durch Leitung an diese übertragen werden. Nachteilig hierbei ist der relativ hohe thermische Kontaktwiderstand bedingt durch Oberflächenrauigkeiten der Kontaktflächen. Abhilfe schafft der Einsatz einer Paste mit hoher Wärmeleitfähigkeit, die zwischen das Heizelement sowie die Bauplattform aufgetragen wird und einen eventuell vorhandenen Spalt ausfüllt. Alternativ könnte das Heizelement auch direkt in die Bauplattform integriert sein. Im einfachsten Fall könnte dies zum Beispiel ein Dünnschichtwiderstand auf der Rückseite eines als Bauplattform eingesetzten Substrats aus Silizium, Quarz, Glas oder Keramik sein. Befindet sich das Heizelement aufgrund räumlicher Gegebenheiten nicht direkt an der Bauplattform, so könnte zur Wärmeleitung entweder ein massiver Leiter aus beispielsweise Kupfer oder Silber zum Einsatz kommen oder stattdessen eine Heatpipe, bei der die Wärme im Innern konvektiv durch ein Medium transportiert wird. Dieses durchläuft einen Phasenwechsel, wodurch der Wärmeübergangskoeffizient drastisch reduziert und der übertragbare Wärmestrom vergrößert wird. Schlussendlich ließe sich auch ein eigenständiger Fluidkreislauf zum Transport der Wärme einsetzen, jedoch wäre diese Lösung mit einem erheblichen zusätzlichen Aufwand durch den Einsatz einer Pumpe, eines Energiestellers, eines Ausgleichsreservoirs und eines Wärmeübertragers für die Wärmeabgabe vom Heizelement an das Fluid [23] verbunden.

#### 3.3.3.2 Kombinieren von Teillösungen

Nachdem nun die gefundenen Lösungsprinzipien im Einzelnen erläutert wurden, sollen für jedes Subsystem, wie bereits oben erklärt, vier Lösungsvarianten unter Berücksichtigung der Verträglichkeit der Teillösungen untereinander und unter Berücksichtigung der Anforderung an das Gesamtsystem erstellt werden. Dabei stellt in den Kästen die rot markierte Linie eine prinzipiell einfach technisch zu realisierende Variante dar. Die grüne Lösung ist der roten teils recht ähnlich und soll lediglich eine Alternative zur ersten Variante darstellen. Die violett gefärbte Linie stellt demgegenüber eine Lösungsvariante dar, die sich durch eine potentielle Eignung zur Umsetzung in einem Mikrosystem auszeichnet und die orange markierte Lösung hebt sich dadurch hervor, dass sie für ein wenig miniaturisiertes System infrage kommt und weitgehend auf konventionelle technische Lösungen zurückgreift. Dafür ist die orange Variante mit geringerem zukünftigem Entwicklungsaufwand verbunden, als beispielsweise die violett markierte. Weitere Unterschiede werden in Abschnitt 3.3.4 behandelt.

**Speicherung des Druckwerkstoffes** Die erste mögliche Lösungsvariante (rot) verwendet eine zylindrische Röhre aus Glas oder Quarz und ist vertikal montiert und offen ausgeführt, das heißt nur nach unten hin geschlossen. So kann einfach Druckwerkstoff nachgefüllt werden, und aufgrund der Transparenz des Reservoirs ist eine einfache optische Kontrolle des Füllstandes möglich. Die zweite Variante (grün) kombiniert im Gegensatz dazu einen metallischen oder aus Kunststoff hergestellten Tank in klassischer Bauweise und ist geschlossen ausgeführt. Die Abdichtung wird über eine Gummimembran vorgenommen. Bei der dritten Variante (orange), die denselben Tank verwendet, findet die Abdichtung stattdessen über ein Sperrventil statt, das Flüssigkeit bei entsprechenden Druckverhältnissen in den Tank hineinlässt, diese aber nicht

wieder zurückfließen kann. Die Variante für die Mikrominiaturisierung (violett) setzt auf eine Speicherstruktur aus Kapillaren innerhalb des Substrats und wird ebenfalls durch Kapillare befüllt. Die Flüssigkeit steigt dabei aufgrund der Oberflächenkräfte eigenständig in den Tank, der im Gegensatz zu den drei anderen Varianten jedoch nur ein geringes Flüssigkeitsvolumen aufnehmen kann.

**Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes** Für die thermische Verflüssigung des Druckwerkstoffes beim Multi-Jet Modeling und bei der Multiphase-Jet Solidification nutzt eine mögliche Lösungsvariante (rot) einen bipolaren Transistor, um analog den Ausgangsstrom zu stellen, in Kombination mit einem Widerstandsdraht als Heizelement und einem Thermistor zur Temperaturmessung. Dies ist eine sehr einfache und kostengünstige Variante. Eine Alternative (orange) verwendet die gleichen Komponenten zur Energiestellung und Energiewandlung, jedoch unter Einsatz eines Platin-Messwiderstandes. Auch möglich ist die Kombination (grün) der Ansteuerung eines Widerstandsdrahtes über Pulsweitenmodulation und Temperaturmessung mittels eines Halbleiter-Fühlers. Die mikrominiaturisierte Lösungsvariante (violett) setzt auf einen Transistor zum Schalten eines Dünnschicht-Widerstandes und Messung der Temperatur über die Änderung der Resonanzfrequenz eines Schwingquarzes.

Im Gegensatz dazu ergeben sich bei der strahlungsinduzierten Polymerisation beim Poly-Jet Modeling Lösungsvarianten, die eine UV-Laserdiode über einen Transistor analog ansteuern (grün), eine UV-Leuchtdiode über einen Transistor schalten (rot) oder eine solche Leuchtdiode über einen Transistor analog ansteuern (violett). Zwischen diesen drei Varianten bestehen nur sehr geringfügige Unterschiede, wohingegen die letzte Variante (orange) ein elektromechanisches Relais zum Schalten einer Quecksilberdampf-Niederdruck-Lampe verwendet. Hierdurch sind zwar aufgrund der hohen UV-Strahlungsintensität der Niederdruck-Lampe kurze Aushärtungszeiten garantiert, jedoch ist eine Miniaturisierung aufgrund des erforderlichen großen Bauraums stark eingeschränkt.

**Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinrichtung** Die erste Lösungsvariante (rot) für den Transportmechanismus überträgt den flüssigen Druckwerkstoff durch einen flexiblen Mikroschlauch und stellt über einen bipolaren Transistor einen elektrostatischen Energiewandler, der eine Membranpumpe mit zwei Sperrventilen antreibt. Die Messung des Volumenstroms erfolgt durch eine Kraftmessung an einer Membran durch Ausnutzung der Widerstandsänderung eines piezoresistiven Elements bei Verformung. Diese Variante zeichnet sich dadurch aus, dass sie gut miniaturisierbar ist und in der Mikrofluidik technisch bereits erfolgreich umgesetzt wurde. Eine weitere Lösungsvariante (grün) fördert den Druckwerkstoff nicht durch Impulsübertragung in einer Pumpe, sondern durch Druckbeaufschlagung des Tanks. Hierzu wird der Druck im Tank durch einen Kolben erhöht, der durch Erhitzen eines Gases, also thermopneumatisch, betätigt wird. Die Energiestellung erfolgt über einen schaltenden Transistor und die Messung des Durchflusses geschieht mittels eines thermischen Flusssensors, also beispielsweise eines Hitzdrahtanemometers. Bei dieser Variante kommt ebenfalls ein flexibler Mikroschlauch zur Leitung des Druckwerkstoffes zum Einsatz. Sie zeichnet sich durch ihre technisch einfache Realisierbarkeit und hohe Zuverlässigkeit sowie geringe Komplexität aufgrund einer geringen Anzahl beweglicher Teile aus. Jedoch dürfte mit einer hohen Trägheit des Systems und schlechter Steuerbarkeit des Volumenstroms zu rechnen sein. Ganz ähnliche Eigenschaften weist die dritte Variante

(violett) auf, die zur Leitung des Druckmediums auf Kapillare setzt und den Druckwerkstoff ebenfalls durch Druckbeaufschlagung des Tanks fördert. Hierbei wird das Gas im Tank erhitzt, sodass eine Kraft auf das Fluid direkt ohne dazwischengeschalteten Kolben ausgeübt wird. Die Messung des Volumenstroms erfolgt auch hier über einen thermischen Flusssensor. Nachteilig ist auch bei dieser Lösungsvariante die hohe Trägheit des Systems und die daraus resultierende schlechte Steuerbarkeit des Volumenstroms. Soll ein konstanter Volumenstrom gefördert werden, überwiegen die Vorteile der hohen Zuverlässigkeit und einfachen Realisierbarkeit diesen Nachteil allerdings. Die letzte Lösungsvariante (orange), die sich durch einen hohen geförderten Volumenstrom und den Einsatz möglichst konventioneller Lösungskonzepte auszeichnet, kombiniert eine Zahnradpumpe mit einem Zahnradzähler zur Messung des Volumenstroms. Der Antrieb der Pumpe erfolgt über einen mittels Pulsweitenmodulation angesteuerten Elektromotors und die Leitung des Druckwerkstoffes findet durch metallische oder aus Kunststoff bestehende Rohre statt.

**Antreiben der Achsen** Das Antreiben der Achsen könnte nach der Variante (rot) so funktionieren, dass ein piezoelektrischer Inchworm-Antrieb über einen Feld-Effekt-Transistor gestellt wird und ohne zusätzliches Getriebe die jeweilige auf Gleitlagerschienen geführte Achse antreibt. Die Abstandsmessung erfolgt hierbei über einen potentiometrischen, das heißt resistiven, Wegaufnehmer und die Justierung der Bauplattform wird durch Lagerung der Bauplattform in Spulen realisiert. Diese Variante ist relativ robust und mechanisch einfach umzusetzen. Die zweite Lösungsvariante (grün) setzt ebenfalls auf die Energiestellung mithilfe eines bipolaren Transistors, steuert damit jedoch einen massiven Piezowandler an, der aufgrund des geringen Stellweges auf eine Hebelübersetzung angewiesen ist. Die Führung der Achsen erfolgt wiederum auf Gleitlagerschienen und die Abstandsmessung wird inkrementell über einen photoelektrischen Sensor mit Gittermaßstab durchgeführt. Zur Justage der Bauplattform kommen hierbei genau wie für den Antrieb der Achsen massive Piezoaktoren zum Einsatz. Auch diese Variante dürfte sich durch hohe Robustheit auszeichnen, weist jedoch aufgrund des erforderlichen Hebelgetriebes und der aufwändigeren Positionsmessung eine höhere Komplexität als die erste Lösungsvariante auf. Die für die Mikrominiaturisierung vorgesehene Lösungsvariante (violett) umfasst einen elektrostatischen Linearaktor, der über einen Feld-Effekt-Transistor angesteuert wird und ohne zusätzliches Getriebe die Achsen antreibt. Diese sind magnetisch eingespannt, was eine reibungsfreie Führung ermöglicht. Die Wegmessung erfolgt über einen PLCD-Sensor und die Justage der Bauplattform wird mithilfe massiver piezoelektrischer Wandler durchgeführt. Die letzte Lösungsvariante (orange), die sich durch einen geringen Miniaturisierungsgrad auszeichnet, verwendet konventionelle Komponenten in Form eines Elektromotors, der die mittels Lineargleitlager geführten Achsen über eine Gewindespindel antreibt. Die Energiestellung erfolgt wiederum über einen bipolaren Transistor und die Wegmessung wird der Einfachheit halber resistiv durchgeführt. Eine Justage der Bauplattform kann aufgrund der geringeren Miniaturisierung manuell über Stellschrauben erfolgen. Diese Lösungsvariante dürfte aufgrund der konventionellen Konzeption technisch einfach zu realisieren sein, ist jedoch weniger robust als die drei anderen Lösungsvarianten und erfordert zudem einen größeren Bauraum.

**Bauplattform heizen** Das Heizen der Bauplattform erfolgt im einfachsten Fall (rot) durch analoge Ansteuerung eines Widerstandsdrahtes, der in direkten Kontakt mit der Bauplattform

gebracht wird, mithilfe eines bipolaren Transistors. Die Temperaturmessung erfolgt thermoresistiv über einen NTC- oder PTC-Thermistor. Ganz ähnlich ist die zweite Lösungsvariante (orange), die jedoch zur Temperaturmessung einen Platin-Messwiderstand verwendet. Die mikrominiaturisierte Variante (violett) verwendet im Gegensatz dazu als Heizelement einen über einen Transistor geschalteten Dünnschicht-Widerstand, der direkt in die Bauplatzform integriert ist. Auch die Temperaturmessung erfolgt über einen integrierten Dünnschicht-Messwiderstand. Dadurch ist diese Variante sehr robust und lässt sich auf kleinstem Bauraum umsetzen. Zudem sind die Wärmekapazitäten der Plattform und des Heizelements aufgrund der geringen Größe sehr klein, was eine einfache Temperatur-Regelung ermöglicht. Die letzte Variante (grün) schließlich verwendet wiederum einen Widerstandsdraht, der über einen Transistor geschaltet wird. Die thermische Ankopplung findet nun zur Verringerung des thermischen Kontaktwiderstandes über Wärmeleitpaste statt und die Temperaturmessung basiert hier auf der Änderung der Flussspannung eines Halbleiter-Bauelements, wie beispielsweise einer Diode oder eines Transistors. Diese Variante ähnelt von den Eigenschaften und dem erforderlichen Bauraum den ersten beiden Lösungsvarianten.

#### 3.3.4 Bewertung der Lösungen

In diesem letzten Arbeitsschritt des Konzipierens sollen die vier in Abschnitt 3.3.3.2 erstellten Lösungsvarianten miteinander verglichen und eine der Varianten für die weitere Entwicklung ausgewählt werden. Als Vergleichskriterien eignen sich die in Tabelle 3.4 aufgeführten Hauptmerkmale. Aufgrund des frühen Stadiums der Entwicklung stehen jedoch noch keine quantitativen Beurteilungskriterien zur Verfügung, die durch eine Ausarbeitung des Konzeptes im Entwurfsprozess zunächst festgelegt werden müssten. Daher soll im Folgenden auch keine systematische Bewertungsmethode, wie beispielsweise eine Nutzwertanalyse, durchgeführt werden, sondern lediglich ein Vergleich hinsichtlich der Kriterien Funktion, Wirkprinzip, Gestaltung, Sicherheit, Ergonomie und Fertigung erfolgen. Wirtschaftliche Kriterien und die Aspekte Kontrolle, Montage, Transport, Gebrauch, Instandhaltung, Recycling und Aufwand werden dabei aufgrund der geringeren Relevanz in diesem frühen Entwicklungsstadium zunächst vernachlässigt.

**Speicherung des Druckwerkstoffes** Die erste Variante (rot) erfordert aufgrund der Zylinderform des Tanks eine spezielle Halterung, mit der der Tank im Gehäuse fixiert wird. Das zugrundeliegende Wirkprinzip ist sehr einfach, da der Werkstoff durch simples Einfüllen in den Tank gelangt. Wegen der offenen Bauweise lassen sich jedoch Prozessgrößen wie Druck und Temperatur schlechter beherrschen als bei einer geschlossenen Bauweise. Zudem ergibt sich hieraus der sicherheitstechnische Nachteil, dass Druckwerkstoff leicht austreten kann. Andererseits kann sich anders als bei den geschlossenen Bauformen kein kritischer Überdruck aufbauen. Die Tankform zeichnet sich durch geringe Komplexität aus, nutzt den zur Verfügung stehenden Raum jedoch aufgrund der Zylinderform nicht sehr effizient aus. Aus ergonomischer Sicht gewährleistet diese Lösungsvariante einen einfachen Befüllungsvorgang und ermöglicht bei Verwendung von Glas oder Quarz als Material eine optische Überprüfung des Füllstandes. Da Röhren aus verschiedenen Materialien und mit diversen geometrischen Abmessungen bereits fertig erhältlich sind, entfällt eine Eigenfertigung.

Die zweite und letzte Lösungsvariante (grün und orange) unterscheiden sich an dieser Stelle nicht wesentlich. Außer einer optionalen Einrichtung zur Verhinderung eines kritischen Über-

**Tabelle 3.4:** Kriterien für die Bewertung von Lösungsvarianten in der Konzeptphase [16]

Hauptmerkmal	Beispiele
Funktion	Eigenschaften erforderlicher Nebenfunktionsträger, die sich aus dem gewählten Lösungsprinzip oder aus der Konzeptvariante zwangsläufig ergeben
Wirkprinzip	Eigenschaften des oder der gewählten Prinzipien hinsichtlich einfacher und eindeutiger Funktionserfüllung, ausreichender Wirkung und geringer Störgrößen
Gestaltung	geringe Zahl von Komponenten, geringer Grad der Komplexität, geringer Raumbedarf, keine Werkstoff- und Auslegungsprobleme
Sicherheit	Bevorzugung der unmittelbaren Sicherheitstechnik, möglichst keine zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen erforderlich, Gewährleistung von Arbeits- und Umweltsicherheit
Ergonomie	Mensch/Maschine-Beziehung zufriedenstellend, keine unzumutbaren Belastungen oder Beeinträchtigungen, gutes Design
Fertigung	gebräuchliche Fertigungsverfahren, wenige Fertigungsschritte, keine aufwendigen Vorrichtungen, geringe Teilezahl, einfach gestaltete Teile
Kontrolle	wenige Kontrollen oder Prüfungen, die einfach durchgeführt werden können und sicher in der Aussage sind
Montage	leicht, sicher und schnell durchführbar, möglichst wenig Hilfsmittel erforderlich
Transport	gebräuchliche (vorhandene) Transportmittel, möglichst geringes Risiko
Gebrauch	einfacher Betrieb, lange Lebensdauer, geringer Verschleiß, leichte (selbsterklärende) Bedienung
Instandhaltung	wenig und einfach durchzuführende Wartung und Inspektion, problemlose Instandsetzung (Reparatur)
Recycling	leichte Werkstofftrennung, gute Verwertbarkeit, problemlose Beseitigung und Deponie
Aufwand	Keine besonderen Betriebs- und Nebenkosten, geringe Terminrisiken

drucks und zur Überprüfung des Füllstandes sind keine zusätzlichen Nebenfunktionsträger erforderlich. Das Wirkprinzip umfasst das Einspritzen des Druckwerkstoffes durch eine Membran respektive ein Sperrventil und ist dadurch komplexer als bei der ersten Lösungsvariante. Dafür sind die Prozessgrößen Druck und Temperatur durch die geschlossene Bauweise besser beherrschbar. Auch ein Austritt von Druckwerkstoff ist hierdurch nicht mehr möglich. Dafür kann sich jedoch ein sicherheitskritischer Überdruck aufbauen. Die Tankgestaltung zeichnet sich bei diesen Varianten durch eine komplexere Tankgeometrie und eine dementsprechend effizientere Nutzung des Bauraums aus. Die Fertigung kann bei einem Kunststofftank durch Spritzgießen oder bei einem metallischen Tank beispielsweise durch ein Gießverfahren hergestellt werden.

Die für die Mikrominiaturisierung geeignete Lösungsvariante (violett) bedarf eines Substrats, in das die Kapillarstruktur aufgenommen wird. Möglicherweise sind zusätzliche Sperrventile erforderlich, um einen Rückfluss des Druckmediums zu unterbinden. Das auf Kapillarkräften basierende Wirkprinzip ist sehr einfach und ermöglicht eine ergonomische Befüllung des Tanks, allerdings sind Druck und Volumenstrom beschränkt und schlecht beeinflussbar bedingt durch die Geometrie der Kapillare. Zudem ist das Tankvolumen äußerst gering und eine Füllstandskontrolle ist nicht ohne zusätzliche Messeinrichtungen möglich. Die Gestaltung des Tankes ist äußerst einfach direkt im Substrat möglich und nutzt somit den zur Verfügung stehenden Bauraum sehr effizient aus. Sicherheitstechnische Bedenken lassen sich bei dieser Lösungsvariante aufgrund der geringen im Tank enthaltenen Menge an Druckmedium nicht äußern. Die Fertigung erfolgt



mit Mitteln der Mikrotechnik, beispielsweise mittels einer anisotropen Tiefenätzung und anschließenden Verschlusses des erzeugten Grabens mittels Silizium-Oberflächentechnik oder über einen isotropen physikalischen Ätzvorgang, einen daran anschließenden isotropen Ätzprozess und Verschluss der Kapillare mittels einer CVD-Schicht. Auch durch Bonden mehrerer Substrate könnte eine entsprechende Kanalstruktur hergestellt werden.

**Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes** Beim Multi-Jet Modeling und der Multiphase-Jet Solidification erfordert die erste Lösungsvariante (rot) zusätzlich zu den dargestellten Hauptfunktionsträgern noch ein System zum Einleiten der Wärme vom Heizdraht in das Druckmedium. Das zugrundeliegende Wirkprinzip ist sehr einfach, da lediglich elektrische Energie, bedingt durch den elektrischen Widerstand des Heizdrahtes, in thermische Energie umgewandelt wird. Die Energiestellung kann dabei sehr einfach durch Änderung des Basisstromes des bipolaren Transistors geändert werden, sodass sich eine einfache und reaktionsschnelle Regelung der Temperatur erzielen lässt. Als Störgröße tritt hauptsächlich die durch den thermischen Kontaktwiderstand bedingte Temperaturdifferenz zwischen Druckmedium und Temperaturmessfühler auf. Das Heizsystem weist dabei keinerlei bewegliche Teile auf und besitzt eine geringe Komplexität. Dementsprechend hoch ist die Zuverlässigkeit. Eine Gefährdung tritt durch die hohen Temperaturen am Heizdraht und durch die hohen Temperaturen des Druckmediums auf. Die Variante ist insofern sehr ergonomisch, als dass lediglich die Ziel-Temperatur in der Host-Software eingestellt wird und ein Regelkreis die Heizleistung stets so steuert, dass die Temperatur des Druckmediums der Zieltemperatur entspricht. Eine anderweitige Nutzerinteraktion findet nicht statt. Die Fertigung erfolgt sehr einfach und kostengünstig durch Verwendung konventioneller elektronischer Bauteile.

Die zweite (grün) und vierte (orange) Lösungsvariante unterscheiden sich, abgesehen von möglicherweise höheren Kosten für den Platin-Messwiderstand bei der vierten Variante, im Gegensatz zum Thermistor und dem bei der zweiten Lösung abweichenden Prinzip bei der Energiestellung kaum von der ersten Variante.

Erst die dritte Variante (violett) zeichnet sich wieder durch einige Eigenheiten aus. So kann bedingt durch die direkte Integration von Heiz- und Messwiderstand in das Substrat der bei der ersten Lösungsvariante anfallende Nebenfunktionsträger zur Wärmeeinleitung in das Druckmedium entfallen. Dies führt auch zu einer baulich kompakteren Gestaltung des Subsystems. Der Temperatursensor ist bei dieser Lösungsvariante im Gegensatz zum Messwiderstand oder Halbleiterfühler bei den anderen Varianten etwas komplexer, kann jedoch einfach in ein Mikrosystem integriert und mit konventionellen mikrotechnischen Fertigungsmethoden hergestellt werden. Die Aspekte, die Sicherheit und Ergonomie betreffen, unterscheiden sich bei dieser nicht von denjenigen der ersten Variante. So ist auch hier eine Gefährdung durch heiße Bauteile gegeben und die Temperaturregelung erfolgt nach Festlegung der Zieltemperatur automatisch.

Die erste Lösungsvariante (rot) beim Poly-Jet Modeling ist bedingt durch den Einsatz einer Leuchtdiode durch eine hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer geprägt. Jedoch ist die Strahlungsleistung geringer als beim Einsatz eines Lasers oder einer Quecksilberdampf-Niederdruck-Lampe. Als Nebenfunktionsträger sind ein Diffusor zur homogenen Verteilung der Strahlung auf die gesamte Bauplattform und eine Halterung für das Belichtungssystem erforderlich. Aus Sicht der Gestaltung ist diese Lösungsvariante sehr platzsparend und sticht durch einen geringen Leistungsbedarf des verwendeten Leuchtmittels heraus. Sicherheitsprobleme ergeben sich in

Zusammenhang mit einer Gefährdung des Bedieners durch UV-Strahlung. Die Steuerung erfolgt automatisch oder manuell über die Software und erfordert ansonsten keine weitere Interaktion mit dem Bediener. Zudem kann bei der Fertigung auf handelsübliche elektronische Komponenten zurückgegriffen und eine Eigenentwicklung umgangen werden.

Im Gegensatz dazu setzt die zweite Lösungsvariante (grün) auf einen Laser als Strahlungsquelle, was eine zusätzlich Einrichtung zum Abscannen der gesamten Oberfläche nötig macht. Dies ist mit verhältnismäßig hohem Aufwand verbunden, da neben einer Halterung für das System zusätzlich eine Optik und insbesondere ein einstellbarer Spiegel inklusive Aktorik und Ansteuerelektronik benötigt werden. Diese höhere Komplexität macht das System zudem fehleranfälliger. Dennoch zeichnet es sich weiterhin durch eine sehr hohe Lebensdauer der verwendeten Diodenlaser aus. Darüber hinaus nimmt diese Variante mehr Platz ein als die erste, ist jedoch immer noch vergleichsweise platzsparend und zeichnet sich zudem durch einen ebenfalls sehr geringen Leistungsbedarf aus. Zusätzlich zur Gefährdung durch UV-Strahlung allgemein ergibt sich bei Verwendung eines Lasers das Problem, dass die Strahlung über eine sehr hohe Intensität verfügt. Die Kosten sind im Vergleich zur ersten Variante aufgrund der höheren Kosten für UV-Laserdioden größer, aber immer noch vergleichsweise gering.

Die dritte Lösungsvariante (violett) unterscheidet sich von der ersten nur insofern, als dass die Strahlungsleistung der Leuchtdiode verändert werden kann. Somit sind jedoch bei den erzeugten Bauteilen auch Eigenschaftsgradienten, insbesondere in der mechanischen Festigkeit, realisierbar.

Die vierte Variante (orange) schließlich verwendet als Strahlungsquelle eine Quecksilberdampf-Niederdruck-Lampe, die im Gegensatz zu den drei anderen Lösungen eine wesentlich weniger aufwändige Optik für eine homogene Ausleuchtung erfordert, da sie bereits sehr homogen abstrahlt. Somit ist im Wesentlichen nur noch ein Reflektor und eine entsprechende Alterung erforderlich. Probleme ergeben sich bei diesem Leuchtmittel in Bezug auf Lebensdauer und Zuverlässigkeit, die wesentlich geringer als bei Laserdioden oder LEDs sind. Auch das verwendete elektromagnetische Relais ist fehleranfällig und erzeugt beim Schalten elektromagnetische Störimpulse. Zudem bedarf diese Variante eines sehr großen Bauraumes und zum Betrieb sind hohe Spannungen erforderlich. Weiterhin ist die Leistungsaufnahme größer als bei den anderen Varianten. Die hohe Betriebsspannung führt darüber hinaus ebenso wie der Einsatz giftiger Stoffe wie Quecksilber und die Schnittgefahr bei Zerschneiden des Glaskörpers des Leuchtmittels zu sicherheitstechnischen Problemen. Auch diese Variante lässt sich durch Verwendung im Handel erhältlicher Komponenten realisieren, ist jedoch im Vergleich zu den anderen Lösungen mit höheren Kosten verbunden.

**Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinrichtung** Die erste Lösungsvariante (rot), die eine elektrostatische Mikropumpe zur Förderung und eine Membran zur Messung des Volumenstroms einsetzt, benötigt als Nebenfunktionsträger Schlauchverbindungen zwischen dem flexiblen Mikroschlauch, Tank und Druckkopf sowie Schlauchhalterungen und eine Einrichtung zur gezielten Schlauchführung bei bewegtem Druckkopf. Insgesamt werden aber durch die hohe Integration des Systems bei dieser Variante wenige Nebenfunktionsträger benötigt. Das Prinzip der verwendeten Membranpumpe ist praxiserprobt, jedoch liefert sie nur einen geringen Volumenstrom von 10  $\mu\text{l}/\text{min}$  bis 1200  $\mu\text{l}/\text{min}$  bei kleinen Gegendrücken von 100 hPa bis 1200 hPa [23]. Der elektrostatische Antrieb erfolgt zwar einerseits fast leistungslos, erfordert andererseits jedoch hohe Spannungen, was sicherheitstechnische Konsequenzen nach sich zieht, da die Gefahr

eines Durchschlags besteht. Zudem sind die verwendete Pumpe ebenso wie der Strömungssensor aufgrund ihrer hohen Komplexität fehleranfällig und empfindlich gegenüber Verunreinigungen des Druckmediums. Ebenfalls nachteilig ist die Rückwirkung auf den Fluidstrom durch die zur Messung des Volumenstroms verwendete Membran. Vorteilhaft bei dieser Lösungsvariante ist demgegenüber der geringe erforderliche Bauraum durch die hohe Integration der Komponenten, die beispielsweise direkt im Substrat des Druckkopfes vorgenommen werden kann. Eine Nutzerinteraktion findet lediglich beim Einstellen des Zielwertes für den Volumenstrom des Druckmediums in der Host-Software statt und spielt daher eine untergeordnete Rolle. Die Fertigung erfolgt mit Mitteln der Mikrotechnik und im Falle der verwendeten Schläuche durch Mikroextrusion. Letztere sind jedoch im Handel erhältlich.

Die zweite Lösungsvariante (grün) zeichnet sich im Gegensatz zur ersten Variante durch die Förderung des Druckwerkstoffes durch Druckbeaufschlagung des Tanks mittels eines thermopneumatisch angetriebenen Kolbens aus. Dementsprechend sind neben den Schlauchverbindungen und Schlauchführungen eine Abdichtung des Tanks und ein Kolben mitsamt thermopneumatischer Antriebseinheit am Tank erforderlich. Das zugrundeliegende Wirkprinzip ist einfacher als das der ersten Variante und erfordert keine aufwändige und fehleranfällige Pumpe. Aufgrund der hohen Kräfte und Stellwege des thermopneumatischen Antriebs sind hohe Volumenströme realisierbar. Es kommt jedoch zu einer thermischen Belastung zumindest der Antriebseinheit. Der verwendete thermische Flusssensor hat im Gegensatz zur Membran bei der ersten Lösungsvariante den großen Vorteil, rückwirkungsfrei zu arbeiten. Allerdings ist das Förderungssystem nach dieser Variante weniger hoch integriert und erfordert durch den zusätzlichen Kolben am Tank einen höheren Bauraum als die erste Variante. Die Zeitkonstante des thermopneumatischen Antriebs ist zudem vergleichsweise hoch, wodurch sich die Regelung des Systems als schwieriger herausstellt. Zudem kommt es bei Änderung der Umgebungstemperatur zu einer Volumenänderung des Treibgases des Kolbens und damit zu einem ungewollten Austritt des Druckwerkstoffes. Die hohen Temperaturen und Drücke im thermopneumatischen Antrieb sowie der hohe Überdruck im Tank stellen darüber hinaus ein potentiell Sicherheitsrisiko dar. Die Fertigung des Sensors erfolgt mit mikrotechnischen Mitteln, die Schläuche werden ebenfalls durch Mikroextrusion hergestellt beziehungsweise als Zukaufteile bezogen und das Kolbensystem am Tank wird konventionell gefertigt.

Der zweiten Variante recht ähnlich ist die dritte Lösungsvariante (violett), die auch thermopneumatisch arbeitet, jedoch auf einen Kolben verzichtet und stattdessen das gesamte im Tank enthaltene Gas als Treibgas verwendet. Somit entfällt im Gegensatz zur zweiten Variante der Kolben und die Abdichtung des Tanks vereinfacht sich wesentlich. Ansonsten sind die gleichen Nebenfunktionsträger erforderlich. Auch die das Wirkprinzip betreffenden Aspekte wie Komplexität und Fehleranfälligkeit unterscheiden sich hier nicht wesentlich von der zweiten Variante. Was die Störungen betrifft, gibt es jedoch Unterschiede. So ändert sich das im Tank enthaltene Gasvolumen abhängig vom Füllstand des Tanks. Dies führt zu einer vom Füllstand abhängigen Charakteristik des thermopneumatischen Antriebs, der überdies eine noch höhere Zeitkonstante als bei der zweiten Variante aufweist. All das führt zu einer erheblichen Vergrößerung des Aufwandes bei der Regelung des Fördersystems. Zudem besteht die Gefahr, dass das Treibgas bei leerem Tank entweichen kann, was aber kein Problem darstellt, wenn Luft als Treibgas eingesetzt wird. Allerdings ist darauf zu achten, dass immer ein bestimmtes minimales Gasvolumen im Tank enthalten ist und das Heizelement des thermopneumatischen Antriebs nie in direkten Kontakt mit dem Druckwerkstoff gelangt. Weiterhin ergeben sich Unterschiede in Hinblick auf die Gestaltung.

So ist der bauliche Aufwand bei Ansteuerung über ein Mikrorelais größer als bei Verwendung eines einfachen Transistors. Zudem begrenzen die verwendeten Kapillare den Durchfluss und sind unflexibel, sodass keine Relativbewegung zwischen Tank und Druckkopf möglich ist. Allerdings ist die Integration aufgrund des fehlenden Kolbens einfacher und der erforderliche Bauraum fällt kleiner aus als bei der zweiten Variante. Zusätzlich zu den oben genannten Gefahrenpotentialen durch hohe Temperaturen und Drücke ergeben sich Sicherheitsrisiken durch die zum Schalten des Mikrorelais erforderlichen hohen Spannungen.

Die letzte gefundene Lösungsvariante (orange) verfolgt einen ganz anderen Ansatz und setzt mit einer über einen Elektromotor angetriebenen Zahnradpumpe und einem Zahnradzähler zur Volumenstromflussmessung auf konventionelle großskalige fluidische Bauteile. Dementsprechend höher fällt die erzielbare Durchflussleistung bei dieser Variante aus. In Verbindung mit einer geeigneten Gestaltung des Druckkopfes könnte dies zu deutlich höheren Baugeschwindigkeiten führen als bei den anderen Lösungsvarianten. Das System zeichnet sich durch eine einfache Regelbarkeit aus, ist jedoch aufgrund vieler bewegter Teile fehler- und verschleißanfällig. Zudem ist die Leistungsaufnahme sehr viel größer als bei den mikrofluidischen Fördersystemen. Dafür ist das System aufgrund der größeren Abmessungen erheblich weniger anfällig gegenüber Verstopfung durch Verunreinigungen im Druckmedium. Erkauft werden die Vorteile durch geringe Integration des Systems und einen erheblich größeren erforderlichen Bauraum. Zudem müssen für alle Teilkomponenten des Fördersystems Halterungen und eine zusätzliche mikroelektronische Auswertungseinheit für die Drehzahlmessung des Zahnradzählers vorgesehen werden. Ebenfalls erforderlich sind druckdichte Verbindungselemente für die Rohre und die einzelnen Komponenten des Systems. Störungen auf das System ergeben sich in elektromagnetischer Form durch Betrieb des Elektromotors und durch Rückwirkung vom Zahnradzähler auf den Fluidstrom bei der Messung des Volumenstroms. Eine potentielle Gefährdung ergibt sich bei dieser Lösungsvariante durch Undichtigkeiten des Leitungssystems oder einer Komponente. Prinzipiell ist diese Gefahr bei den anderen Lösungsvarianten auch gegeben, hier jedoch aufgrund der großen Anzahl separater Komponenten und damit Rohrverbindungen sehr viel größer. Von Vorteil ist bei dieser Variante wiederum, dass die verwendeten Komponenten vergleichsweise günstig erworben werden können. Bei Massenfertigung sind die Kosten jedoch höher als bei den mikrotechnisch realisierten Systemen.

**Antreiben der Achsen** Die erste der gefundenen Lösungsvarianten (rot) verwendet als Hauptantrieb einen Inchworm-Motor ohne zusätzliches Getriebe und als Wegaufnehmer einen potentiometrischen Sensor. Die Lagerung erfolgt über eine Gleitlagerschiene und die Justierung der Bauplattform mittels in Spulen gelagerter Permanentmagneten. Damit erfordert diese Lösungsvariante ein Gehäuse zur Fixierung der verschiedenen Komponenten in Relation zueinander. Zudem müssen eine Vorrichtung zur Verbindung der Antriebsachse des Inchworm-Motors und der Bauplattform sowie Lagerschuhe für die Gleitlagerschiene und ein Schleifer für den potentiometrischen Wegaufnehmer an der Bauplattform vorgesehen werden. Ferner ist eine Festlagerung des Inchworm-Motors am Gehäuse erforderlich. Durch den Einsatz einfacher Wirkprinzipien wie resistive Positionsmessung, piezoelektrischer Hauptantrieb und Gleitlagerung sowie durch den Verzicht auf ein zusätzliches Getriebe ist diese Lösung sehr zuverlässig. Der Antrieb weist einen insgesamt guten Wirkungsgrad auf, erlaubt große Stellkräfte und einen prinzipiell unbeschränkten Stellweg bei sehr hoher Stellgenauigkeit. Die Zeitkonstanten des Antriebs und auch des

Justier-Systeme sind gering und erlauben daher eine einfache Regelung während des Druckvorganges. Potentiell auftretende Störungen sind in erster Linie Reibung in der Gleitlagerung und dem potentiometrischen Wegaufnehmer, bei dem es zudem zu Kontaktproblemen nach langem Stillstand und entsprechender Oxidation der Oberfläche kommen könnte. Ebenfalls problematisch ist die Lagerung der Bauplattform über Magnete in Spulen. Dieses Prinzip erlaubt zwar eine einfache Regelung, bietet aber nur eine sehr geringe Steifigkeit und ist dementsprechend anfällig gegenüber Schwingungen. Die Gestaltung betreffend zeichnet sich diese Lösungsvariante durch eine mittlere Komplexität bei mittlerem erforderlichem Bauraum sowohl für Inchworm-Antrieb als auch Justier-System aus. Aufgrund des fehlenden zusätzlichen Getriebes kann viel Bauraum eingespart werden, allerdings besteht das Problem, dass der Inchworm-Motor eine Linearachse benötigt, deren Länge dem maximalen Stellweg entspricht. Daher muss entsprechender Bauraum für die Achse vorgesehen werden, wenn die jeweilige Achse in die untere Endstellung gefahren wird. Sicherheitsprobleme ergeben sich bei dieser Variante keine und die Ergonomie wird wiederum durch die Host-Software, in der die Steuerung der Achsen stattfindet, bestimmt. Ansonsten ist keine Interaktion mit dem Bediener erforderlich. Die Fertigung des Inchworm-Antriebs erfolgt konventionell oder er wird als Zukaufteil erworben. Gleiches gilt für die Gleitlagerung und den Wegaufnehmer, die entweder fertig gekauft oder mit mikrotechnischen Fertigungsmethoden hergestellt werden können. Das Justier-System hingegen muss auf jeden Fall mikrotechnisch gefertigt werden.

Im Gegensatz dazu setzt die zweite Lösungsvariante (grün) auf einen piezoelektrischen Aktuator mit zusätzlichem Hebelgetriebe zur Vergrößerung des Stellweges und beim Justier-System kommt ebenfalls ein piezoelektrischer Wandler zum Einsatz. Die Wegmessung erfolgt photoelektrisch inkrementell über Messgitter. Dementsprechend sind neben dem ebenfalls zur Fixierung der Bauteile erforderlichen Gehäuse und den Gleitlagerschuhen an der Bauplattform zusätzliche Lagerungen und Einspannungen für das Hebelgetriebe vorzusehen. Außerdem muss für die Wegmessung ein Abtastgitter an die Bauplattform montiert werden. Prinzipiell ist diese Lösungsvariante durch den Einsatz von Piezoaktoren sehr zuverlässig und verfügt über eine hohe Lebensdauer. Allerdings wird diese Zuverlässigkeit durch die hohe Komplexität und damit verbundene Fehleranfälligkeit des Hebelgetriebes gemindert. Dafür können mithilfe des Getriebes ausreichend große Stellwege bei vergleichsweise hohen Stellkräften realisiert werden. Wirkungsgrad und Stellgenauigkeit reichen jedoch nicht an den Inchworm-Antrieb der ersten Lösungsvariante heran. Von Vorteil ist die sehr geringe Zeitkonstante der Piezoaktoren und die damit verbundene einfache Regelung des Systems. Störungen treten wie auch schon bei der ersten Variante in Form von Reibung im Gleitlager auf. Allerdings ist das photoelektrische Messsystem erheblich weniger empfindlich als der potentiometrische Wegaufnehmer und zudem weisen die Piezo-Aktoren des Justier-Systems bei dieser Lösungsvariante eine sehr viel größere Steifigkeit als die entsprechende Aufhängung in Spulen bei der ersten Variante auf, sodass es nicht zu niederfrequenten Schwingungen der Bauplattform kommen kann. Die Komplexität der Antriebe selbst ist bei dieser Lösungsvariante gering, dafür ist jedoch das Hebelgetriebe sehr aufwändig, fehleranfällig und benötigt einen großen Bauraum. Allerdings besteht nicht das Problem einer überstehenden Achse wie beim Inchworm-Antrieb und auch das Justier-System kann direkt in das Substrat der Bauplattform integriert werden. Gefährdungen entstehen bei dieser Lösungsvariante durch hohe erforderliche Spannungen für den Betrieb der Piezoaktoren, die zum elektrischen Durchschlag führen können. Auf ergonomischer Ebene gibt es allerdings keine Unterschiede zur ersten Variante. Was die Fertigung angeht, können die Piezoaktoren

entweder in einem Dünnschichtprozess gefertigt oder als Zukaufteile erworben werden. Das Hebelgetriebe wird entweder konventionell oder mithilfe von Silizium-Oberflächentechnik gefertigt. Auch der Wegaufnehmer kann sowohl mikrotechnisch hergestellt oder im Handel gekauft werden.

Die für die Mikrominiaturisierung vorgesehene Lösungsvariante (violett) nutzt als Hauptantrieb einen elektrostatischen Linearantrieb ohne zusätzliches Getriebe. Die Einspannung der Achse erfolgt dabei über eine permanentmagnetische Aufhängung und zur Wegmessung wird ein PLCD-Sensor verwendet. Die Justierung der Bauplattform erfolgt wie auch schon bei der zweiten Lösungsvariante über Piezoaktoren. Somit müssen als Nebenfunktionsträger zusätzlich zum obligatorischen Gehäuse zur Fixierung der Komponenten Permanentmagnete einerseits für die magnetische Aufhängung und andererseits für den induktiven Wegaufnehmer in der Bauplattform integriert werden. Die Wirkprinzipien dieser Lösungsvariante zeichnen sich durch ihre Einfachheit und damit hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer aus. Es ist kein fehleranfälliges Getriebe für den Antrieb erforderlich, was ebenfalls zu einem hohen Wirkungsgrad des Antriebs führt. Die Stellkräfte des elektrostatischen Aktors sind mit 50 mN vergleichsweise gering, aber immer noch ausreichend. Dafür sind beliebig große Stellwege realisierbar und kleine Winkelfehler innerhalb der Druckebene können ausgeglichen werden. Von Vorteil ist auch die geringe Leistungsaufnahme des elektrostatischen Antriebs, der jedoch über eine vergleichsweise geringe Stellgenauigkeit von  $\pm 50 \mu\text{m}$  verfügt [25]. Die Zeitkonstante des Antriebs liegt ebenfalls im Mittelfeld, diejenige der Piezoaktoren des Justier-Systems ist jedoch sehr gering, sodass eine einfache Regelung auch während des laufenden Druckvorgangs gewährleistet ist. Die Auflösung des PLCD-Wegaufnehmers liegt bei etwa 0,1 % der maximalen Auslenkung [22] und ist damit im Vergleich zu den anderen Wegaufnehmern eher ungenau. Mögliche Störungen könnten durch Überlagerung und damit gegenseitige Beeinflussung der Magnetfelder des Wegaufnehmers und der magnetischen Aufhängung auftreten. Reibung tritt hier, anders als bei den zuvor genannten Lösungsvarianten, keine auf und auch niederfrequente Schwingungen der Bauplattform sind aufgrund der hohen Steifigkeiten der Piezoaktoren des Justier-Systems ausgeschlossen. Allerdings verfügt die magnetische Aufhängung der gesamten Bauplattform über eine große Elastizität und ist damit anfällig gegenüber resonanten Schwingungen. Aus Sicht der Gestaltung zeichnet sich diese Lösungsvariante durch eine geringe Komplexität und nahezu vollständige Integrierbarkeit aller Komponenten in das Substrat der Bauplattform aus. Entsprechend klein ist der erforderliche Bauraum. Sicherheitsbedenken sind hinsichtlich der hohen Spannungen zum Betrieb der Piezoaktoren und des elektrostatischen Antriebs, die zum Durchschlag führen können, zu äußern. Die Herstellung erfolgt durchweg unter Verwendung mikrotechnischer Fertigungstechniken und Materialien.

Die letzte gefundene Lösungsvariante (orange) schließlich setzt auf einen konventionellen, über Elektromotoren angetriebenen Spindelantrieb für die Achsen. Die Lagerung erfolgt dabei über auf Achsen laufende Lineargleitlager und die Wegmessung geschieht, wie auch schon bei der ersten Variante, potentiometrisch. Eine Justierung der Bauplattform muss, anders als bei den anderen Lösungsvarianten, manuell vorgenommen werden. Somit sind als Nebenfunktionsträger wieder ein Gehäuse zur Fixierung der Komponenten, eine Lagerung für die Gewindespindel sowie Gleitlagerachsen im Gehäuse und eine Spindelmutter, die Lineargleitlager sowie ein Schleifer für den potentiometrischen Wegaufnehmer an der Bauplattform zu gestalten. Auch die Stellschrauben für die Justierung der Plattform müssen durch entsprechende zusätzliche Einrichtungen von außen zugänglich gemacht werden. Weiterhin muss eine Schmierung des Spindeltriebes vorgesehen werden. Aufgrund des Einsatzes konventioneller und praktisch

erprobter Wirkprinzipien ist diese Lösungsvariante sehr zuverlässig und die am einfachsten umzusetzende, verfügt jedoch aufgrund der großen Anzahl an beweglichen Teilen über eine verschleißbedingt begrenzte Lebensdauer und ist entsprechend fehleranfällig. Zudem ist der Spindeltrieb nicht spielfrei, was sich in einer geringen Stellgenauigkeit auswirkt. Dafür allerdings sind bei unbeschränktem Stellweg die Stellkräfte und erreichbaren Geschwindigkeiten sehr groß, was jedoch auch durch eine hohe Leistungsaufnahme des Antriebs erkaufte wird. Probleme ergeben sich durch hohe reibungsbedingte Verluste. Dabei tritt Reibung in den Gleitlagern, im Spindelgetriebe, im potentiometrischen Wegaufnehmer und im Elektromotor auf. Letzterer führt im Betrieb zusätzlich zu elektromagnetischen Störungen des restlichen Systems. Auch der potentiometrische Wegaufnehmer verfügt in Form von Kontaktproblemen und Oxidation bei längerem Stillstand über Nachteile, die bereits bei der ersten Lösungsvariante beschrieben wurden. Weiterhin sind die bewegten Massen aufgrund des geringeren Miniaturisierungsgrades bei dieser Lösungsvariante sehr viel größer als bei den drei anderen, was zu entsprechend hohen Trägheitskräften und damit einer mechanischen Beeinflussung des Gesamtsystems führt. Zudem können im Spindeltrieb mechanische Schwingungen induziert werden. Diese Lösungsvariante sticht aus gestalterischer Hinsicht aufgrund der konventionellen Bauweise durch ihre geringe Integration und damit ein geringes Potential zur Miniaturisierung hervor. Sicherheitstechnisch und ergonomisch ergibt sich zudem das Problem, dass der Bediener zur Justierung der Bauplattform direkt mit dem System interagieren muss. Somit muss durch weitere Einrichtungen für einen ausreichenden Schutz des Bedieners gesorgt werden. Die parallele Ausrichtung der Bauplattform gestaltet sich zudem sehr schwierig, sodass auch hier der Bediener durch zusätzliche Mechanismen unterstützt werden muss. Die Fertigung hingegen gestaltet sich sehr unproblematisch und kann im Falle des Spindeltriebes und der Achsen konventionell erfolgen. Alternativ können Gleitlager und Spindeltrieb aber auch im Handel erworben werden. Motor und Wegaufnehmer sind ohnehin als Zukaufteile zu beziehen.

**Bauplattform heizen** Die Lösungsvarianten, die für die Heizung der Bauplattform gefunden wurden, ähneln denjenigen für die Verflüssigung des Druckwerkstoffes beim Multi-Jet Modeling und der Multiphase-Jet Solidification sehr. So basiert die erste Lösungsvariante (rot) auf einem sehr einfachen Wirkprinzip, denn es wird elektrische Energie durch den elektrischen Widerstand eines Heizdrahtes direkt in thermische Energie umgewandelt. Die abgegebene thermische Leistung lässt sich dabei gut über den Basisstrom des ansteuernden Transistors einstellen und erlaubt aufgrund einer geringen Zeitkonstante eine einfache Regelung der Temperatur des Heizelementes. Als Störgröße tritt hier der thermische Kontaktwiderstand zwischen Heizelement und Bauplattform auf, der zu einer Temperaturdifferenz führt. Da keine beweglichen Teile vorhanden sind, weist diese Lösung eine sehr geringe Komplexität auf. Der erforderliche Bauraum ist durch den Einsatz einzelner Bauteile etwas größer als bei einer integrierten Lösung, aber immer noch sehr gering. Zusätzlich vorzusehende Nebenfunktionsträger sind bei dieser Lösungsvariante flexible elektrische Zuleitungen zum Heizelement und entsprechende Vorrichtungen zur Fixierung und gezielten Führung. Ein Sicherheitsrisiko birgt die hohe Oberflächentemperatur der Bauplattform, mit der der Bediener nicht in Berührung kommen darf. Aus ergonomischer Sicht ist das System eher als unkritisch zu betrachten, da die Regelung der in der Host-Software eingestellten Zielparameter automatisch erfolgt. Eine Eigenfertigung des Systems ist nicht erforderlich, da konventionelle im Handel erhältliche elektronische Bauteile verwendet werden können.

Nicht wesentlich von dieser Variante unterscheidet sich die zweite Lösung (grün), die lediglich ein anderes Prinzip bei der Energiestellung und einen Halbleiter-Temperaturfühler anstelle eines Thermistors verwendet. Allerdings kommt es durch den Einsatz von Wärmeleitpaste zwischen dem Heizelement, dem Temperaturfühler und der Bauplattform zu einem geringeren thermischen Kontaktwiderstand und damit zu einer geringeren Störung, da die Temperaturdifferenz verkleinert wird. Ebenfalls sehr ähnlich zur ersten Variante ist die letzte Lösungsvariante (orange), die sich lediglich im Prinzip der Temperaturmessung unterscheidet.

Demgegenüber stellt die dritte Lösungsvariante (violett) eine höher integrierte Lösung dar, denn Heizwiderstand und Messwiderstand sind direkt in die Bauplattform integriert. Entsprechend sind keine zusätzlichen Funktionsträger zur Einleitung der Wärme in die Bauplattform erforderlich. Auch hier kommt das sehr einfache resistive Wirkprinzip bei der Energiewandlung und der Messung zum Einsatz. Die Regelung der Temperatur gestaltet sich jedoch aufgrund der Beschränkung, den Heizdraht entweder mit voller Leistung zu betreiben oder ganz abzuschalten, etwas schwieriger als bei den anderen Lösungsvarianten. Dafür treten aufgrund der räumlichen Nähe zwischen Heizdraht, Sensor und Oberfläche der Bauplattform nur vernachlässigbar geringe Störungen durch thermische Kontaktwiderstände auf. Die Komplexität des gesamten Heizsystems ist sehr gering und der erforderliche Bauraum beschränkt sich durch die hohe Integration auf ein Minimum. Die Aspekte Sicherheit und Ergonomie unterscheiden sich nicht von denjenigen der ersten Lösungsvariante. Lediglich die Fertigung muss hier durch Einsatz mikroelektronischer und mikrotechnischer Fertigungsmethoden während der Herstellung der Bauplattform erfolgen.

**Auswahl eines Verfahrens** Abschließend lässt sich feststellen, dass die Auswahl eines bestimmten Verfahrens für die Weiterentwicklung schwerfällt und maßgeblich von der geplanten Anwendung des Systems und dem zulässigen Aufwand in den weiteren Entwicklungsschritten abhängt. Da die Zielsetzung der Arbeit in der Entwicklung eines miniaturisierten Systems besteht, ist es erstrebenswert, die in den vorangegangenen Abschnitten als dritte Lösungsvariante (violett) beschriebene Lösung umzusetzen. Diese weist den höchsten Miniaturisierungs- aber auch Neuheitsgrad auf. So ist für nahezu alle Subsysteme nach dieser Variante eine Eigenentwicklung und -fertigung erforderlich, da aufgrund der hohen Integration des Systems kaum Zukaufteile aus dem Handel verwendet werden können. Entsprechend hoch ist der weitere Entwicklungsaufwand. Möglicherweise ist es daher zur Reduktion des Entwicklungsaufwandes sinnvoll, für einige der Subsysteme auf die erste (rot) oder zweite (grün) Lösungsvariante zurückzugreifen, die teils ebenfalls stark miniaturisiert sind, dafür aber auf bewährte mikrotechnische Konzepte oder sogar fertige Bauteile zurückgreifen. Die Umsetzung der letzten Lösungsvariante (orange) kommt an einigen Stellen einer direkten Nachempfindung der Konzepte in der makroskopischen Fertigungsmaschine gleich und verfügt nur über ein geringes Potential zur Miniaturisierung. Dafür sind die Konzepte technisch erprobt und ein Großteil der benötigten Bauteile ist im Handel erhältlich. Dementsprechend wäre diese Lösungsvariante mit einem vergleichsweise geringeren Entwicklungsaufwand verbunden.

Um eine endgültige Aussage hinsichtlich der Auswahl einer Konzeptvariante treffen zu können, wäre eine weitere Ausarbeitung der Konzepte erforderlich, bei der sich möglicherweise weitere Probleme, Vor- und Nachteile zeigen, die letztlich die Auswahl einer Variante ermöglichen.

In Hinblick auf das Verfahrensprinzip stellt sich jedoch mit dem Poly-Jet Modeling ein klarer Favorit heraus. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass ein Tintenstrahl Druckkopf, der



einen parallelen Austrag des Druckwerkstoffes ermöglicht, zum Einsatz kommen kann. So wird einerseits die Baugeschwindigkeit drastisch erhöht, andererseits die Komplexität der Kinematik deutlich verringert, da nur noch eine angetriebene Achse anstatt dreier wie bei der Multiphase-Jet Solidification erforderlich ist. Im Gegensatz zum Multi-Jet Modeling besteht ein weiterer großer Vorteil darin, dass der Druckwerkstoff bei Raumtemperatur flüssig vorliegt, sodass eine einfache Verarbeitung möglich ist und das System dabei, anders als beim Multi-Jet Modeling, nicht thermisch belastet wird. So ergibt sich hier auch nicht das Problem verstopfter Zuleitungen durch zu stark erkalteten Druckwerkstoff. Ebenfalls für das Poly-Jet Modeling spricht die Eignung zur Herstellung gradiert stofflicher Bauteileigenschaften durch paralleles Austragen verschiedener Druckwerkstoffe und unterschiedlich starke Belichtung.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend soll kritisch Stellung zur vorliegenden Arbeit genommen werden. Es werden Schwächen erläutert, die erreichten Ziele und solche, die nicht erreicht werden konnten, genannt und eine Einschätzung der zukünftigen Bedeutung des behandelten Themas gegeben. Zudem werden einige Verbesserungsvorschläge für jene, die sich in Zukunft mit diesem Thema befassen wollen, erläutert und darüber hinaus sollen die technische Realisierbarkeit des Konzeptes besprochen und Vorschläge für die Bearbeitung des Themas in zukünftigen Arbeiten gemacht werden.

So weist die vorliegende Arbeit das Problem auf, dass sie lediglich den ersten Schritt eines konstruktiven Prozesses, der eigentlich iterativ erfolgen müsste, darstellt. Daher ist das erarbeitete Konzept noch nicht optimal und bedarf einer weiteren Überarbeitung, bevor die Entwicklung in die Entwurfsphase übergehen kann. Beispielhaft sei hier die Anforderungsliste aufgeführt, die größtenteils qualitativ formuliert wurde. Es gibt nur wenige quantitative Merkmale, was daran liegt, dass zu Beginn des Entwicklungsprozesses noch keine Kenntnisse über die verwendeten Komponenten innerhalb der Subsysteme vorlag und dementsprechend eine Quantifizierung bestimmter Merkmale nicht möglich war. In einem weiteren Iterationsschritt müsste daher nun zunächst eine Quantifizierung der Anforderungsliste und daran anschließend eine Quantifizierung des Bewertungsprozesses erfolgen, der ebenfalls zum aktuellen Zeitpunkt auf Basis nicht quantitativ erfassbarer Kriterien durchgeführt wurde. Weiterhin hätte der Lösungsfindungsprozess in einem Team mit mehreren Leuten stattfinden sollen, da in diesem Fall neben den rein diskursiven Methoden auch intuitive Methoden, wie beispielsweise Brainstorming, Anwendung hätten finden können. Somit hätten unter Umständen mehr Lösungsprinzipien gefunden werden können. Gleiches hätte auch durch Hinzuziehen weiterer Literatur erfolgen können. Ebenfalls problematisch ist die Tatsache, dass lediglich vier verschiedene Lösungsvarianten analysiert wurden. Eine größere Anzahl analysierter Varianten hätte zu einer höheren Variantenvielfalt und damit zu möglicherweise besseren Lösungen geführt. Zuletzt sei angemerkt, dass auch die aufgestellte Funktionsstruktur noch nicht das Optimum darstellt. So hätten eine noch feingliedrigere Zerlegung erfolgen und weitere Funktionsträger mit einbezogen werden können. Zum Beispiel hätte beim Justier-System für die Bauplattform etwas detaillierter vorgegangen und neben der Aktorik Funktionsträger, wie die erforderliche Sensorik zur Lagebestimmung und der zum Aktor gehörige Energiesteller, aufgeführt werden können.

Trotz dieser kleineren Probleme konnte das Ziel der Arbeit zu großen Teilen erreicht werden. Es wurde zunächst eine große Auswahl momentan industriell relevanter generativer Fertigungsverfahren vorgestellt und anschließend wurden unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren einige Prinzipien für die Miniaturisierung ausgewählt. Im darauffolgenden Entwicklungsprozess konnten unter Zuhilfenahme konstruktionsmethodischer Hilfsmittel systematisch Miniaturisierungskonzepte für die ausgewählten Verfahren erstellt, dokumentiert und bewertet werden. Das Ziel der Entwicklung eines mikrominiaturisierten Systems konnte jedoch nur bedingt eingehalten werden. So ist zwar eine der erstellten Lösungsvarianten ein mikrominiaturisiertes Konzept, die anderen Varianten enthalten jedoch auch konventionell feinmechanische Aspekte oder sind gar reine feinmechanische Systeme. Der Übergang zwischen

Mikrosystem und konventionellem feinmechanischem System ist hier fließend und es ist damit zu rechnen, dass auch im späteren Entwurfs-, Ausarbeitungs- und Fertigungsprozess noch feinmechanische Aspekte zu finden sein werden und damit das hergestellte System ein Hybrid beider Welten sein wird. Auch die in der Einleitung genannte Anwendung des Mikrodruckers in einem intelligenten Cluster wurde im entwickelten Konzept nicht berücksichtigt. So müsste jeder Drucker mit einer Schnittstelle zum Austausch von Energie, Informationen und Stoffen mit benachbarten Druckern versehen werden. Zudem müsste entweder jeder Drucker über eine Netzwerkschnittstelle mit einem Zentralrechner verbunden oder sogar ganz auf einen externen Computer verzichtet und die gesamte Steuerlogik in jeden einzelnen Drucker integriert werden.

Was die technische Realisierbarkeit des entwickelten Konzeptes anbelangt, lässt sich feststellen, dass die unterschiedlichen gefundenen Lösungsvarianten einen unterschiedlich großen Aufwand in Bezug auf die technische Umsetzung aufweisen. So dürfte die einfache, rein feinmechanische Lösungsvariante ohne größere Probleme herzustellen sein, während die mikrotechnische Variante mit einem hohen zusätzlichen Entwicklungsaufwand verbunden ist. Da allerdings auch hier nur auf bereits existierende mikrotechnische Systeme und Konzepte zurückgegriffen wurde, sollte auch hier eine technische Realisierung möglich sein. Fraglich ist aber, welcher zusätzliche Aufwand dafür betrieben werden muss. Es sei aber angemerkt, dass zur technischen Umsetzung die Betrachtung zahlreicher weiterer Aspekte, die in dieser Arbeit nicht angesprochen werden konnten, vonnöten ist und zudem nach Abschluss des gesamten Entwicklungsprozesses Prototypen gebaut, getestet und verbessert werden müssen.

Das behandelte Thema hat insofern eine Relevanz für die Zukunft, als dass auch weiterhin ein Bedarf an der schnellen Fertigung von Prototypen und Modellen für verschiedene Einsatzzwecke direkt aus digitalen 3D-Modellen sowie der Herstellung von Werkzeugen und Vorrichtungen mithilfe generativer Fertigungsverfahren bestehen wird. Zudem sind generative Fertigungsverfahren ganz allgemein Gegenstand aktueller Forschung auf dem Gebiet der Fertigungstechnik und besitzen dementsprechend noch ein großes Potential. Weiterhin ist mit der Erschließung neuer Anwendungsmöglichkeiten für generative Verfahren und der Entwicklung neuer Werkstoffe sowie Verfahrensprinzipien zu rechnen. Durch die Verkleinerung der Abmessungen und Kostenreduktion einer Fertigungsmaschine könnten sich darüber hinaus Anwendungen in der Serienfertigung durch Parallelisierung des Druckprozesses ergeben. Weiterhin könnten sich durch das Zusammenschalten vieler einzelner Drucker zu einem größeren Cluster, wie auch schon in der Einleitung ausführlich beschrieben, neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnen. Ein Risiko birgt die Optimierung generativer Fertigungsverfahren für den Einsatz im privaten Sektor. Hier besteht aktuell ein großer Hype um die Notwendigkeit eines 3D-Druckers im heimischen Büro. Die Zukunft wird erst noch zeigen müssen, ob die generativen Fertigungsverfahren in diesem Bereich tatsächlich auf breite Akzeptanz stoßen und die nötigen Anwendungen gefunden werden können. Dennoch hofft der Autor durch Veröffentlichung dieser Arbeit, die Community dazu anzuregen, neben den bereits genannten Potentialen im industriellen Einsatz weitere Anwendungsfelder für eine miniaturisierte generative Fertigungsmaschine im privaten Einsatz zu erschließen und die hier konzeptionell vorgestellte Technologie weiter voranzutreiben.

So könnten zukünftige Arbeiten die oben genannten Schwächen des erarbeiteten Konzeptes beseitigen und den Entwicklungsprozess in Form des gestalterischen Entwurfes der einzelnen Subsysteme und einer Ausarbeitung in Hinblick auf eine spätere mikrotechnische Fertigung fortführen. Parallel könnte in einer anderen Arbeit eine Softwarelösung zur Realisierung des verteilten Drucker-Clusters entwickelt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] GIBSON, I., ROSEN, D. und STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd ed. 2015. New York, NY und s.l.: Springer New York, 2015. ISBN: 978-1-4939-2112-6.
- [2] JENDRITZA, D. J. *Technischer Einsatz neuer Aktoren: Grundlagen, Werkstoffe, Designregeln und Anwendungsbeispiele ; mit 35 Tabellen*. Bd. 484. Kontakt & Studium Elektronik. Renningen-Malmsheim: expert-Verl., 1995. ISBN: 3816912354.
- [3] BÜTTGENBACH, S. *Mikromechanik: Einführung in Technologie und Anwendungen*. Teubner Studienbücher Angewandte Physik. Stuttgart: Teubner, 1991. ISBN: 3519030713.
- [4] RISSE, A. *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN: 978-3-8348-1519-4. DOI: 10.1007/978-3-8348-8312-4.
- [5] MEINDL, M. »Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing«. Diss. München: Techn. Univ., 2005.
- [6] ELSNER, P. C. »3D-Drucktechnologie: Grundlagen zur Herstellung polymerer Bauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften«. Diss. Berlin: Techn. Univ., 2009. URL: <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2009/2483/>.
- [7] DRÖDER, K. »Skript zur Vorlesung Fertigungstechnik«. Sommersemester 2014.
- [8] FRITZ, A. H. und SCHULZE, G. *Fertigungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-642-29785-4. DOI: 10.1007/978-3-642-29786-1.
- [9] GRÜNDER, W. und MARQUARDT, T. *Informationen zum Solid Ground Curing*. URL: <http://inggo.com/teachnet/4565-Das-RPVerfahren-Solid-Ground-Curing-SGC.html?pageID=3250&ID=1139&linkOrdner=1> (besucht am 02.09.2015).
- [10] GEBHARDT, A. *Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 4., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2013. ISBN: 978-3-446-43651-0.
- [11] STRATASYS LTD. *Informationen zur Poly-Jet Technologie*. URL: <http://www.stratasys.com/de/3d-printers/technologies/polyjet-technology> (besucht am 03.09.2015).
- [12] STRATASYS LTD. *Informationen zu Materialien beim Poly-Jet Modeling*. URL: <http://www.stratasys.com/de/materialien/polyjet> (besucht am 03.09.2015).
- [13] POOCZA, L., MILDE, T. und SIEDENBIEDEL, F. *2-Photonen-Polymerisation*. 2008. URL: <http://www.iba-heiligenstadt.de/fachbereiche/biowerkstoffe/2-photonentechnik/2-photonen-polymerisation/> (besucht am 29.10.2015).
- [14] OSTENDORF, A. und CHICHKOV, B. N. *Two-Photon Polymerization: A new Approach to Micromachining*. 2006. URL: <http://www.aerotechgmbh.de/media/246109/TwoPhotonPoly.pdf> (besucht am 29.10.2015).

- [15] FELDHUSEN, J., GROTE, K.-H., PAHL, G. u. a., Hrsg. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-642-29568-3.
- [16] NAEFE, P. *Einführung in das Methodische Konstruieren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012. ISBN: 978-3-658-00001-1. DOI: 10.1007/978-3-658-00002-8.
- [17] BHAGWATI, M. *Informativen zur Konstruktionsmethodik*. 26.06.2013. URL: <http://www.daswirtschaftslexikon.com/d/konstruktion/konstruktion.htm> (besucht am 04.09.2015).
- [18] TEDATA GMBH. *Informationsseite zum Ablauf des Konstruierens*. URL: <http://www.tedata.com/533.0.html> (besucht am 05.09.2015).
- [19] JANOCHA, H., Hrsg. *Aktoren: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer, 1992. ISBN: 3-540-54707-X.
- [20] RODDECK, W. *Einführung in die Mechatronik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN: 978-3-8348-1622-1. DOI: 10.1007/978-3-8348-8626-2.
- [21] SCHAAD, S. *Peltier-Element kurz erklärt*. URL: [http://www.deltron.ch/pdf/produkte/peltier/peltier-element\\_kurz\\_erklaert\\_d.pdf](http://www.deltron.ch/pdf/produkte/peltier/peltier-element_kurz_erklaert_d.pdf) (besucht am 10.09.2015).
- [22] TRÄNKLER, H.-R. und REINDL, L. M. *Sensortechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN: 978-3-642-29941-4. DOI: 10.1007/978-3-642-29942-1.
- [23] VÖLKLEIN, F. und ZETTERER, T. *Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen - Technologien - Anwendungen*. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Elektrotechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006. ISBN: 3-528-13891-2.
- [24] BÄHNISCH, R. »Untersuchungen zu elektrostatischen Rotoren«. Diss. Hannover: Techn. Univ. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh03/367309742.pdf>.
- [25] JANOCHA, H. *Adaptronics and smart structures: Basics, materials, design, and applications; with 17 tables*. 2., rev. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. ISBN: 9783540719656.
- [26] LOOMAN, J. *Zahnradgetriebe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. ISBN: 978-3-540-89459-9. DOI: 10.1007/978-3-540-89460-5.
- [27] SCHULER, M. *Berührungslose magnetische Weg- und Abstandssensoren*. 12.07.2010. URL: [http://www.fernuni-hagen.de/imperia/md/content/fakultaetfuermathematikundinformatik/agjob/vortrag\\_schuler.pdf](http://www.fernuni-hagen.de/imperia/md/content/fakultaetfuermathematikundinformatik/agjob/vortrag_schuler.pdf) (besucht am 17.09.2015).
- [28] CASSAIGNAU, A. *Understanding our 60 micrometre layer thickness printing setting*. 2015. URL: <http://www.sculpteo.com/blog/2015/04/30/60%C3%82%C2%B5m-layer-thickness-3d-printing/> (besucht am 01.11.2015).
- [29] WIKIPEDIA. *Fused Deposition Modeling*. 2015. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Fused\\_Deposition\\_Modeling](https://de.wikipedia.org/wiki/Fused_Deposition_Modeling) (besucht am 01.11.2015).
- [30] HÖRDLER, N. *News Hördler Engineering*. 2012. URL: <http://www.hoerdler.de/news/news.htm> (besucht am 01.11.2015).

- [31] KALWEIT, A., PAUL, C., PETERS, S. u. a., Hrsg. *Handbuch für technisches Produktdesign: Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. 2., bearb. Aufl. VDI-[Buch]. Berlin: Springer, 2012. ISBN: 978-3-642-02641-6.
- [32] WIKIPEDIA. *Laminated Object Manufacturing*. 2013. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Laminated\\_Object\\_Manufacturing](https://de.wikipedia.org/wiki/Laminated_Object_Manufacturing) (besucht am 01.11.2015).
- [33] MERZ, A. *3D-Druck: Das ABC für den Druckerkauf*. 2014. URL: <http://www.golem.de/news/3d-druck-das-abc-fuer-den-druckerkauf-1412-111249.html> (besucht am 01.11.2015).
- [34] WIKIPEDIA. *Multi Jet Modeling*. 2015. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Multi\\_Jet\\_Modeling](https://de.wikipedia.org/wiki/Multi_Jet_Modeling) (besucht am 01.11.2015).
- [35] PICKERT, C. und WIRTH, M. *Additive Fertigungsverfahren*. 2013. URL: <http://cedifa.de/wp-content/uploads/2013/07/01-AdditiveFertigungsverfahren.pdf> (besucht am 01.11.2015).
- [36] SCHEMPP, H. *Marktübersicht Generative Fertigungsanlagen*. 2011. URL: <http://www.fertigung.de/wp-content/uploads/sites/6/2011/10/M%C3%83%C2%9C-Gen-Ferfe10-11-11-KOMPLETT-f%C3%83%C2%BCrs-Netz-NEU.pdf> (besucht am 01.11.2015).
- [37] STAMPFL, J. und LISKA, R. *Two photon polymerisation (2PP)*. 2015. URL: [http://amt.tuwien.ac.at/projects/two\\_photon\\_polymerization/](http://amt.tuwien.ac.at/projects/two_photon_polymerization/) (besucht am 31.10.2015).
- [38] WIKIPEDIA. *Lasersintern*. 2015. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lasersintern> (besucht am 01.11.2015).
- [39] ZEIDLER, S. *Multi-Jet Modeling*. 2015. URL: <http://medfab.de/3d-druck-verfahren/multi-jet-modeling-mjm/> (besucht am 01.11.2015).

# A Anhang

## A.1 Morphologische Kästen

Die im Folgenden dargestellten morphologischen Kästen dienen der Findung von Lösungsvarianten für die in Abschnitt 3.3.2.2 erarbeitete Funktionsstruktur eines generativen Fertigungsverfahrens. In den Spalten sind die Teilfunktionen für das jeweilige Subsystem aufgetragen und in den Zeilen die gefundenen Teillösungen. Erläuterungen zu den Teillösungen sind in Abschnitt 3.3.3.1 zu finden. Die farbigen Linien stellen demgegenüber verschiedene Lösungsvarianten dar, die in Abschnitt 3.3.3.2 in detaillierter Form beleuchtet und in Abschnitt 3.3.4 einer ausführlichen Bewertung unterzogen werden.

**Tabelle A.1:** Speicherung des Druckwerkstoffes

	A	B
	Druckwerkstoff speichern	Druckwerkstoff nachfüllen
1	dreidimensional gebundene Substrate als Tankwände	flüssigen Werkstoff durch Sperrventil einspritzen
2	Rohr aus Quarz, Silizium, Keramik oder Glas	Einspritzen durch Gummimembran
3	kapillare Struktur in Substrat	Eingießen bei offenem Tank
4	PDMS-Struktur	Einfüllen durch Oberflächenkräfte (bei Kapillaren)
5	Metall- oder Kunststoff-Tank als Teil des Gehäuses	
6	Gummiblase	

Tabelle A.2: Änderung des Aggregatzustandes des Druckwerkstoffes

(a) beim MJM und MJS

(b) beim PJM

	A	B	C
	Energie stellen	el. in therm. Energie umwandeln	Temperatur messen
1	elektronisch analog (bipolarer Transistor, FET, IGBT)	resistiv (Widerstandsdräht)	thermoresistiv (NTC-/PTC-Thermistor)
2	elektronisch digital (PWM) (Transistor)	resistiv (Dünnschichtwiderstand)	thermoresistiv (Platin-Messwiderstand)
3	elektronisch digital (an/aus) (Transistor)	temperaturabhängig resistiv (Kaltleiter)	thermoresistiv (Dünnschicht-Messwiderstand)
4	elektromagnetisch (Relais)	thermoelektrisch (Peltier-Element)	integrierter Halbleiter-Temperatursensor
5	resistiv (einstellbarer Widerstand)	elektrokalendarisch	Flussspannung bei Halbleitern (Transistor, Diode)
6	elektrostatistisch (Mikrorelais)		Änderung der Resonanzfrequenz eines Schwingquarz
7	elektrothermisch (Bimetallschalter)		thermoelektrisch (Thermoelement)
8			thermoelektrisch, Strahlungsmessung (Thermopile)
9			Silizium-Spreading-Resistance-Sensor
10			thermomechanisch (Bimetall)
11			pyroelektrisch
12			thermoresistiv, Strahlungsmessung (Bolometer)

	A	B
	Energie stellen	Energie umwandeln
1	elektronisch analog (bipolarer Transistor, FET, IGBT)	UV Laser Diode (375 nm ... 400 nm)
2	elektronisch digital (PWM) (Transistor)	UV-Leuchtdiode
3	elektronisch digital (an/aus) (Transistor)	Quecksilberdampfampe
4	elektromagnetisch (Relais)	Quecksilberdampf-Niederdrucklampe
5	resistiv (einstellbarer Widerstand)	
6	elektrostatistisch (Mikrorelais)	
7	elektrothermisch (Bimetallschalter)	
8		
9		
10		
11		
12		



Tabelle A.3: Transport des Druckwerkstoffes zur Druckeinheit

	A	B	D	E	F
	Druckwerkstoff leiten	Energie stellen	el. in mech. Energie umwandeln	Volumenstrom messen	Druckwerkstoff fördern
1	Kanalstruktur im Substrat	elektronisch analog (bipolarer Transistor, FET, IGBT)	elektromagnetisch (Elektromotor)	thermischer Flusssensor (Wärmetransport)	Druckerhöhung im Tank (Kolben)
2	flexibler Mikroschlauch	elektronisch digital (PWM) (Transistor)	thermomechanisch (Bimetall)	piezoelektrisch (Kraft auf Membran)	Druckerhöhung im Tank (thermopneumatisch)
3	Kapillare	elektronisch digital (an/aus) (Transistor)	Formgedächtniseffekt (FGL-Aktor)	elektrostatisch (Kraft auf Membran)	Membran mit Ventilen (thermopneumatisch)
4	Rohre	elektromagnetisch (Relais)	Volumen-Temperatur-Verhältnis (Dehnstoffelement)	mechanisch (Zahnradzähler)	Membran mit Ventilen (elektrostatisch)
5		resistiv (einstellbarer Widerstand)	elektrostatisch (Mikromotor, Linearaktor)	mechanisch (Turbine)	Membran mit Ventilen (piezoelektrisch)
6		elektrostatisch (Mikrorelais)	thermopneumatisch (beheiztes Gas)	mechanisch (Kraft auf Schwebekörper)	elektrohydrodynamisch
7		elektrothermisch (Bimetallschalter)	massiver Piezoaktor (Stapel, Biegeumwandler, Streifen)	induktiv (mag. Flussänderung durch strömendes Fluid)	Drehkolben-/ Kreiskolbenpumpe
8			piezoelektrisch (Inchworm-Antrieb)	akustisch (Ultraschall)	Drehschieberpumpe
9			piezoelektrisch (Ultraschallmotor)		Zahnradpumpe
10					Förderschnecke, Exzentrerschnecke
11					Impellerpumpe
12					Hubkolbenpumpe
13					Sinuspumpe

Tabelle A.4: Antreiben der Achsen

	A	B	C	D	E	F
	Energie stellen	el. in mech. Energie umwandeln	mech. in mech. Energie umformen	Weg oder Position messen	Achsen mechanisch fixieren (1 DOF)	Bauplatzform parallel ausrichten
1	elektronisch analog (bipolarer Transistor, FET, IGBT)	elektromagnetisch (Elektromotor)	Hebelgetriebe	resistiv (Potentiometer)	Achse mit Kugelumlauf-Linearlager	manuell mechanisch (Hebelmechanismus)
2	elektronisch digital (PWM) (Transistor)	thermo-mechanisch (Bimetall)	Schraubgetriebe (Gewindespindel)	induktiv (Differentialtransformator)	Achse mit Lineargleitlager	manuell mechanisch (Schraubgetriebe)
3	elektronisch digital (an/aus) (Transistor)	Formgedächtnis-Effekt (FGL-Aktor)	Zugmittelgetriebe (Zahnriemen)	induktiv (Wirbelstromsensor)	Schiene mit Nadellagern	elektromagnetisch (Elektromotor + Schraubgetriebe)
4	elektromagnetisch (Relais)	Volumen-Temperatur-Verhältnis (Dehnstoffelement)	Zahnradgetriebe (Stirnradgetriebe, Planetengetriebe)	kapazitiver Wegaufnehmer	Gleitlagerschiene	thermo-mechanisch (Bimetall)
5	resistiv (einstellbarer Widerstand)	elektrostatisch (Mikromotor, Linearaktor)	Schneckengetriebe	magnetisch (Hall-Sensor)	magnetische Einspannung	Formgedächtnis-Effekt (FGL-Aktor)
6	elektrostatisch (Mikrorelais)	thermo-pneumatisch (beheiztes Gas)	Reibradgetriebe	magnetisch (PLCD-, Kompensations-Sensor)	elektrostatische Einspannung	Volumen-Temperatur-Verhältnis (Dehnstoffelement)
7	elektrothermisch (Bimetallschalter)	massiver Piezoaktor (Stapel, Biegeumwandler, Streifen)	Kurvengetriebe	magnetisch (Foliensensor)	keine separate Führung	elektrostatisch (Mikromotor, Linearaktor)
8		piezoelektrisch (Inchworm-Antrieb)	kein zusätzliches Getriebe	magneto-resistiv (EMR, XR, AMR, GMR, TMR)		thermo-pneumatisch (beheiztes Gas)
9		piezoelektrisch (Ultraschallmotor)		magnetostruktiver Aufnehmer		massiver Piezoaktor (Stapel, Biegeumwandler, Streifen)
10				Ultraschall-Wegaufnehmer		piezoelektrisch (Inchworm-Antrieb)
11				optisch (Triangulations-sensor)		piezoelektrisch (Ultraschallmotor + Schraubgetriebe)
12				optisch (Interferometer)		magnetisch (Permanentmagnet + Spule)
13				photoelektrischer Sensor mit Glasmaßstab		magnetostruktiv (Bimorpher Balken)

Tabelle A.5: Bauplattform heizen

	A	B	C	D
	Energie stellen	el. in therm. Energie umwandeln	thermische Energie in Plattform einleiten	Temperatur messen
1	elektronisch analog (bipolarer Transistor, FET, IGBT)	resistiv (Widerstandsdräht)	direkter Kontakt Heizelement/ Plattform	thermorestiv (NTC-/PTC-Thermistor)
2	elektronisch digital (PWM) (Transistor)	resistiv (Dünnschichtwiderstand)	Heizelement direkt in Plattform integriert	thermorestiv (Platin-Messwiderstand)
3	elektronisch digital (an/aus) (Transistor)	temperaturabhängig resistiv (Kaltleiter)	Wärmeleitung über Heatpipe	thermorestiv (Dünnschicht-Messwiderstand)
4	elektromagnetisch (Relais)	thermoelektrisch (Peltier-Element)	Wärmeleitung über Kupfer-/Silbermassivkörper	integrierter Halbleiter-Temperatursensor
5	resistiv (einstellbarer Widerstand)	elektrokalendarisch	Leitung über Wärmeleitpaste	Flussspannung bei Halbleitern (Transistor, Diode)
6	elektrostatisch (Mikrorelais)		Fluidkreislauf durch Kanäle in Plattform + Wärmetauscher	Änderung der Resonanzfrequenz eines Schwingquarz
7	elektrothermisch (Bimetallschalter)			thermoelektrisch (Thermoelement)
8				thermoelektrisch, Strahlungsmessung (Thermopile)
9				Silizium-Spreading-Resistance-Sensor
10				thermo-mechanisch (Bimetall)
11				pyro-elektrisch
12				thermorestiv, Strahlungsmessung (Bolometer)
13				