

Prozessbegleitende Geometrievermessung von Druckschichten beim Material Jetting von Aluminium

Christoph M. N. Rehekampff

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth
2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 22.04.2024 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 06.08.2024
angenommen.

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik der Technischen Universität München im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts (Projektnummer 420547518). Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TU München durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Professor Tim Lüth, für die Betreuung meiner Arbeit, seine Unterstützung und die mir gewährten Freiheiten in der Forschung. Ebenso danke ich Professor Wolfram Volk für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit mit seinem Lehrstuhl. Hierbei geht besonderer Dank an Benedikt Kirchner für die gemeinsame Projektbearbeitung. Professor Michael Zäh möchte ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes herzlich danken.

Ein besonderer Dank geht an meinen Mentor Dr. Franz Irlinger für seine zahlreichen Ratschläge und anregenden Diskussionen. Renate Heuser danke ich für ihre Unterstützung in allen Bereichen des Lehrstuhllalltags. Mein Dank gilt ebenso Gerhard Ribnitzky und Markus Wörl, die mich mit der Fertigung zahlreicher Fräs- und Drehteile bei der Projektbearbeitung tatkräftig unterstützt haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen für die angenehme Zusammenarbeit und die vielen fachlichen Diskussionen bedanken. Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihren beständigen Rückhalt und ihre unermüdliche Unterstützung.

Garching, im September 2024

Christoph Rehekampff

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt das additive Fertigungsverfahren „Material Jetting“ für Metalle. Bei diesem Verfahren wird der zu verarbeitende Werkstoff ggf. aufgeschmolzen und anschließend in flüssiger Form auf eine Bauplattform aufgetragen. Während dieses Verfahren für Kunststoffe bereits etabliert ist, befindet es sich für die Verarbeitung von Metallen noch weitgehend im Forschungs- bzw. Entwicklungsstadium.

Aufgrund der relativen Neuheit des Verfahrens besteht der Bedarf nach besserem Einblick in den Druckprozess. Die Erzeugung der frei fliegenden Metalltropfen wird von mehreren Einflussfaktoren beeinflusst, so dass es zu Schwankungen der Tropfengröße kommen kann. Um die genauen Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und resultierenden Tropfen sowie der entstehenden Bauteilgeometrie besser untersuchen zu können, ist ein geeignetes Messsystem erforderlich. Ein solches System würde es erlauben, während des Druckprozesses die gedruckten Bauteilschichten in Echtzeit zu vermessen und eröffnet die Möglichkeit, prozessbegleitende Parameteranpassungen vorzunehmen.

Diese Arbeit beschreibt den Prozess zur Konzeptionierung und Realisierung einer Material-Jetting-Anlage mit integrierter Sensorik zur prozessbegleitenden Geometrievermessung der gedruckten Schichten. Im Anschluss wird das System mit geeigneten Experimenten validiert.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Kurzfassung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1. Anwendung	6
2. Stand der Technik	8
2.1 Additive Fertigungsverfahren	8
2.2 Tropfenerzeugung	11
2.2.1 Continuous Jet.....	12
2.2.2 Drop on Demand.....	13
3. Stand der Forschung zum Material Jetting von Metall	15
3.1 Continuous Jet	15
3.2 Drop on Demand	16
4. Aktuelle Nachteile des Material Jetting von Aluminium	21
5. Ziel und erwartete Vorteile	23
6. Konzept	24
6.1 Struktur	24
6.2 Druckprozess mit integrierter Bauteilvermessung.....	25
7. Unterscheidungsmerkmale zum Stand der Technik und Forschung	30
8. Realisierung	31
8.1 Werkstoff und wesentliche Systemeigenschaften / Definition der quantitativen und qualitativen Eckdaten	32
8.2 Kinematik und Antriebssystem	33
8.3 Druckkopf und Bauplattform	40
8.4 Heizelemente und Temperaturregelung	44
8.5 Inertgas / Regelung des Sauerstoffgehalts	45
8.6 Messsystem zur Geometrievermessung	46
8.6.1 Auswahl eines geeigneten Systems	48
8.6.2 Mechanische Integration und Kühlung des Sensorsystems.....	50
8.6.3 Integration des Sensorsystems in die Steuerung.....	52
8.7 Konstruktion, Fertigung und Montage des Gesamtsystems	53
8.8 Maschinensteuerung und Software	58
8.8.1 Steuerungskonzept	59
8.8.2 G-Code-Definition, Interpreter und Syntax.....	62
8.8.3 Messdatenauswertung in Matlab	63
8.8.4 Individuelle Tropfengrößensteuerung	66

8.9 Inbetriebnahme und Evaluation	68
9. Experimente zur Inline-Messung beim Material Jetting von Aluminium.....	70
9.1 Validierung des Sensorsystems.....	70
9.1.1 Validierung mit gefrästem Probekörper	70
9.1.2 Untersuchung vorab gedruckter Probekörper.....	75
9.2 Inline-Messungen gedruckter Bauteilschichten	78
10. Zusammenfassung und Ausblick	86
10.1 Zusammenfassung.....	86
10.2 Ausblick	87
10.2.1 Automatische, KI-gestützte Kalibrierung zur Auswahl optimaler Druckparameter	87
10.2.2 Schichthöhenregelung.....	88
10.2.3 Lokale Variation der Tropfengröße zur Beschleunigung des Druckprozesses	88
Literatur	90
Publikationen	93
Betreute studentische Arbeiten.....	96

1. Anwendung

Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften, wie beispielsweise Festigkeit, Steifigkeit und Temperaturbeständigkeit, kommen metallische Werkstoffe in einer Vielzahl von technischen Anwendungen zum Einsatz. Die Anwendungsfelder umfassen dabei unter anderem die Bauindustrie, den Maschinenbau, den Automobilbereich, die Luft- und Raumfahrt sowie die Medizintechnik.

Je nach Werkstoff erfolgt die Fertigung der metallischen Bauteile durch unterschiedliche Verfahren. Häufig kommen „klassische“ Verfahren wie das Fräsen, Drehen, Umformen oder Gießen zum Einsatz. Mittlerweile finden auch zunehmend additive Fertigungsverfahren Verwendung. Durch die größere Designfreiheit bieten diese beispielsweise das Potential, belastungsgerecht optimierte Leichtbaustrukturen zu realisieren und damit die Festigkeit des Werkstoffs bestmöglich auszuschöpfen. Dadurch lassen sich Material und Energie einsparen und somit die Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit erhöhen.

Unabhängig vom gewählten Fertigungsverfahren ist es für die korrekte Funktion des hergestellten Bauteils unerlässlich, dass dieses fehlerfrei gefertigt wird. Andernfalls kann es zum Bauteilversagen während der Anwendung kommen, das schlimmstenfalls Sach- und Personenschäden nach sich ziehen kann. Um die fehlerfreie Herstellung des Bauteils zu überprüfen, kommen je nach eingesetztem Fertigungsverfahren unterschiedliche Methoden zur Anwendung. So kann entweder eine Vermessung des Bauteils nach der Fertigung erfolgen und dieses, wenn notwendig (und möglich), nachbearbeitet oder ggf. entsorgt werden. Alternativ kann die Fertigung bereits prozessbegleitend überwacht werden und dadurch Fehler frühzeitig erkannt und im laufenden Prozess korrigiert werden. Bei sehr hoher Prozesssicherheit kann teilweise auf eine Kontrolle verzichtet werden oder nur stichprobenartig kontrolliert werden.

Diese hohe Prozesssicherheit liegt aufgrund langjähriger Erfahrung bei vielen klassischen Fertigungsverfahren vor. Additive Fertigungsverfahren sind dagegen noch vergleichsweise neu. Dadurch besteht bei einigen dieser Verfahren noch ein breites Potential für Verbesserungen, während gleichzeitig eine höhere Unsicherheit hinsichtlich der Bauteileigenschaften und der Prozessstabilität besteht. Folglich kann es vermehrt zu Abweichungen oder Ausschuss kommen und eine genauere Prozessüberwachung ist oftmals notwendig.

Im Folgenden soll der Fokus auf der additiven Fertigung von Metallbauteilen liegen. Die Bedeutung dieses Bereichs lässt sich am globalen Marktvolumen für Material und Maschinen erkennen. So beträgt das Marktvolumen für metallische Werkstoffe im Jahr 2022 592,5 Mio. USD gegenüber 473,6 Mio. USD im Jahr 2021, was einer Zunahme um 25,1 % entspricht (Wohlers et al., 2023, S. 133). Im Jahr 2022 wurden geschätzt etwa 3.049 Maschinen mit einem durchschnittlichen Verkaufspreis von 449.413 USD verkauft (Wohlers et al., 2023, S. 126f). Für den gesamten Markt wird weiterhin deutliches Wachstum (23,9 % pro Jahr) erwartet (Grandviewresearch, 2021).

Die Verfahren werden in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern bereits erfolgreich eingesetzt. Für die Medizintechnik werden z.B. patientenspezifische Implantate sowie Schnittschablonen und Instrumente gefertigt. In der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilbereich können mithilfe der additiven Fertigung Leichtbaustrukturen gefertigt und somit Material und Gewicht eingespart werden. Funktionsintegration erlaubt die Einsparung von Montageschritten und damit die Reduktion von Kosten und Fehlerpotential. Für den Maschinen- und Anlagenbau sind oftmals geringe Stückzahlen oder gar nur Einzelstücke von spezifischen Bauteilen erforderlich, die sich häufig nur durch additive Fertigung wirtschaftlich realisieren lassen. (Wohlers et al., 2023)

2. Stand der Technik

Für die Fertigung von metallischen Bauteilen kommen, wie eingangs erwähnt, sowohl konventionelle Fertigungsverfahren (z.B. Fräsen, Drehen, Gießen) als auch additive Fertigungsverfahren zum Einsatz. Im Folgenden wird zunächst auf die additiven Fertigungsverfahren genauer eingegangen. Anschließend werden im Hinblick auf das in dieser Arbeit behandelte Material Jetting Verfahren zur Tropfenerzeugung beschrieben.

2.1 Additive Fertigungsverfahren

Das erste Patent zu additiven Fertigungsverfahren für Metalle stammt von der Firma AT&T Teletype Corp. aus dem Jahr 1971 und beschreibt ein System, das metallische Tinte verdruckt (Gottwald, 1971). Das Selektive Laserstrahlschmelzen (SLM) wird 1998 vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen beschrieben (Meiners et al., 1998). Mittlerweile kommt eine Vielzahl verschiedener Verfahren zum Einsatz, die sich nach der Norm DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03 (DIN e.V. (Hrsg.), 2022) folgendermaßen kategorisieren lassen:

1. Freistrah-Bindemittelauftrag (engl.: Binder Jetting, BJT)
2. Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (engl.: Direct Energy Deposition, DED)
3. Materialextrusion (engl.: Material Extrusion, MEX)
4. Freistrah-Materialauftrag (engl.: Material Jetting, MJT)
5. Pulverbettbasiertes Schmelzen (engl.: Powder Bed Fusion, PBF)
6. Schichtlaminiierung (engl.: Sheet Lamination, SHL)
7. Badbasierte Photopolymerisation (engl.: Vat Photopolymerization, VPP)

Allen additiven Fertigungsverfahren gemeinsam ist die schichtweise Herstellung der Werkstücke. Das virtuelle 3D-Modell des Bauteils, meist in Form einer STL-Datei, wird im ersten Schritt in Schichten mit konstanter oder auch variabler Höhe zerlegt (Slicing). Diese Schichten werden anschließend nacheinander gefertigt, bis schließlich das komplette Bauteil entstanden ist. Der gesamte Herstellungsprozess von der Konstruktion bis zum fertigen Bauteil gliedert sich dabei nach Gibson et al. (2009, S. 43-49) in die Schritte:

- CAD
- Umwandlung in STL-Datei
- Transfer zur Maschine
- Maschinenvorbereitung
- Bauprozess
- Entnahme und Reinigung
- Nachbearbeitung
- Anwendung.

Im Folgenden wird das Grundprinzip der einzelnen Verfahren kurz beschrieben, wobei aufgrund der weiteren Verbreitung teilweise die englischen Bezeichnungen verwendet werden.

Beim **Binder Jetting** liegt das Ausgangsmaterial in Pulverform vor. Mit einem oder mehreren Druckköpfen wird ein flüssiges Bindemittel selektiv auf bzw. in das Ausgangsmaterial gedruckt, um dieses lokal zu verfestigen. Anschließend folgen je nach Werkstoff spezifische Nachbearbeitungsschritte, um beispielsweise die Festigkeit durch Ausbrennen des Binders und Sintern des Werkstücks zu erhöhen.

Direct Energy Deposition beschreibt ein Verfahrensprinzip, bei dem der Werkstoff durch eine Düse ausgestoßen und aufgeschmolzen wird, um dann auf eine Oberfläche (z.B. eine Bauplatzform) aufgebracht zu werden. Das Ausgangsmaterial kommt dabei entweder in Pulver- oder in Drahtform zum Einsatz und wird beispielsweise durch einen Laser oder einen Lichtbogen aufgeschmolzen. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung vergleichsweise großer Bauteile, da die Düse zum Materialauftrag z.B. mit einem Roboter frei im Raum bewegt werden kann.

Die Kategorie **Materialextrusion** ist aufgrund ihrer hohen Verbreitung auch in vielen Privathaushalten mittlerweile sehr bekannt. Das Material wird schichtweise selektiv durch eine Düse aufgetragen. Als Werkstoffe kommen meist Kunststoffe in Form von Filament zum Einsatz. Das Verfahren wird als FDM (Fused Deposition Modeling), FLM (Fused Layer Modeling) oder FFF (Fused Filament Fabrication) bezeichnet. Das AKF-Verfahren (Arburg Kunststoff-Freiformalen) verwendet Granulat anstelle von Filament und kann dadurch eine breite Palette von Werkstoffen verarbeiten, die auch beim Spritzgießen zum Einsatz kommen (Arburg GmbH & Co. KG, 2023).

Beim **Material Jetting** erfolgt der Auftrag des Werkstoffs auf die Bauplattform kontaktlos in Form von freifliegenden Tropfen. Das Verfahren ähnelt somit prinzipiell dem Tintendruck. Die Aushärtung des Werkstoffs erfolgt bei Polymeren durch UV-Licht, bei Metallen durch Abkühlung und Erstarrung der aufgetragenen Tropfen. Wie später beschrieben, befindet sich dieses Verfahren für Metalle aktuell noch im Forschungsstadium.

Powder Bed Fusion umfasst mehrere Verfahren, bei denen der in Pulverform vorliegende Werkstoff durch lokale Energieeinbringung partiell aufgeschmolzen wird. Schicht für Schicht wird die Bauplattform abgesenkt und mit einer Rakel eine neue Schicht Pulver darüber aufgetragen. Als Werkstoffe kommen sowohl Kunststoffe als auch Metalle zum Einsatz. Die Energie kann dabei durch einen Laser (bei Kunststoffen und Metallen) oder einen Elektronenstrahl (bei Metallen) eingebracht werden.

Beim **Sheet Lamination**, auch Laminated Object Manufacturing (LOM) genannt, werden Schichten aus Material, häufig Papier oder Metallfolie, übereinandergelegt und mittels Klebstoff oder Wärme verbunden. Ein Schneidewerkzeug oder Laser schneidet die überschüssigen Bereiche weg, um die gewünschte Form zu erhalten. Dieser Prozess wird wiederholt, bis das vollständige Objekt erstellt ist. LOM ist kosteneffizient bei der Verwendung von Papier, kann aber bei Metallmaterialien Einschränkungen haben. Es eignet sich besonders für großvolumige Modelle und Prototypen.

Beim Verfahren **Vat Photopolymerization**, auch Stereolithographie (SLA) genannt, kommt ein lichtempfindliches Harz in einem Behälter (Vat) zum Einsatz. Durch UV-Licht wird das Harz schichtweise ausgehärtet, wodurch die gewünschte Form entsteht. Die Bau-Plattform wird nach jeder Schicht weiter nach oben bewegt, so dass neues Harz zwischen Boden und Bauplattform fließen kann. Der Prozess wiederholt sich Schicht für Schicht, bis das Objekt vollständig ist. Nach der Fertigstellung wird das Objekt oft mit UV-Licht nachgehärtet, um optimale Materialeigenschaften zu erreichen. Das Verfahren ermöglicht feine Details und glatte Oberflächen, hat aber Einschränkungen bei großen Bauteilen. Bedingt durch das Verfahren kann nur ein Werkstoff für Bauteil und für Stützstrukturen verwendet werden.

Für die Verarbeitung von metallischen Werkstoffen kommen derzeit schwerpunktmäßig die Verfahren Selektives Laserstrahlschmelzen (SLM), Elektronenstrahlschmelzen (EBM), Laserauftragschweißen (Laser Metal Deposition, LMD) und Binder Jetting (BJT) zum Einsatz (Wohlers et al., 2023). Bei all diesen Verfahren kommt als Ausgangsmaterial Metall in Pulverform zum Einsatz, was besondere Anforderungen an den Arbeitsschutz stellt. Die

verwendeten Pulver weisen Feuer- und Explosionsgefahr auf und stellen ein Gesundheitsrisiko durch die geringen, teilweise lungengängigen Partikelgrößen von 30 - 40 µm dar. (Wohlers et al., 2023)

Zu diesen etablierten Verfahren sind kommerzielle Anlagen von mehreren Herstellern erhältlich. Dazu gehören u.a. 3D-Systems (SLM), Desktop Metal (BJT), EOS (SLM), ExOne (BJT), GE Additive (SLM, EBM), HP (BJT), TRUMPF (SLM, LMD) und Xact Metal (SLM).

Ein weiteres Verfahren zur additiven Fertigung von Metallbauteilen ist das Auftragen von Kunststoff, der mit Metallpulver gefüllt ist. Die Verarbeitung des Materials erfolgt hier analog zum Fused Deposition Modeling (FDM). Nach der Fertigung wird, wie auch beim Binder Jetting, in einem nachgelagerten Sinterprozess der Kunststoff ausgebrannt und es entsteht das fertige, nahezu porenfreie Bauteil. Das Verfahren wird u.a. unter dem Begriff Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) von der Firma Markforged vertrieben.

Der direkte tropfenbasierte Auftrag von flüssigem Material (Material Jetting) ist für die Kunststoffverarbeitung bereits etabliert und wird z.B. unter den Namen Polyjet (Stratasys) und MultiJet-Printing (3D Systems) vertrieben. Für metallische Werkstoffe ist dieses Verfahren derzeit noch Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte. Der Stand der Forschung sowie die Details des Verfahrens werden in Kapitel 3 behandelt.

Die Grundlagen der für das Material Jetting erforderlichen Tropfenerzeuger werden im folgenden Kapitel beschrieben.

2.2 Tropfenerzeugung

Tropfenerzeuger kommen in unterschiedlichen Anwendungsgebieten zum Einsatz. Ein großer Bereich ist dabei der Tintendruck. Ähnliche Tropfenerzeuger finden auch beim Binder Jetting Verwendung. Ein spezielles Teilgebiet für die Tropfenerzeugung ist die additive Fertigung mittels Material Jetting, insbesondere für Metalle. Nachstehend werden die grundlegenden Verfahren der Tropfenerzeugung beschrieben, die im aktuellen Stand der Technik allgemein zum Einsatz kommen. Davon abgegrenzt werden in Kapitel 3 auch weitere Ansätze beschrieben, die in der Forschung zum MJT von Metallen verwendet werden.

Tropfenerzeuger lassen sich zunächst grundlegend nach ihrem Arbeitsprinzip klassifizieren. Dabei wird zwischen „Continuous Jet“ (CJ) sowie „Drop on Demand“ (DoD) unterschieden. (Heinzl, 1978, S. 238ff) Ein CJ-Druckkopf stößt

einen flüssigen Strahl aus, der bei geeigneter Anregung aufgrund der Plateau-Rayleigh-Instabilität in Einzeltropfen zerfällt (Lord Rayleigh, 1878). Somit entstehen mehrere Tausend Tropfen pro Sekunde. Es existieren Systeme mit Tropfenraten bis zu 1 MHz (Hertz und Simonsson, 1966). Nicht benötigte Tropfen müssen entweder durch eine Blende aufgefangen oder – beispielsweise durch ein elektrisches Feld – abgelenkt werden, damit sie nicht auf dem Substrat auftreffen.

Im Gegensatz dazu wird beim DoD jeweils nur ein einzelner Tropfen gezielt bei Bedarf erzeugt. Die DoD-Technik findet weite Verbreitung bei handelsüblichen Tintendruckern. CJ wird dagegen eher in Industrieanwendungen eingesetzt, bei denen ein besonders hoher Durchsatz erforderlich ist, wie beispielsweise beim Aufdrucken von Barcodes. (Le, 1998)

2.2.1 Continuous Jet

Im Gegensatz zum Drop on Demand werden beim Continuous Jet (CJ) nicht einzelne Tropfen zum jeweils gewünschten Zeitpunkt erzeugt. Stattdessen wird ein Flüssigkeitsstrahl zum Zerfall in einzelne Tropfen angeregt. Die Verwendung eines CJ-Druckkopfs zum Material Jetting gestaltet sich gegenüber DoD schwieriger, da aufgrund der hohen Tropfenfrequenz eine hohe Verfahrgeschwindigkeit der Achsen notwendig ist. Außerdem müssen nicht benötigte bzw. unerwünschte Tropfen entsprechend abgefangen oder abgelenkt werden. Die meisten Ansätze zum MJT verwenden deshalb DoD-Druckköpfe, weshalb CJ hier nur kurz behandelt werden soll.

Die Anregung des Strahls zum Zerfall in Einzeltropfen kann durch die gleichen physikalischen Prinzipien wie beim Drop on Demand erfolgen. Die Besonderheit ist dabei, dass nicht die gesamte Energie zum Erzeugen und Ausstoßen eines Tropfens durch den Aktor aufgebracht werden muss, sondern bereits eine vergleichsweise geringe Amplitude zur Anregung genügt. Die dadurch angeregte Einschnürung des Strahls verstärkt sich durch die Oberflächenspannung bis hin zum Zerfall in monodisperse Einzeltropfen.

Der Zerfall des Strahls basiert auf der Plateau-Rayleigh-Instabilität (Lord Rayleigh, 1878). Der Zusammenhang zwischen der einheitenlosen Wellenzahl k , der Wellenlänge λ und dem Strahlradius r ist durch Gleichung (1) gegeben. Für Wasser sowie die meisten flüssigen Metalle ist dabei ein Wert von $k = 0,697$ optimal (Orme und Smith, 2000).

$$k = \frac{2 * \pi * r}{\lambda} \quad (1)$$

Durch Umstellen dieser Gleichung kann somit die optimale Wellenlänge ermittelt werden. In Verbindung mit der Strahlgeschwindigkeit v_{jet} ergibt sich die passende Anregungsfrequenz nach Gleichung (2):

$$f = \frac{v_{jet}}{\lambda} \quad (2)$$

Die Ermittlung der Strahlgeschwindigkeit kann über die Bestimmung des vom Druckkopf ausgestoßenen Massenstroms in Verbindung mit der Dichte des Fluids erfolgen. Bei der Bestimmung der Strahlgeschwindigkeit muss beachtet werden, dass es bei idealen Fluiden zu einer Strahleinschnürung auf etwa 87 % des Düsendurchmessers kommt, was somit zu einer Geschwindigkeitszunahme von etwa 32 % führt (Harmon, 1955, Tseng et al., 2001).

2.2.2 Drop on Demand

Beim Drop on Demand muss ein einzelner Tropfen durch Energieeinbringung in das Fluid erzeugt werden. Dafür ist ein plötzlicher Druckanstieg innerhalb des Flüssigkeitsreservoirs notwendig. Die Energie und damit der Druckanstieg kann beispielsweise thermisch, pneumatisch, piezoelektrisch, elektromagnetisch oder magnetohydrodynamisch – also basierend auf der Lorentzkraft auf leitfähige Flüssigkeiten – in das Medium eingebracht werden.

Neben der Antriebsart lassen sich Tropfenerzeuger nach ihrer maximal möglichen Arbeitstemperatur, der maximalen Tropfenrate, dem Tropfendurchmesser sowie dem Druckabstand zur Bauplatzform bzw. der freien Flugstrecke der Tropfen klassifizieren. Im Folgenden werden verbreitete Verfahren für DoD-Tropfenerzeuger im Bereich des Tintendrucks genauer beschrieben.

Bubble Jet

Beim Bubble-Jet-Verfahren erfolgt die Druckerhöhung im Fluid durch lokale Erwärmung über den Siedepunkt hinaus mittels eines Heizelements. Das Verfahren wurde durch die Firma HP patentiert und wird auch heute noch in Tintendruckern eingesetzt. (Vaught et al., 1982) Durch den raschen Temperaturanstieg siedet das Fluid in unmittelbarer Umgebung des Heizelements und bildet somit eine Dampfblase. Diese Dampfblase führt zu einer Druckerhöhung in der Kammer und folglich zum Ausstoß eines Tropfens. Durch die gegenüber dem flüssigen Medium verringerte Wärmeleitfähigkeit kommt es anschließend zur Kondensation der Dampfblase und deren Kollabieren. Dies führt zu einem kurzzeitigen Unterdruck, der den Tropfenabriss an der Düse begünstigt. (Fähndrich, 1997: S. 3)

Diese thermisch betriebenen Tropfenerzeuger können aufgrund der möglichen Miniaturisierung des Heizelements als Array mit mehreren Aktoren nebeneinander gefertigt werden. Nachteilig ist jedoch die Beschränkung auf Fluide, die gegenüber den thermischen Belastungen ausreichend beständig sein müssen. Gleichzeitig muss der Siedepunkt des Fluids niedrig genug liegen, um mit dem Heizelement in kurzer Zeit erreicht werden zu können. Dadurch kommt dieses Verfahren nur bei wässrigen Medien zum Einsatz.

Piezoelektrisch

Beim piezoelektrischen Tropfenerzeuger wird durch Nutzung des inversen piezoelektrischen Effekts mithilfe eines Piezoaktors das Volumen einer Kammer schlagartig verringert. Dadurch kommt es zu einem Druckanstieg innerhalb der Flüssigkeit und folglich zur Beschleunigung des Fluids. (Koto, 1978) Bei entsprechender Wahl der Parameter lässt sich so ein einzelner, anschließend freifliegender Tropfen erzeugen. Bedingt durch die maximal zulässige Temperatur von Piezoaktoren ergeben sich Limitierungen beim Einsatz für Metalle. Durch entsprechende Kühlung oder thermische Entkopplung des Aktors von der Metallschmelze muss sichergestellt werden, dass die maximale Temperatur des Piezoaktors nicht überschritten wird. (Wiedemann et al., 2000)

Je nach Anordnung von Aktor und Austrittsöffnung lassen sich piezoelektrische Tropfenerzeuger weiter kategorisieren und werden beispielsweise als Sideshooter, Backshooter oder Edgeshooter bezeichnet. (Grünwald, 2006)

Pneumatisch

Beim pneumatischen Druckkopf wird die Tropfenerzeugung durch einen von außen aufgetragenen Druckimpuls angestoßen. Der Druckimpuls wird von der Flüssigkeit, abhängig von den Impedanzverhältnissen, jeweils zu einem gewissen Anteil reflektiert und absorbiert. Die dadurch in die Flüssigkeit eingebrachte Energie bewirkt bei entsprechender Parameterwahl einen Tropfenausstoß. Durch die Verwendung eines Gases zur Übertragung der Energie auf das Medium kann bei diesem Prinzip sehr einfach eine thermische Entkopplung stattfinden, was den Einsatz für Anwendungen mit hohen Arbeitstemperaturen begünstigt.

Eine andere Umsetzung zur pneumatischen Tropfenerzeugung besteht darin, das Fluid unter konstanten Überdruck zu setzen und durch ein kurz öffnendes Ventil einen Tropfen auszustoßen. Das Ventil kann dabei durch unterschiedliche Methoden aktuiert werden, beispielsweise elektromagnetisch oder piezoelektrisch. Das Prinzip wird u.a. bei Piezoinjektoren für Verbrennungsmotoren eingesetzt, wobei in diesem Anwendungsfall ein Sprühnebel erzeugt wird.

3. Stand der Forschung zum Material Jetting von Metall

Das Material Jetting von Metallen befindet sich derzeit weitgehend noch im Forschungsstadium. Derzeit sind zwei Firmen bekannt, die entsprechende Systeme angekündigt haben: Xerox Corporation hat im Februar 2021 ein System für die tropfenbasierte Verarbeitung von flüssigem Aluminium unter dem Namen ElemX angekündigt. Die Firma GROB-WERKE GmbH & Co. KG hat ein System mit Piezodruckkopf unter dem Namen Liquid Metal Printing angekündigt. Ob diese Systeme bereits kommerziell erhältlich sind, ist nicht bekannt.

Es existiert eine große Bandbreite an Forschungsarbeiten zum Material Jetting von Metallen. Im Folgenden wird ein Überblick über einige relevante Arbeiten gegeben. Dabei wird der Stand der Forschung zunächst nach der Art des verwendeten Tropfenerzeugungsprinzips unterteilt.

3.1 Continuous Jet

Orme und Smith (2000) verwenden einen piezobasierten CJ-Druckkopf und erzeugen damit Teile aus Reinaluminium in einem Versuchsaufbau. Das Verfahren wird hier „precision droplet-based net-form manufacturing“ (PDM) genannt. Eine mittels Piezoaktor betätigte Stange überträgt Vibrationen auf das flüssige Aluminium und regt dadurch den austretenden Strahl zum Zerfall in einzelne Tropfen an. Der verwendete Piezoaktor besteht aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) und befindet sich oberhalb der Stange, die gleichzeitig als thermische Isolierung für den Piezoaktor dient. Der eingesetzte Schmelztiegel besteht aus Titan, das mit Bornitrid beschichtet ist. Der Strahl wird durch eine Diamantdüse ausgestoßen und befindet sich anschließend in einer mit Inertgas gefüllten Umgebung. Unterhalb der Düse befindet sich ein Röhrchen als Elektrode zum elektrischen Aufladen der Tropfen, die anschließend durch Ablenkelektroden in ihrer Flugrichtung beeinflusst werden. Die Tropfen treffen nach ca. 40 cm Flugstrecke auf die Bauplatzform. Details zur elektrischen Ablenkung der Tropfen werden in Orme et al. (2000) beschrieben.

Untersuchungen zu CJ mit einer Zinn-Blei-Legierung (Sn63Pb37) werden in Jiang et al. (2010) beschrieben. Auch dort wird durch einen Piezoaktor eine Stange angetrieben, die sich mit dem anderen Ende im flüssigen Metall befindet und somit die durch den Piezo verursachte Anregung auf dieses überträgt. Es hat sich gezeigt, dass die verwendete Legierung in sauerstoffhaltiger Umgebung

oxidiert und die entstehende Oxidhaut das Zerfallen des Strahls in Tropfen verhindert.

Die prinzipbedingt hohe Tropfenrate von CJ-Tropfenerzeugern führt bei der Realisierung einer MJT-Anlage zu besonderen Herausforderungen. Um jeden Tropfen zielgenau auf der Bauplatzform platzieren zu können, müssen entweder Bauplatzform oder Druckkopf ausreichend schnell verfahren werden können. Sofern die Tropfen im Flug beispielsweise durch Ablenkelektroden abgelenkt werden, ist eine genügend lange Flugstrecke notwendig, um aus dem realisierten Ablenkwinkel eine ausreichende Ablenkstrecke auf der Bauplatzform zu erreichen. Diese weite Flugstrecke bringt potentiell Probleme bzgl. der Präzision des Aufpralls mit sich. Unter anderem aufgrund dieser Herausforderungen werden in der Mehrzahl der Forschungsprojekte Drop on Demand Druckköpfe verwendet.

3.2 Drop on Demand

Während die ersten Bauteile aus Aluminium mit CJ gedruckt wurden, existiert mittlerweile deutlich mehr Literatur zu DoD-Druckköpfen. Auch ist das Spektrum der verdruckten Metalle bei DoD-Druckköpfen breiter.

Piezo

Aufgrund der Temperaturlimitierung werden Piezo-betriebene DoD-Druckköpfe überwiegend für niedrigschmelzende Metalle im Bereich bis 240°C eingesetzt. Rumschoettel et al. (2016) beschreibt ein Konzept, bei dem der Piezoaktor an der der Schmelze abgewandten Seite eines Glasrohrs befestigt und dadurch thermisch isoliert ist. Dadurch können Metalle mit einem Schmelzpunkt bis 600°C verwendet werden. Der Piezoaktor expandiert in Längsrichtung des Glasrohrs und erzeugt dadurch eine Longitudinalwelle, die auf das flüssige Metall an der Spitze trifft und einen Tropfenausstoß bewirkt.

Der im Tintendruck eingesetzte Aufbau eines Druckkopfs im „bending mode“ eignet sich prinzipbedingt lediglich für geringe Temperaturen, da sich der Piezoaktor sehr nah am zu verdruckenden Medium befindet. Er kommt somit nur für Tinten sowie teilweise für Lötzinn zum Einsatz. Eine Umsetzung eines solchen Druckkopfs wird in Kagerer et al. (2011) beschrieben.

Um eine ausreichende thermische Isolierung des Piezoaktors vom flüssigen Metall zu erreichen, ist ein Druckkopf im „push mode“ besser geeignet. Dort kann die Übertragung des Druckimpulses beispielsweise durch eine Stange erfolgen, so dass der Piezoaktor weiter entfernt vom Metall angebracht werden kann. Ein Beispiel für diese Umsetzung findet sich im Druckkopf der Fa. GROB, bei

welchem ein Piezoaktor einen Keramikkolben antreibt, dessen Spitze sich in der Nähe der Düse befindet.

Magnetohydrodynamisch / Lorentzkraft

Das magnetohydrodynamische Prinzip basiert auf der Lorentzkraft, die auf bewegte elektrische Ladungsträger in einem magnetischen Feld wirkt. Eine Möglichkeit dazu besteht darin, ein statisches Magnetfeld zu erzeugen, in welchem sich das elektrisch leitfähige Fluid zumindest zum Teil befindet. Senkrecht zur Magnetfeldrichtung wird ein Stromfluss durch das Fluid angeregt. Die entstehende Lorentzkraft wirkt senkrecht zu Stromfluss und Magnetfeld und ist proportional sowohl zur magnetischen Flussdichte als auch zum Strom. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt und wird u.a. von Sackinger et al. (1998) genauer beschrieben. Weitere auf diesem Prinzip basierende Entwicklungen werden von Suter (2012) und Desktop Metal (2017) beschrieben.

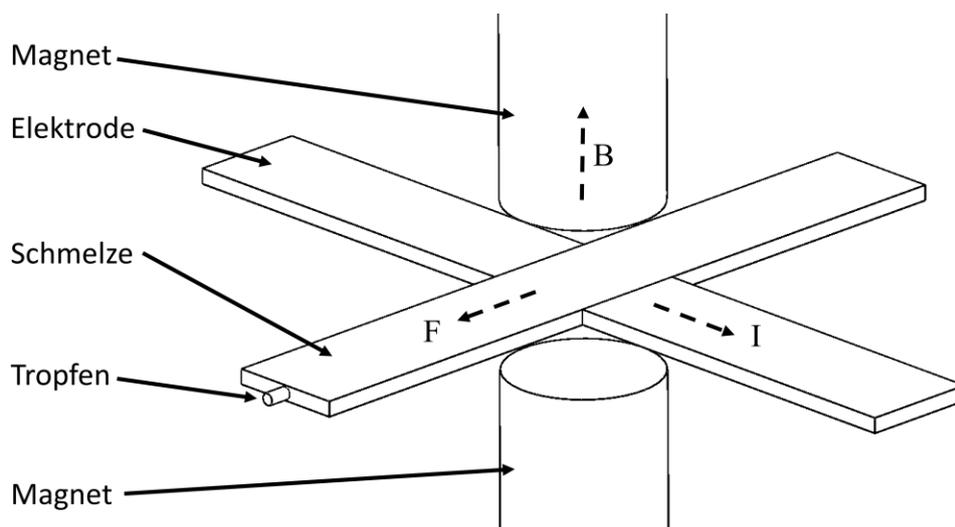


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines Tropfenerzeugers basierend auf der Lorentzkraft; über zwei Elektroden wird elektrischer Strom durch das flüssige Metall geleitet. Gemeinsam mit den beiden Magneten führt die Lorentzkraft zum Tropfenausstoß. Bild in Anlehnung an Sackinger et al. (1998).

Dieses Verfahren stellt Herausforderungen an die Erzeugung des Magnetfelds und an die Einbringung des elektrischen Stroms in die Schmelze. Permanentmagnete müssen entsprechend gekühlt werden, um eine Überschreitung der Curie-Temperatur zu vermeiden. Bei Verwendung von Spulen zur Erzeugung des Magnetfelds sind hohe Ströme und je nach Temperatur ebenso eine Kühlung aufgrund der begrenzten Temperaturbeständigkeit des Spulendrahts notwendig. Bei niedrig schmelzenden Metallen können die Magnetspulen jedoch gleichzeitig als Heizelement dienen.

Für den im Fluid fließenden Strom (Elektrodenstrom) sind je nach Geometrie des Druckkopfs Ströme von mehreren hundert Ampere notwendig, um den benötigten Druck zu erzeugen. Suter (2012) verwendet Spulenströme von bis zu 305 A und Elektrodenströme von bis zu 800 A. Bei der Auswahl des Elektrodenwerkstoffs sind einerseits die Temperaturbeständigkeit, andererseits die chemische Beständigkeit gegenüber dem flüssigen Metall zu beachten.

Ein anderer Ansatz basiert darauf, anstelle von Elektroden außenliegende Spulen zu verwenden und damit einen Stromfluss im Metall zu induzieren. Das Magnetfeld dieses Stroms interagiert bei geeignet gewähltem Stromverlauf mit dem Magnetfeld der Spule so, dass eine entsprechend gerichtete Kraft auf das Fluid wirkt. Diese Kraft bewirkt dann den Tropfenausstoß. Gleichzeitig können die Spulen zum induktiven Aufheizen und damit Schmelzen des Aluminiums verwendet werden. (Sukhotskiy et al., 2017)

Elektromechanisch

Sohn und Yang (2005) beschreiben einen Tropfenerzeuger, der auf einem elektromagnetisch angesteuerten Kolben basiert. Der Kolben befindet sich größtenteils innerhalb eines beheizten Tanks und ragt am oberen Ende aus diesem heraus. Durch den Aktor in Verbindung mit Rückstellfedern erfolgt die Ansteuerung des Kolbens und somit die Erzeugung von Druckschwankungen im Fluid. Die Ansteuerfrequenz beträgt 3 Hz.

Ein weiterer elektromagnetischer Ansatz wird von Harnisch (2009) beschrieben. Dabei wird ein beweglicher Stahlzylinder innerhalb eines Röhrchens durch zwei außenliegende Spulen aktuiert. Durch entsprechende Bestromung der Spulen kann eine kurzzeitige Auslenkung des Kolbens aus der Ruhelage bewirkt werden, die zu einem Druckpuls im Fluid und somit zum Tropfenausstoß führt.

Pneumatisch

Die Verwendung von Gas als Medium zur Übertragung der Energie auf das Fluid erlaubt vergleichsweise einfach die Realisierung von Tropfenerzeugern für hohe Arbeitstemperaturen. Durch eine ausreichend lange Leitung zwischen dem die Druckpulse erzeugenden Ventil und dem heißen Bereich des Druckkopfs ist eine thermische Isolierung leicht möglich. Deshalb werden in vielen Arbeiten zum MJT von Metallen pneumatische Tropfenerzeuger verwendet. Die verdruckten Werkstoffe reichen dabei von Zinn und Zink über Aluminium bis hin zu Kupfer und Stahl.

Aziz und Chandra (2000) untersuchen mit einem pneumatischen Druckkopf das Aufprallverhalten von Zinn auf einer festen Oberfläche. Cao und Miyamoto

(2002) beschreiben die Verarbeitung von Aluminium in ihrem Versuchsaufbau und bezeichnen das Druckverfahren als „Net Droplet-based Manufacturing“ (NDM). Es werden die Dichte und die geometrische Genauigkeit der gedruckten Teile untersucht.

Chao et al. (2013) haben anhand von gedruckten Quadern aus der Aluminiumlegierung 7075Al die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die erzeugte Geometrie untersucht. Die beim Drucken entstehende Mikrostruktur des Werkstoffs wird von Zuo et al. (2014) untersucht.

In weiteren Arbeiten werden entstehende Eigenspannungen simuliert (Yanpu et al., 2016) sowie der Aufbau von Tropfentürmen numerisch und experimentell untersucht (Li et al., 2016).

Die Grenzen des Druckens ohne Stützstruktur werden durch seitlich versetztes Drucken von Tropfen in (Zhang et al., 2017) charakterisiert. Es konnten dadurch schräge Türme mit Winkeln von etwa $30 - 40^\circ$ zur Vertikalen realisiert werden.

Vorarbeiten am Lehrstuhl MiMed

Bei allen pneumatischen Ansätzen wird durch ein Ventil ein Druckpuls erzeugt, der anschließend auf das flüssige Medium trifft. Bei der Realisierung besteht dabei ein Interessenskonflikt zwischen der möglichst nahen Anbringung des Ventils am Druckkopf zur Erreichung eines geringen Totvolumens einerseits. Andererseits ist eine weiter entfernte Anbringung zur Erreichung der thermischen Isolierung vorteilhaft. Diese führt jedoch zu einem höheren Totvolumen, das die akustischen Eigenschaften des Druckkopfs verschlechtert.

Bei Verwendung einer Laufleitung zwischen Ventil und Druckkopf kann es zu mehrfachen Reflexionen des Druckimpulses kommen, so dass die Schallwelle zwischen Medium und Ventil hin- und herläuft, bis sie durch Dämpfung abgeklungen ist. Die notwendige Zeit bis das System wieder im Ruhezustand ist, limitiert die mögliche maximale Arbeitsfrequenz des Tropfenerzeugers. Ein in Vorarbeiten am Lehrstuhl entwickelter Ansatz zur Erhöhung der möglichen Frequenz besteht in der Verwendung einer akustischen Laufleitung mit passender Terminierung zur Impedanzanpassung. (Rumschoettel et al., 2017) Dadurch wird die Abklingzeit wesentlich verkürzt. Abbildung 2 zeigt das Konzept dieses Druckkopfs.

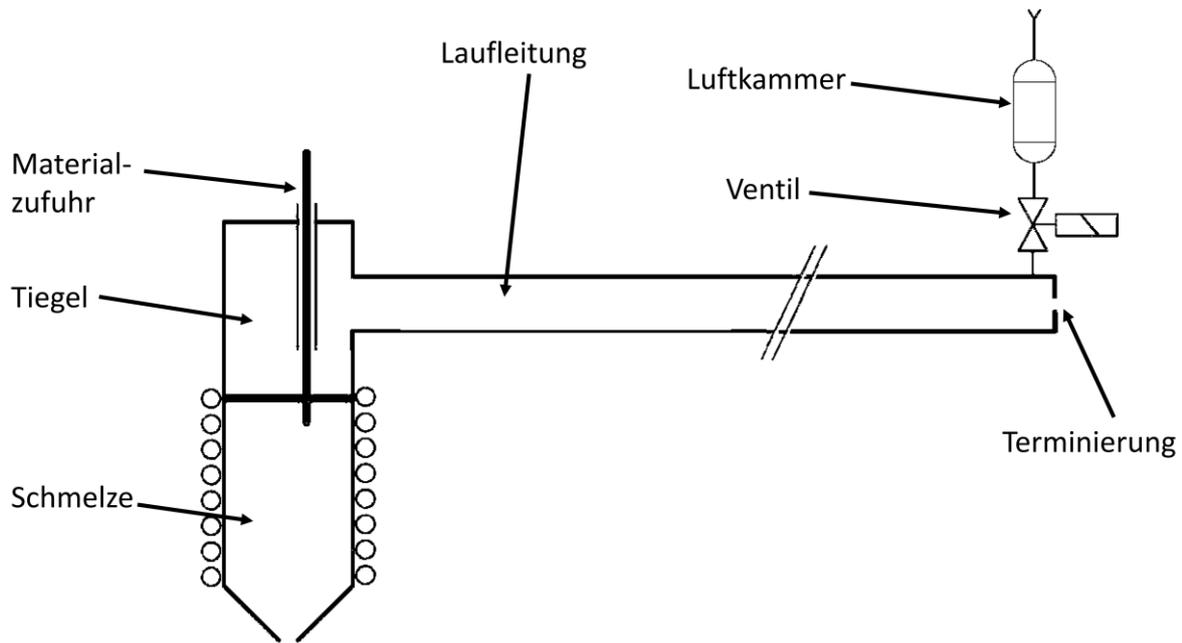


Abbildung 2: Pneumatischer Druckkopf mit akustischer Laufleitung und Terminierung zur Impedanzanpassung; das Ventil sowie die Luftkammer befinden sich im kalten Bereich, der durch die Laufleitung mit dem heißen Bereich des Druckkopfs verbunden ist. In Anlehnung an Rumschoettel et al. (2017).

Die damit gefertigten Teile weisen höhere Festigkeitswerte als vergleichbare gegossene Probekörper auf (Himmel et al., 2019). Für den Druckprozess wurde eine thermische Simulation entwickelt (Himmel et al., 2018). Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde in weiteren Arbeiten die Verwendung von Salz als Stützmaterial untersucht (Kirchebner et al., 2021a, Kirchebner et al., 2021b).

4. Aktuelle Nachteile des Material Jetting von Aluminium

Der Stand der Technik und Forschung sowie die Vorarbeiten zeigen, dass die direkte, additive Fertigung von Aluminiumbauteilen durch Tropfenauftrag das Potential zu einem attraktiven Fertigungsverfahren hat. Es besteht jedoch noch Entwicklungsbedarf in verschiedenen Bereichen des Prozesses, die im Folgenden beschrieben werden.

Schwankung der Tropfengröße: Eine Herausforderung stellt die Erzeugung von Tropfen mit konstanter Größe dar. Durch die Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Tropfenentstehung kommt es fast unweigerlich zu Schwankungen der Tropfengröße während des Druckprozesses. (Mantell et al., 2019) Diese führen folglich zu geometrischen Abweichungen des entstehenden Bauteils. Die Abweichungen können sich im ungünstigsten Fall über mehrere Schichten hinweg aufsummieren und den Fehler dadurch verstärken. Zur Vermeidung dieses Problems ist eine Methode zur Gewährleistung konstanter Schichtstärken notwendig.

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen kann dieses Problem durch mechanisches Abstreifen noch vor der Verfestigung des Materials behoben werden. Dafür wird in jeder Schicht etwas zu viel Material aufgetragen und anschließend vor dem Auftragen der nächsten Schicht abgestreift. Beim Drucken von flüssigen Metallen ist dieses Vorgehen jedoch nicht möglich, da die auftreffenden Tropfen sich beim Abkühlen sofort verfestigen und mit dem restlichen Bauteil verbinden. Ein Abtragen von überschüssigem Material würde dann spanende Verfahren (Fräsen) erfordern. Aufgrund der auftretenden Schnittkräfte könnte dann jedoch die Anhaftung des Bauteils an der Bauplattform nicht gewährleistet werden.

Bauteildefekte: Neben Schwankungen der Tropfengröße können bei der Tropfenerzeugung verschiedene Störungen auftreten, wie beispielsweise Verstopfungen der Düse, Oxidation des flüssigen Metalls, Abweichungen in der Flugbahn oder Nichtablösen von Tropfen. All diese Störungen können zu Defekten im Bauteil führen und somit die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen.

Stützmaterial: Für volle 3D-Fähigkeit ist ein Stützmaterial notwendig. Während bei pulverbettbasierten Verfahren das Pulver als Stützmaterial dient, ist beim Material-Jetting ein gezielt aufgetragenes Stützmaterial notwendig. Bevorzugt kommt hierzu ein Material zum Einsatz, das sich entweder mechanisch (schwache

Anbindung ans Baumaterial), thermisch (tieferer Schmelzpunkt) oder chemisch (Löslichkeit in Flüssigkeiten) vom Bauteil trennen lässt.

Materialzufuhr: Eine kontinuierliche Materialzufuhr zum Druckkopf ist zur Fertigung größerer Bauteile notwendig und erfordert eine Erfassung des aktuellen Füllstands des Tiegels. Für pneumatische Tropfenerzeuger mit ihrem prinzipbedingt knapp bemessenem Bauraum ist derzeit kein System mit Füllstandregelung bekannt.

5. Ziel und erwartete Vorteile

Als Voraussetzung für die Erkennung und Kompensation auftretender Schwankungen der Tropfengröße sind detaillierte Geometrieinformationen über das Bauteil bereits während des Druckprozesses notwendig. Dafür wird in dieser Arbeit ein System realisiert, welches die Vermessung der Druckschichten beim Material Jetting von Aluminium während des Druckprozesses ermöglicht.

Dadurch werden folgende Vorteile erwartet:

Die prozessbegleitende Vermessung der Bauteile erlaubt die Echtzeitanalyse von Druckparametereinflüssen auf die Oberflächeneigenschaften des Bauteils. Beispielsweise können Auswirkungen von Fehlstellen auf darüber liegende Schichten untersucht werden. Auftretende Geometrieabweichungen durch Schwankungen der Tropfengröße können während des Druckvorgangs erkannt werden. Bei Erkennung solcher Fehler ist eine Warnung des Benutzers möglich, so dass der Druckprozess ggf. rechtzeitig abgebrochen werden kann. Dadurch kann ein besseres Prozessverständnis gewonnen werden.

Ausgehend von den gewonnenen Messdaten ist außerdem die Implementierung einer druckbegleitenden Prozessadaption zur Korrektur von Abweichungen möglich. Durch eine Anpassung der Baustrategie (Tropfengröße, Tropfendichte) in der darauffolgenden Schicht können lokale Höhenabweichungen kompensiert werden.

6. Konzept

6.1 Struktur

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein System zum Material Jetting von Aluminium realisiert. Das System besitzt ein integriertes Sensorsystem für die prozessbegleitende Vermessung von Druckschichten. Im Folgenden werden die Grundstruktur des Systems sowie das Vorgehen zur Realisierung beschrieben.

Zentrales Element des Versuchsstands ist ein Linearsystem mit drei kartesischen Achsen. Die beheizte Bauplattform wird entlang aller drei Achsen innerhalb einer geschlossenen Prozesskammer bewegt. Der Druckkopf sowie der Sensor zur Geometrievermessung befinden sich ortsfest an der Oberseite der Prozesskammer. Um die Oxidation des flüssigen Aluminiums zu verhindern bzw. zu reduzieren, wird die Prozesskammer mit einem Inertgas geflutet und so der Sauerstoffgehalt reduziert. Abbildung 3 zeigt eine Prinzipskizze des Systems.

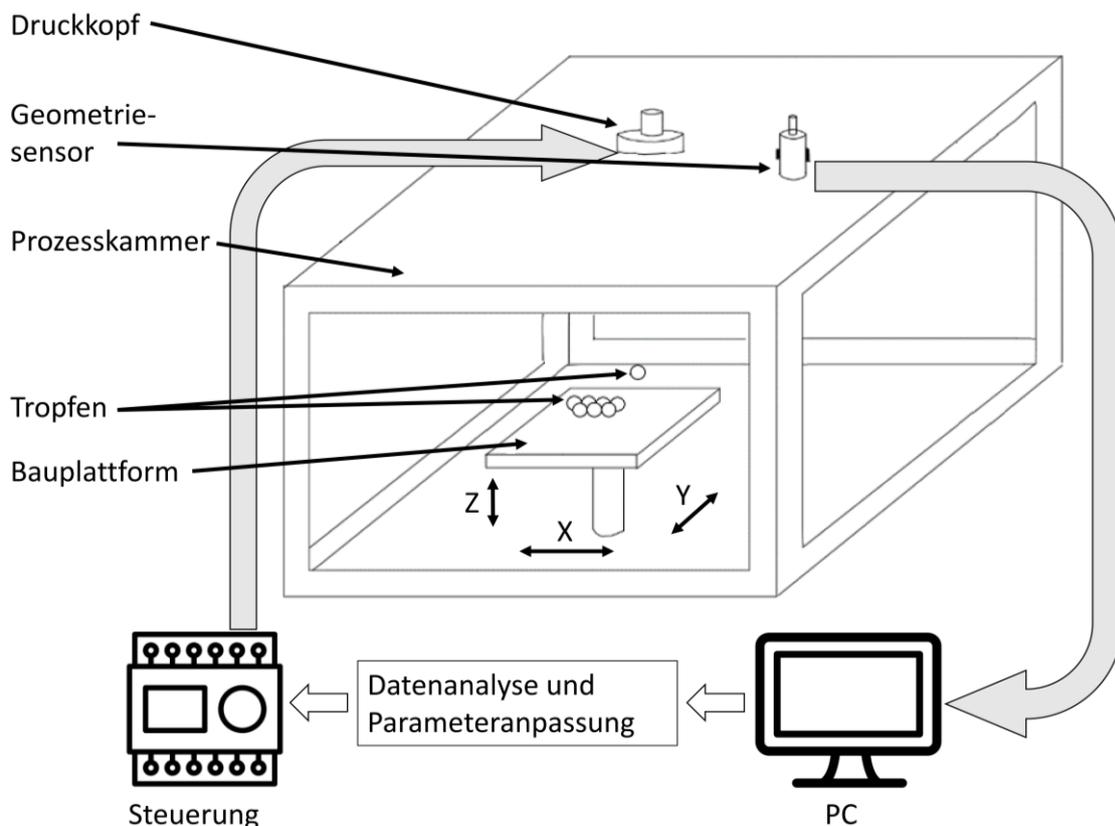


Abbildung 3: Prinzipskizze des Versuchsstands mit den wesentlichen Komponenten: Druckkopf, Sensor zur Geometrievermessung, Prozesskammer, Metalltropfen, Bauplattform, Fenster zur Prozessbeobachtung, Maschinensteuerung und PC mit Auswertesoftware. Eine Steuerung kontrolliert den Druckkopf, die Sensoren sowie die Antriebe. Die vom Messsystem erfassten Geometriedaten werden mit einem PC ausgewertet.

Weitere, oben nicht dargestellte Komponenten sind Heizelemente und Temperatursensoren für die Druckköpfe und die Bauplattform, Motoren für die drei translatorischen Achsen sowie Pneumatikventile und Druckregler zur Ansteuerung der Druckköpfe und zur Steuerung der Schutzgaszufuhr.

6.2 Druckprozess mit integrierter Bauteilvermessung

Abbildung 4 zeigt den typischen Ablauf des Druckprozesses mit integrierter Vermessung der gedruckten Bauteilschichten. Der gesamte Prozessablauf vom CAD-Modell bis zum Start des Druckprozesses gliedert sich in mehrere Schritte.

Zunächst wird das CAD-Modell des Bauteils in einzelne Schichten zerteilt (Slicing). Im nächsten Schritt werden für jede Schicht die benötigten Tropfenpositionen und die zugehörigen Pfade des Druckkopfs berechnet. Dabei können verschiedene Druckstrategien zum Einsatz kommen. Beispielsweise können zuerst die Außenkontur und anschließend das Innere der Schicht gedruckt werden. Alternativ kann die gesamte Schicht Zeile für Zeile gedruckt werden.

Die Übergabe der Druckbefehle an die Maschinensteuerung erfolgt in Form von G-Code, der sowohl Fahrbefehle als auch Befehle zum Absetzen von Tropfen und zur Aktivierung der Messfunktion beinhaltet. Auch weitere wesentliche Prozessparameter wie die Temperaturen von Druckkopf und Bauplattform, der Druck und die Pulsdauer des Druckkopfs sowie die Verfahrgeschwindigkeit der Achsen werden im G-Code definiert. Insbesondere für einfache Teile wie Quader oder für Tests kann der G-Code auch manuell geschrieben werden.

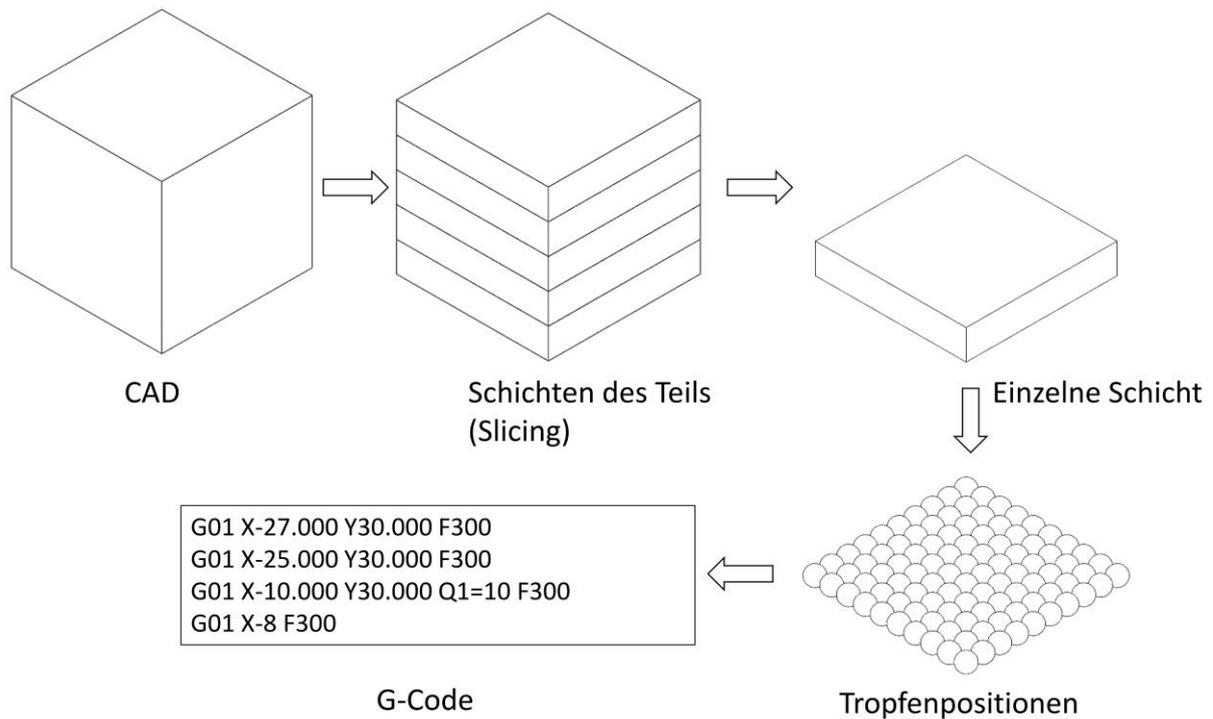


Abbildung 4: Datenvorbereitung für einen Druckauftrag: Das CAD-Modell des Bauteils wird zunächst in einzelne Schichten zerlegt (Slicing). Für jede Schicht werden die benötigten Tropfenpositionen und die zugehörigen Pfade des Druckkopfs berechnet und in Form von G-Code exportiert und anschließend an die Maschinensteuerung übertragen.

Nach entsprechender Vorbereitung des Druckers wird der vorab erzeugte G-Code über die Benutzerschnittstelle geladen und der Druckprozess gestartet. Der G-Code enthält dabei wie bereits beschrieben neben den Druckbefehlen optional auch die Anweisungen zum Vermessen des Bauteils, das nach jeder gedruckten Schicht durchgeführt werden kann. Somit wiederholen sich die Schritte „Drucken“ und „Messen“ solange, bis alle Schichten gedruckt worden sind. Zwischen diesen beiden Schritten kann optional eine Regelung eingefügt werden, die ausgehend von den Messdaten die Druckparameter für die jeweils nächste Schicht manipuliert.

Im Folgenden wird der Ablauf zur Auswertung der Messdaten sowie zur optionalen Geometrieregung beschrieben. Zunächst wird die entsprechende G-Code-Datei analysiert und die Positionen aller Tropfen und die gewünschte Schichthöhe werden extrahiert. Die Positionen der Tropfen werden benötigt, um in späteren Schritten die tatsächliche Tropfenhöhe bzw. Schichthöhe an den jeweiligen Stellen des Bauteils zu ermitteln und daraus die Höhenabweichung zu berechnen. Danach werden die Sensordaten verarbeitet, indem zunächst möglicherweise vorhandene ungültige Messpunkte erkannt und aus der

Punktwolke entfernt werden. Solche Daten können insbesondere am Bauteilrand auftreten, wenn sich das Objekt außerhalb des Messbereichs des Sensors befindet.

In einem weiteren Schritt kann optional eine Koordinatentransformation der Punktwolke durchgeführt werden, um die Oberfläche der Bauplattform mit der X-Y-Ebene auszurichten. Dies kann notwendig sein, wenn die Bauplattform Unebenheiten oder eine Fehlausrichtung, bezogen auf die Richtung der Koordinatenachsen, aufweist.

Um die Auswertung der Messdaten des Bauteils zu vereinfachen, ist ein möglichst homogenes Netz aus Messpunkten in einem definierten Raster entlang der X- und Y-Achse vorteilhaft. Die vom Sensor erfassten Rohdaten befinden sich je nach Messprinzip nicht zwingend in einem solchen Raster, sondern können beispielsweise unterschiedliche X-Positionen aufweisen. Deshalb werden die Daten im nächsten Schritt zur Erzeugung des gewünschten Rasters interpoliert. Das so entstandene Netz ermöglicht die effiziente Extraktion der Höhe des Teils an bestimmten Positionen. Das Verfahren ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Vorgehen zur Auswertung der gewonnenen Messdaten einer gedruckten Bauteilschicht: Aus den Messdaten werden ungültige Messergebnisse entfernt. Die verbliebenen Messdaten werden durch Interpolation in ein gleichmäßiges Raster überführt und durch Vernetzung die Bauteiloberfläche rekonstruiert.

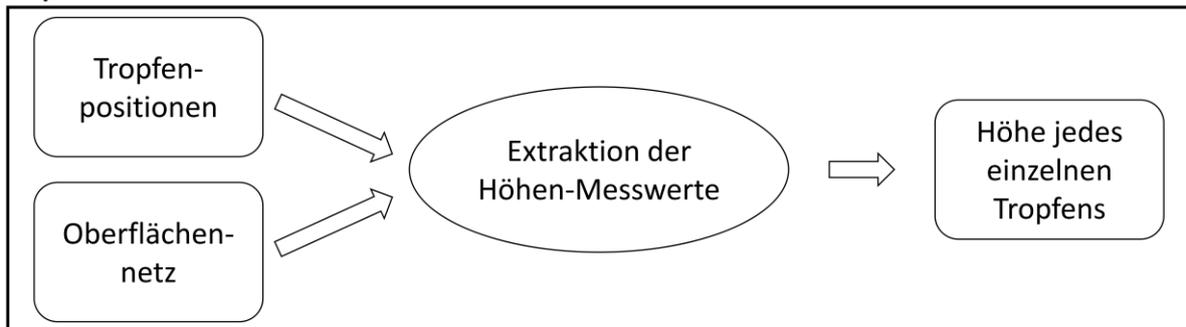
Anschließend werden die zuvor aus dem G-Code extrahierten Tropfenpositionen zum Vergleich der tatsächlichen Schichthöhe an jeder Tropfenposition mit der gewünschten Schichthöhe verglichen.

Um die Kompensation einer Höhenabweichung in der nachfolgenden Schicht zu ermöglichen, werden die Tropfenpositionen der jeweils darauffolgenden Schicht herangezogen. Für jede einzelne Tropfenposition wird die Höhenabweichung berechnet und gespeichert. Um die Höhenabweichung in der nächsten Schicht zu korrigieren, wird eine gezielte Größenvariation für jeden einzelnen Tropfen durchgeführt.

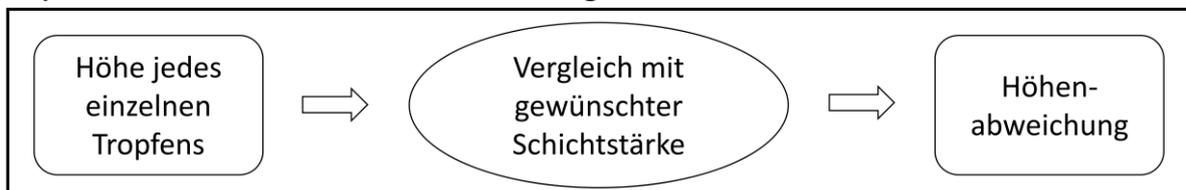
Dies wird erreicht, indem die Druckparameter tropfenspezifisch variiert werden, um jeweils einen größeren oder kleineren Tropfen zu erzeugen. Der Prozess des

Höhenvergleichs und der Generierung der entsprechenden Parametertabelle mit Korrekturwerten für die nächste Schicht ist in Abbildung 6 dargestellt.

1.) Ermitteln der lokalen Schichthöhe



2.) Ermitteln der lokalen Höhenabweichung



3.) Anpassung der Druckparameter

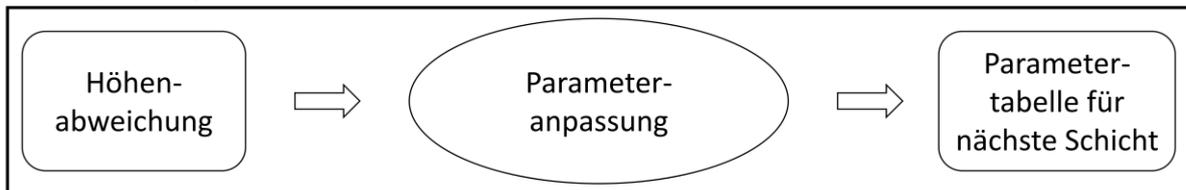


Abbildung 6: Vorgehen zur Ermittlung der Höhenabweichung und Ableitung von individuellen Tropfengrößen in der darauffolgenden Schicht zur Kompensation.

Während des Druckens der darauffolgenden Schicht wird für jeden Tropfen die Parametertabelle geprüft. Sofern für den jeweiligen Tropfen dort ein Eintrag vorliegt, wird dieser verwendet. Andernfalls werden die Standardparameter herangezogen, wie in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: Prozess zur individuellen Parameteranpassung für jeden Tropfen; sofern in der Parametertabelle kein individueller Eintrag vorliegt, werden die Standardeinstellungen verwendet.

7. Unterscheidungsmerkmale zum Stand der Technik und Forschung

Für die additive Fertigung von Metallen kommen derzeit überwiegend pulverbasierte Verfahren zum Einsatz. Die Verarbeitung von Metallen im Material Jetting befindet sich derzeit noch im Forschungsstadium. Dementsprechend ist das Prozessverständnis bisher noch unvollständig.

In dieser Arbeit wurde in Abgrenzung zum Stand der Technik ein System zum Material Jetting von Metallen mit integrierter Sensorik zur Bauteilvermessung entwickelt. Ansätze zum Inline-Monitoring des Druckprozesses existieren bisher lediglich für andere Fertigungsverfahren. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System ist demnach das erste bekannte System für das Material Jetting von Aluminium, das eine direkte Vermessung der gedruckten Bauteile während des Druckvorgangs erlaubt.

Nicht Teil der Arbeit war die Weiterentwicklung des Druckverfahrens hinsichtlich der Verwendung eines separaten Stützmaterials.

8. Realisierung

In diesem Kapitel wird das systematische Vorgehen zur Realisierung einer Material Jetting-Anlage mit integrierter Geometrievermessung beschrieben. Dabei wird die allgemeine Vorgehensweise konkret am Beispiel einer Anlage zur Verarbeitung von Aluminium umgesetzt. Der Fokus wird dabei auf die Auswahl und die Auslegung der wesentlichen Komponenten gelegt, während allgemeine konstruktive Methoden wie beispielsweise fertigungs-, funktions- und montagegerechte Konstruktion nicht explizit beschrieben werden.

Die Realisierung der Anlage wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TU München durchgeführt. Teile der Anlage und der durchgeführten Experimente sind in (Kirchebner et al., 2021a, Kirchebner et al., 2021b, Rehekampff et al., 2021, Rehekampff et al., 2023, Kirchebner et al., 2023) beschrieben.

Das Vorgehen zur Realisierung wurde in einzelne Schritte unterteilt, beginnend mit der Werkstoffauswahl und der Definition der allgemeinen Anforderungen an das System. Im nächsten Schritt wurden die Antriebskomponenten ausgelegt und entsprechende Kaufteile ausgewählt. Anschließend folgten die Auslegung und der Entwurf der weiteren Bestandteile wie Druckkopf, Heizelemente, Sensoren und Messsystem. Nach Auswahl aller Zukaufteile erfolgte die finale konstruktive Umsetzung im CAD-System mit der anschließenden Fertigung und Montage sämtlicher Baugruppen. Den Abschluss bildeten nach der Steuerungsprogrammierung die Inbetriebnahme und Evaluierung des Systems. Nachfolgend sind die wesentlichen Schritte bzw. Aufgaben des Entwicklungsprozesses im Überblick aufgeführt.

1. Werkstoff und wesentliche Systemeigenschaften
2. Kinematik und Antriebssystem
3. Druckkopf und Bauplatzform
4. Heizelemente und Temperaturregelung
5. Sensoren und Messsystem
6. Konstruktion, Fertigung und Montage
7. Inbetriebnahme und Validierung

8.1 Werkstoff und wesentliche Systemeigenschaften / Definition der quantitativen und qualitativen Eckdaten

Die Anwendung der Anlage ist die additive Fertigung von Bauteilen aus Metall, insbesondere aus Aluminium. Ausgehend von der Auswahl des Werkstoffs ergeben sich spezielle Anforderungen durch die benötigten Verarbeitungstemperaturen, die chemische Beständigkeit und weitere Eigenschaften des Materials. Zentrale Eigenschaften der Anlage sind die maximal möglichen Bauteilabmessungen, die minimale und maximale Tropfengröße, die Tropfenrate sowie die maximale Verfahrensgeschwindigkeit der Achsen. Weitere Systemeigenschaften sind die Gestaltung der Benutzerschnittstelle sowie das Konzept zur Verarbeitung von Druckaufträgen.

Basierend auf Vorarbeiten (Rumschoettel et al., 2017, Himmel et al., 2019, Himmel, 2020) wurde entsprechend der erweiterten Anforderungen ein neuer Versuchsstand konzipiert und realisiert. Dieser erlaubt die Verwendung eines Doppeldruckkopfs zur Mehrmaterialverarbeitung sowie die Integration eines Messsystems zur prozessbegleitenden Geometrievermessung der Druckschichten. Er zeichnet sich weiterhin durch ein modulares Konzept aus, das den schnellen Wechsel des Druckkopfs erlaubt. Dadurch kann die Anlage ohne großen Aufwand für andere Werkstoffe verwendet bzw. angepasst werden.

Ausgehend vom Werkstoff Aluminium ergaben sich die Anforderungen bezüglich Temperatur und Werkstoffauswahl für die Druckkopfkomponenten. Für den Druckkopf wurde eine Mindesttemperatur von 700°C festgelegt. Für die Bauplatzform ist eine Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes ausreichend, so dass hierfür 600°C festgelegt wurden. Der Druckkopf sollte Tropfen im Durchmesserbereich von 0,5 bis 1 mm mit einer Frequenz von mindestens 10 Hz erzeugen können. Daraus ergibt sich eine Mindestgeschwindigkeit der Linearachsen von 10 mm/s. In Tabelle 1 sind die zentralen Mindestanforderungen nochmals aufgeführt.

Tabelle 1: Wesentliche Mindestanforderungen an die zu realisierende Anlage

Anforderungen an die MJT-Anlage	
Werkstoff	Aluminiumlegierungen, z.B. AlSi12
Druckkopftemperatur	700°C
Bauplattformtemperatur	600°C
Tropfendurchmesser	0,5 bis 1 mm
Tropfenfrequenz	10 Hz
Verfahrgeschwindigkeit	10 mm/s
Abmessungen der Druckplatte	70 mm x 70 mm

Aus diesen zentralen Eigenschaften ergeben sich die spezifischen Anforderungen an die Unterbaugruppen und Einzelkomponenten, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

8.2 Kinematik und Antriebssystem

Für die Grundstruktur der Kinematik stehen verschiedene Optionen zur Wahl wie beispielsweise ein serielles kartesisches System oder aber eine parallelkinematische Struktur. Für die Auswahl und Auslegung der Kinematik und des Antriebssystems sind dabei der vorab spezifizierte Bauraum sowie die gewünschte Verfahrgeschwindigkeit maßgeblich.

Nach Festlegen der kinematischen Grundstruktur und der gewünschten Beschleunigungen und Verzögerungen können die Antriebe näherungsweise dimensioniert werden. Für die exakte Dimensionierung müssen die Massen der bewegten Teile genau bekannt sein, was jedoch erst nach Abschluss der finalen Konstruktionsphase endgültig möglich ist.

Im Betrieb ist in der Regel für die X- und die Y-Achse eine höhere Dynamik erforderlich als für die Z-Achse, die sich lediglich beim Schichtwechsel bewegen muss und ansonsten weitgehend stillsteht. Stehen die benötigten Antriebsmomente und -leistungen fest, können geeignete konkrete Komponenten ausgewählt werden.

Anforderungen:

Die Hauptanforderung an das Antriebssystem besteht darin, Druckkopf, Geometriesensor und Bauplattform relativ zueinander zu bewegen, um ein Bedrucken und Vermessen der gesamten Bauplattform zu ermöglichen. Dabei muss einerseits die vorab festgelegte Verfahrgeschwindigkeit und andererseits eine ausreichende Positioniergenauigkeit erreicht werden.

Gleichzeitig muss die inerte Atmosphäre innerhalb der Prozesskammer gewährleistet werden, so dass die Übertragung der Bewegung über eine Dichtung erfolgen muss.

Lösungsmöglichkeiten:

Für den Antrieb der Achsen ist, wie vorne beschrieben, grundsätzlich eine serielle oder eine parallele Kinematik denkbar. Zur Gewährleistung der inerten Atmosphäre innerhalb der Prozesskammer muss diese zur Umgebung hin abgedichtet sein. Das Antriebssystem kann also entweder innerhalb der Prozesskammer angebracht werden oder die Bewegungen müssen von außen durch eine Dichtung hindurch nach innen übertragen werden. Alternativ ist eine Lösung denkbar, bei der sich Bauplattform und umgebende Prozesskammer gemeinsam bewegen, während der Druckkopf stillsteht. Bei dieser Lösung findet eine Relativbewegung zwischen Druckkopf und Prozesskammer statt, sodass an dieser Stelle entsprechend abgedichtet werden muss.

Die benötigten Verfahrswege des Achsensystems ergeben sich aus der Größe der Druckplatte in Verbindung mit der Position der Druckköpfe und des Geometriesensors. Jeder Punkt auf der Druckplatte muss sowohl von den beiden Druckköpfen als auch vom Sensor erreicht werden können. Zusätzlich zu den Abmessungen der Druckplatte muss der Plattformträger, auf dem diese befestigt ist, berücksichtigt werden. Bei der Konstruktion der beteiligten Komponenten war somit ein iteratives Vorgehen notwendig, um die Verfahrswege ohne Kollisionen zu gewährleisten. Mit der in 8.3 beschriebenen Adapterplatte für den Doppeldruckkopf und dem Sensor aus 8.6 ergaben sich für die benötigten Verfahrswege in X- und Y-Richtung jeweils 130 mm, wie in Abbildung 8 veranschaulicht.

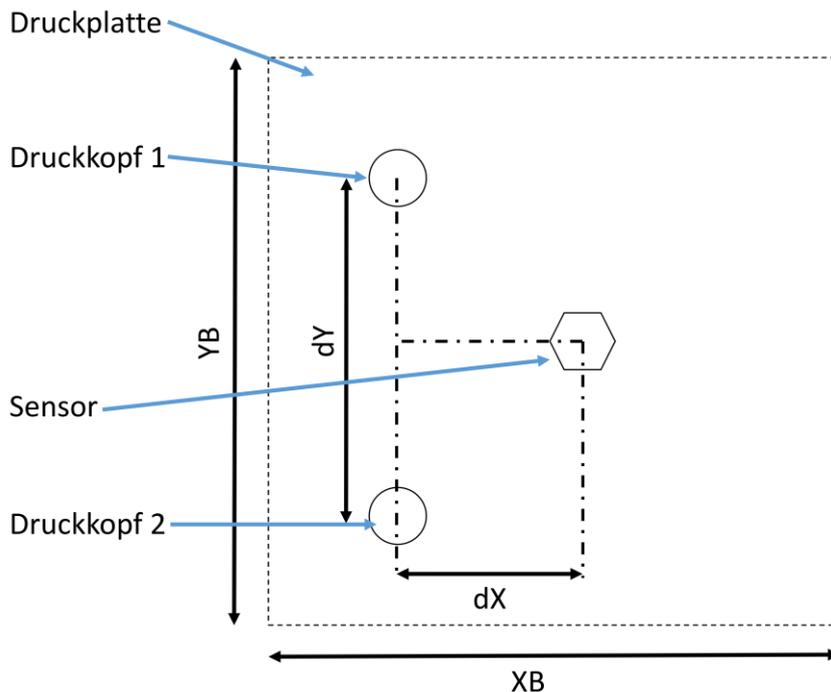


Abbildung 8: Veranschaulichung der Positionierung der Druckköpfe und des Geometriesensors zur Ermittlung der benötigten Verfahrenswege, um mit beiden Druckköpfen und dem Sensor jeden Punkt der Druckplatte erreichen zu können; der Sensor befindet sich auf der Mittelsenkrechten der Verbindungslinie der beiden Druckköpfe.

Bezüglich der Beschleunigung genügt in dieser Anwendung eine grobe Dimensionierung, da während des Druckens keine besonders hohe Dynamik der Achsen notwendig ist. Der Grund dafür ist, dass der Druckkopf weitgehend mit konstanter Geschwindigkeit zeilenweise das Bauteil erstellt und das Beschleunigen und Verzögern außerhalb des Bauteilbereichs stattfinden kann. Dementsprechend ist die Auslegung hierzu nicht kritisch und die Motoren wurden ausgehend von Erfahrungen einer früheren Anlage mit ähnlichen Kennwerten ausgewählt.

Ausgewählte Lösung:

Aufgrund der erhöhten Temperatur innerhalb der Prozesskammer wurde eine Lösung umgesetzt, bei der sich die Antriebe außerhalb der Kammer befinden. Dies erschien mit einem kartesischen Linearsystem einfacher umsetzbar als mit einem Deltasystem. Die Gewährleistung der inerten Atmosphäre innerhalb der Prozesskammer erfolgte durch eine Dichtplatte, die sich gemeinsam mit der Bauplatzform relativ zur Prozesskammer bewegt.

Nach der Ermittlung der benötigten Verfahrenswege wurden geeignete Linearsysteme ausgewählt. Die weiteren Anforderungen an diese sind dabei

Spielfreiheit und eine für den Druckprozess ausreichende Wiederholgenauigkeit. Um dies zu erreichen, wurden vorgespannte Kugelumlaufführungen ausgewählt. Die Führungen der X- und Y-Achse bestehen dabei aus jeweils einer Führung mit integrierter Kugelumlaufspindel zum Antrieb sowie einer gegenüber angeordneten Führung ohne Antrieb. Konkret ausgewählt wurden die Typen HM040S005N0130L000CNNL (Linearmodul) und HGL25SA-2-R300-ZA-H (Führungsschiene mit Wagen) (*HIWIN GmbH*). Das Linearmodul besitzt die folgenden technischen Daten:

Tabelle 2: Technische Daten der Linearführungen der X- und Y-Achse

Technische Daten der Linearmodule der X- und Y-Achse	
Breite	40 mm
Länge	373 mm
Verfahrweg	120 mm
Antrieb	Spindelachse, 5 mm Steigung
Antriebsschnittstelle	Riementrieb

In Abbildung 9 ist ein CAD-Modell der beiden Führungen zu sehen, die jeweils für die X- und Y-Achse verwendet wurden. Dabei sind je Achse die passive, nicht angetriebene Führung sowie die Antriebseinheit mit montiertem Motor abgebildet. Der Motor ist über eine Zahnriemenstufe mit der Gewindespindel verbunden.

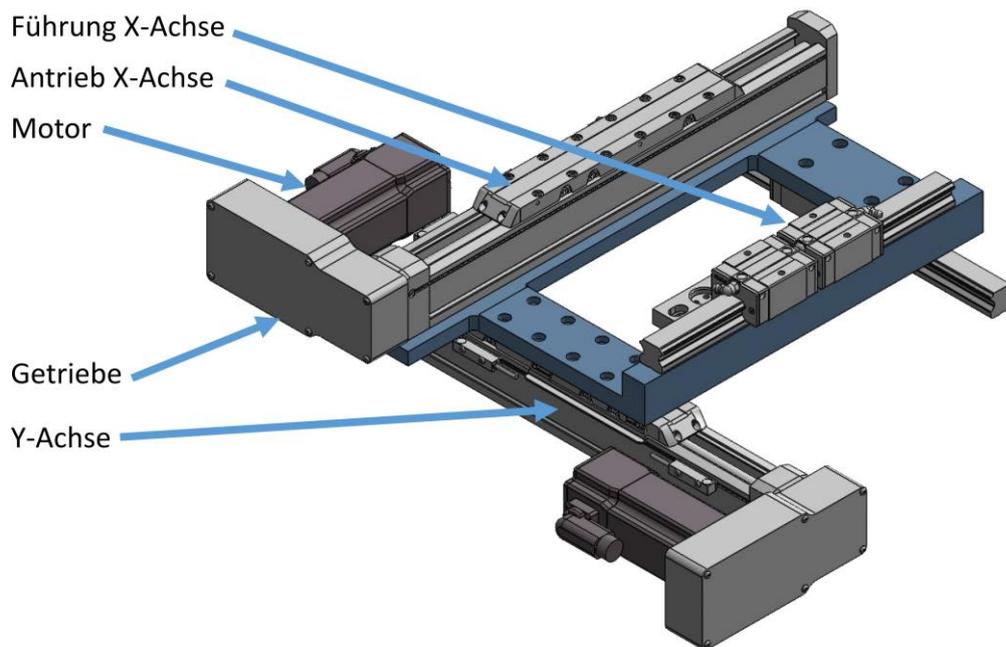


Abbildung 9: CAD-Modell der Führungen von X- und Y-Achse mit zugehörigen Motoren.

Das im Rahmen montierte Achsensystem mit Motoren, Plattformträger und weiteren Komponenten ist in Abbildung 10 als CAD-Modell zu sehen. Die unten befindliche Y-Achse trägt sämtliche Komponenten der X- und Z-Achse, womit sich eine serielle Kinematik ergibt. Die Bestandteile der Z-Achse sind an einer Trägerplatte befestigt, die im Gesamtaufbau mit einer Dichtplatte verbunden wird. Diese dichtet mit einer PTFE-Dichtung die Prozesskammer nach unten ab. Die Bauplattform befindet sich am oberen Ende des Kolbens der Z-Achse, der in zwei Gleitlagern geführt ist.

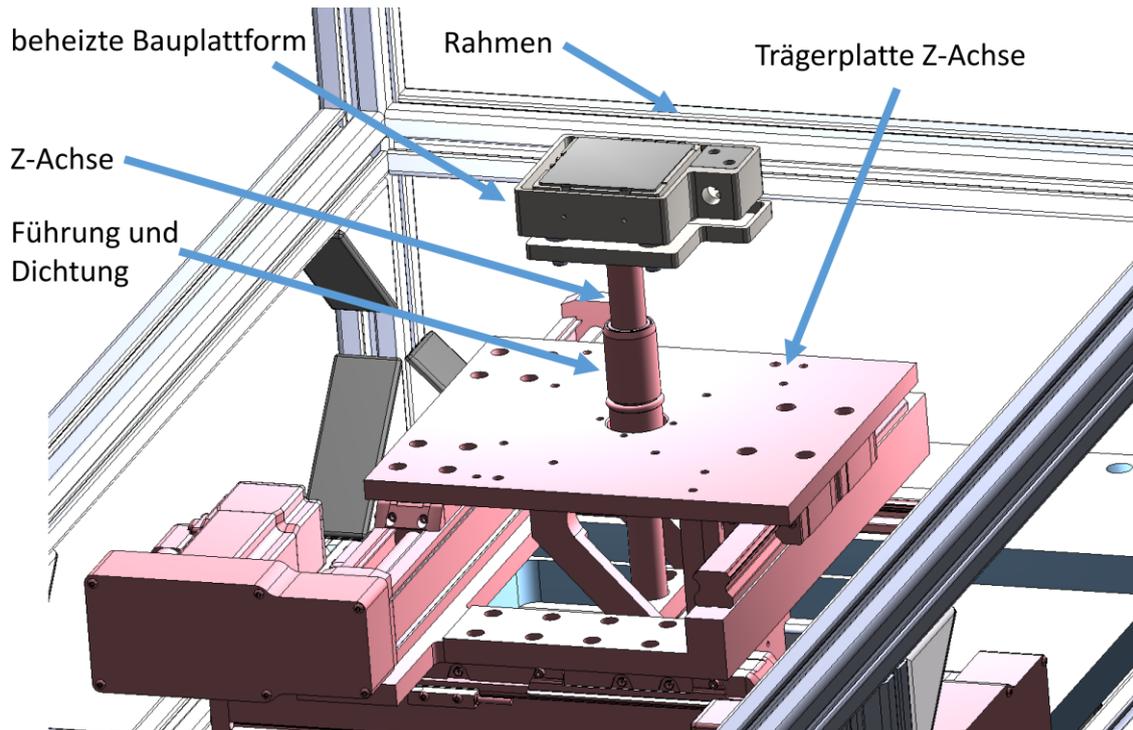


Abbildung 10: CAD-Modell des Achsensystems mit Z-Achse und Bauplattform im eingebauten Zustand.

Für den Antrieb der X- und Y-Achse kamen Servomotoren vom Typ AM8122-0F10 (*Beckhoff Automation GmbH & Co. KG*) zum Einsatz. Diese besitzen bei einer Betriebsspannung von 48 V ein Nenndrehmoment von 0,80 Nm bis zur Nenndrehzahl von 2000 1/min. Die Motoren sind jeweils mit einem Drehencoder mit 18 Bit Auflösung versehen. Der Messbereich der Encoder beträgt 360° (single-turn-Encoder), so dass zur absoluten Positionsmessung zusätzlich für jede Achse ein Referenzschalter notwendig ist, der nach dem Einschalten angefahren werden muss.

In Verbindung mit der Steigung der verwendeten Gewindespindel von $d = 5 \text{ mm}$ ergeben sich die folgenden Eigenschaften des Antriebssystems:

Maximale Verfahrgeschwindigkeit unter Annahme der Nenndrehzahl der Motoren:

$$v = n * d = 2000 \frac{1}{\text{min}} * 5 \text{ mm} = 166 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (3)$$

Die (theoretische) Positionsauflösung ε des Achsensystems ergibt sich aus der Auflösung des Encoders von 18 Bit in Verbindung mit der Spindelsteigung:

$$\varepsilon = \frac{d}{2^{18}} = \frac{5 \text{ mm}}{262144} = 0,019 \mu\text{m} \quad (4)$$

Die maximal mögliche Beschleunigung bzw. Verzögerung ergibt sich aus dem Gesamtträgheitsmoment des Systems, bestehend aus den rotierenden Komponenten Motor, Riemenräder und Spindel sowie den translatorisch bewegten Komponenten (Achssystem mit Linearführung und Bauplattform). Wie oben erwähnt, konnte hier auf eine exakte Auslegung verzichtet werden, da bereits Erfahrungswerte vorlagen und die ausgewählten Komponenten ein ausreichendes Beschleunigungsvermögen bieten.

Tabelle 3: Parameter des Antriebssystems aus Motor und Führung für X- und Y-Achse

Parameter des Antriebssystems der X- und Y-Achse	
Maximale Verfahrgeschwindigkeit	166 mm/s
Positionsauflösung	0,019 μm

Für die Z-Achse ist gegenüber der X- und Y-Achse eine deutlich geringere Dynamik erforderlich, da während des Druckens einer Schicht die Z-Achse unbewegt ist. Für den Antrieb wurde eine Linearführung mit integrierter Kugelgewindespindel vom Typ KK50 02P200A1F00SA (*HIWIN GmbH*) ausgewählt. Als Motor kam ein Schrittmotor mit Encoder vom Typ AS2021-0D10 (*Beckhoff Automation GmbH & Co. KG*) zum Einsatz. Dieser wird mittels einer Schrittmotorklemme vom Typ EL7037 (*Beckhoff Automation GmbH & Co. KG*) angesteuert. Dabei besitzt er bei Verwendung von feldorientierter Regelung bei 24 V ein Drehmoment von 0,6 Nm im Stillstand, das laut Datenblatt bis zu einer Drehzahl von 900 1/min weitgehend linear auf einen Wert von 0,35 Nm abnimmt.

Eine Drehzahl von 900 1/min entspricht in Verbindung mit der Spindelsteigung von 1 mm einer Lineargeschwindigkeit von 15 mm/s. Die im Betrieb notwendigen Geschwindigkeiten liegen etwa eine Größenordnung niedriger, so dass hier keine Probleme zu erwarten sind. Die maximal aufbringbare Kraft des Linearsystems ergibt sich wie folgt:

$$F = \frac{2 * \pi * M}{d} = \frac{2 * \pi * 0,6 \text{ Nm}}{1 \text{ mm}} \approx 3.770 \text{ N} \quad (5)$$

Bei den in z-Richtung bewegten geringen Massen sind also auch hier offensichtlich keine Probleme zu erwarten. In Tabelle 4 sind die wesentlichen Komponenten des Antriebssystems zusammenfassend im Überblick aufgeführt.

Tabelle 4: Technische Daten der verwendeten Servomotoren für die X- und Y-Achse.

Komponente	Typ	Hersteller
Antrieb X- und Y-Achse	Servomotor AM8122-0F10	Beckhoff Automation GmbH & Co. KG
Linearführung X- und Y-Achse Antriebsseite	HM040S005N0130L000CNL	HIWIN GmbH
Linearführung X- und Y-Achse Führungsseite	HGL25SA-2-R300-ZA-H	HIWIN GmbH
Antrieb Z-Achse	Schrittmotor AS2021-0D10	Beckhoff Automation GmbH & Co. KG
Linearführung Z-Achse	KK50 02P200A1F00SA	HIWIN GmbH

8.3 Druckkopf und Bauplattform

Beim Entwurf des Druckkopfs sind in erster Linie die zu verarbeitenden Werkstoffe relevant. Diese bestimmen einerseits die erforderliche Verarbeitungstemperatur, andererseits sind sie für die Werkstoffauswahl der Druckkopfkomponenten im Hinblick auf deren chemische Beständigkeit bzw. Kompatibilität maßgeblich.

Weitere Einflussfaktoren sind die gewünschte Tropfengröße und -rate, also der Materialdurchsatz. Sie bestimmen einerseits die erforderliche Düsengeometrie bzw. deren Durchmesser. Andererseits hängt die erforderliche Heizleistung des Druckkopfs vom gewünschten Materialdurchsatz ab.

Die vom Druckkopf ausgestoßenen Tropfen treffen auf die Bauplattform, wo sie durch Abkühlung erstarren. Um ein zu schnelles Erstarren und somit eine unzureichende Anhaftung zu vermeiden, wird auch die Bauplattform beheizt.

Die benötigten Druckkopftemperaturen wurden bereits in 8.1 genannt. Für die Werkstoffauswahl bei der Verarbeitung von Aluminium muss auf Beständigkeit gegenüber der Metallschmelze geachtet werden. Der verwendete Druckkopf und das zugehörige Pneumatiksystem basieren auf Vorarbeiten von Rumschoettel et al. (2017).

In der folgenden Abbildung 11 ist der schematische Aufbau des Pneumatiksystems dargestellt. Stickstoff aus einer Druckgasflasche wird über einen elektronischen Druckregler zu einem Puffervolumen geführt. Durch ein

schnell schaltendes Magnetventil wird ein Druckpuls über die Laufleitung zum Druckkopf geleitet. Am Druckkopf befindet sich eine Drossel zur Terminierung des Druckpulses. Diese dient dazu, durch Impedanzanpassung die Entstehung von Druckwellenreflexionen zu verringern. Dadurch wird die akustische Bandbreite des Systems erhöht und dadurch eine höhere Tropfenrate ermöglicht.

Ein weiterer Druckregler dient zur Einstellung des Volumenstroms, der durch die Schutzgasdüse am unteren Ende des Druckkopfs ausströmt. Dadurch ist direkt am Ort der Tropfenerzeugung eine sauerstoffarme Umgebung gewährleistet und Oxidation der Tropfen wird verhindert.

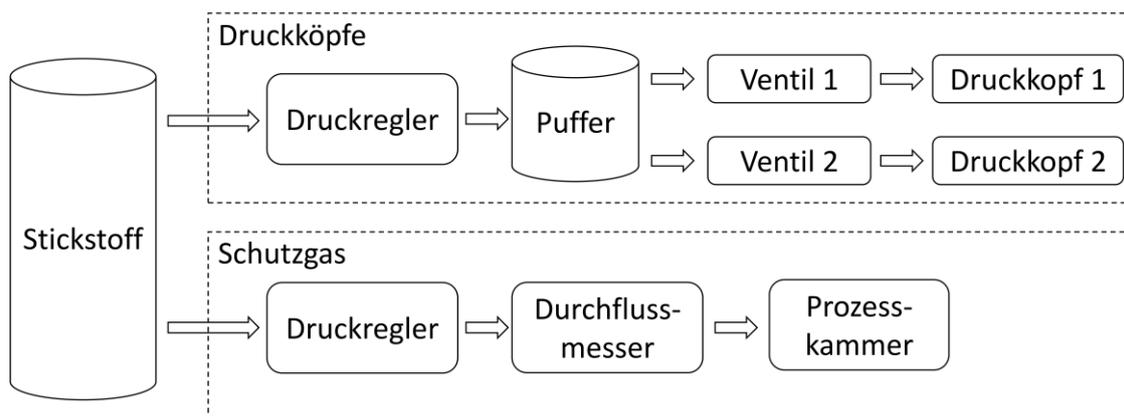


Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Pneumatiksystems für die Druckköpfe und die Prozesskammer: Zur Ansteuerung der Druckköpfe wird Stickstoff über einen elektronischen Druckregler zu einem Puffervolumen geführt. Durch je ein Magnetventil kann ein Druckimpuls über die Laufleitung zum jeweiligen Druckkopf geleitet werden. Die Flutung der Prozesskammer mit Schutzgas erfolgt über einen separaten Druckregler. Der jeweilige Volumenstrom kann an einem Durchflussmesser abgelesen werden.

Eine Schnittansicht des CAD-Modells des Druckkopfs für die Verarbeitung von Aluminium ist in Abbildung 12 dargestellt. Unter der Deckplatte befindet sich als zentrales Element der Tiegel, der das aufgeschmolzene Aluminium beinhaltet. Zur Zuführung der thermischen Energie dient das Heizelement. Die Düse wird mittels einer Dichtung am Tiegel montiert. Zur Zuführung von Schutzgas in direkter Umgebung der ausgestoßenen Tropfen dient die Schutzgaszuführung. Zwischen Schutzgaszuführung und Tiegel befindet sich eine thermische Isolierung. Der Aluminiumdraht sowie die Druckpulse zur Tropfenerzeugung werden am oberen Ende durch eine Öffnung eingeleitet. Der dort anzubringende Anschlussblock mit der Drosselschraube ist in der Abbildung nicht dargestellt.

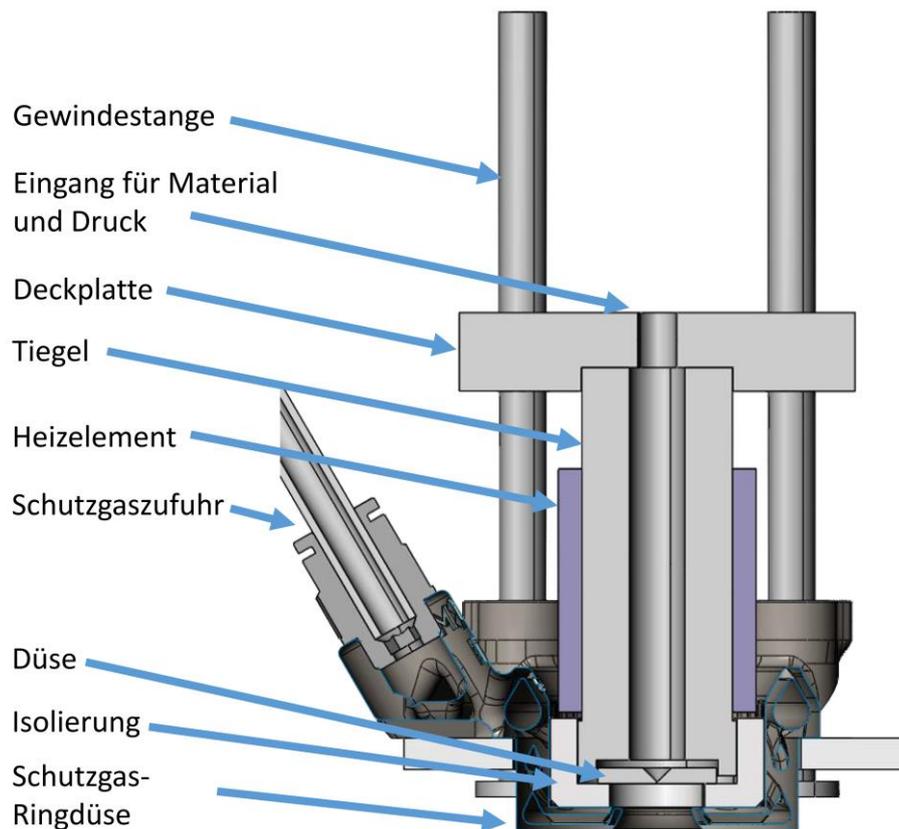


Abbildung 12: Schnittansicht (CAD) des Druckkopfs mit Kennzeichnung der wesentlichen Bestandteile.

Für den Tiegel wurde in Vorarbeiten Siliziumnitrid mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit mit der Bezeichnung SN-TC (*FCTI Ingenieurkeramik GmbH*) verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf Syalon 101 (*International Syalons Ltd.*), eine Silizium-Aluminium-Oxid-Nitrid-Keramik, zurückgegriffen. Dieser Werkstoff zeigt laut Herstellerangaben bei Einsatztemperaturen bis zu 950°C keine chemische Reaktion bei Kontakt mit Aluminiumschmelze.

Der Tiegel besitzt eine zentrische, durchgängige Bohrung mit 7,0 mm Durchmesser sowie eine exzentrische Bohrung mit 2,2 mm Durchmesser zur Aufnahme eines Thermoelements. Die weiteren Abmessungen sind in Abbildung 13 dargestellt.

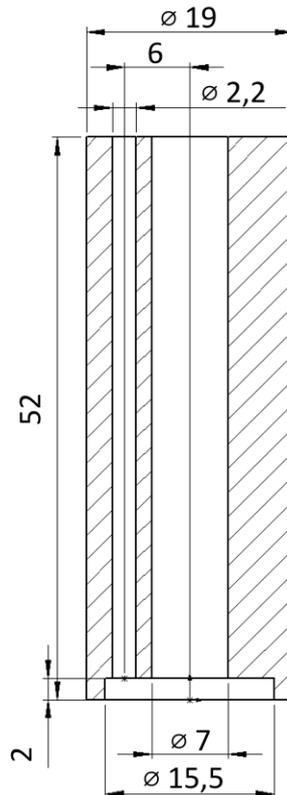


Abbildung 13: Schnittansicht des Tiegels mit Bemaßung in Millimetern; die mittige Bohrung dient zum Aufschmelzen des Aluminiums. In die dünnere Bohrung seitlich wird ein Thermoelement zur Temperaturmessung eingeführt. Die Kreistasche am unteren Ende nimmt die Düse sowie eine Graphitdichtung auf.

Für die Düse kamen sowohl Shapal Hi-M-Soft (*Tokuyama Corporation*), eine mechanisch bearbeitbare Keramik aus Aluminiumnitrid und Bornitrid, als auch Graphit vom Typ R7340 (*SGL CARBON GmbH*) zum Einsatz. Die Düse basiert auf einer Scheibe mit einem Durchmesser von 15 mm und einer Dicke von 2 mm. Sie besitzt eine Senkung sowie eine zentrische Bohrung mit 0,25 mm Durchmesser und 0,5 mm Länge. In Abbildung 14 ist die zugehörige Zeichnung zu sehen.

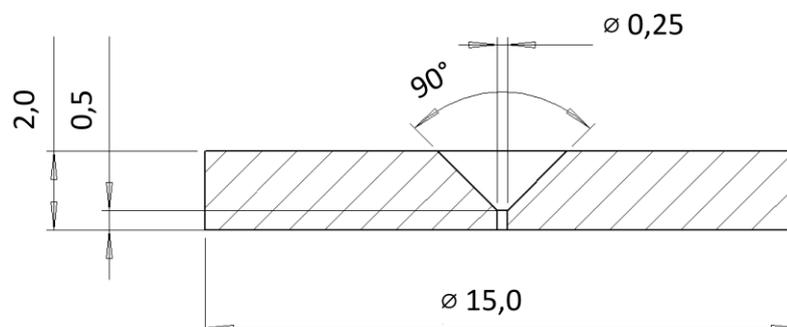


Abbildung 14: Schnittansicht der Düse mit Bemaßung in Millimetern.

Die Werkstoffe bzw. Bezeichnungen der weiteren Bestandteile sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Komponenten von Druckkopf und Pneumatiksystem

Komponente	Werkstoff bzw. Typ	Hersteller
Abdeckung	Stahl S235JR / 1.0037	(-)
Schmelztiegel	Syalon 101	International Syalons Ltd.
Heizelement Druckkopf	hotspring Mini /F 1.3x2.3	Hotset GmbH
Düse	Shapal Hi-M-Soft	Tokuyama Corporation
	Graphit R7340	SGL CARBON GmbH
Dichtung	Graphit	
Schutzgaszuführung	Stahl 1.4404	(-)
Thermoelement	Typ K mit 2,0 mm Hülse	Electronic Sensor GmbH
Magnetventil	MHJ9-MF	Festo Vertrieb GmbH & Co. KG
Druckregler	VPPE-3-1-1/8-6-010-E1	Festo Vertrieb GmbH & Co. KG

8.4 Heizelemente und Temperaturregelung

Die benötigte Heizleistung des Druckkopfs ergibt sich zum einen aus der stationären Wärmeabgabe an die Umgebung. Zum anderen muss das zugeführte Material aufgeheizt und aufgeschmolzen werden, um einen kontinuierlichen Materialfluss zu ermöglichen. Die Auslegung der Heizung kann durch thermische Berechnung bzw. Simulation erfolgen. Da die exakte Dimensionierung nicht kritisch ist, wird hier das identische Heizelement wie im früheren Versuchsaufbau verwendet: hotspring Mini /F 1.2x2.3 (*Hotset GmbH*).

Dieses besitzt für ein ausreichend schnelles Aufheizen auf die Betriebstemperatur eine höhere Leistung als für den stationären Betriebszustand erforderlich.

Die Bauplattform besitzt, verglichen mit den auftreffenden Tropfen, eine wesentlich größere thermische Masse. Demnach kann das thermische Verhalten der Bauplattform im Betrieb als stationär angesehen werden. Die in diesem

Zustand benötigte Heizleistung hängt also lediglich von der Wärmeabgabe an die Umgebung ab. Auch hier erfolgt ausgehend von Erfahrungswerten eine entsprechende Dimensionierung, um ein ausreichend schnelles Aufheizen zu ermöglichen.

Sowohl für Druckkopf als auch für die Bauplattform ist eine Temperaturregelung unabdingbar, weshalb entsprechende Sensoren an geeigneter Stelle anzubringen sind. Anschließend muss ein geeigneter Regelungsalgorithmus ausgewählt und implementiert werden sowie die Regelparameter festgelegt werden. Ausgehend von den angestrebten Temperaturbereichen werden Thermoelemente vom Typ K ausgewählt. Für den Druckkopf kommt ein Mantelthermoelement mit einem Außendurchmesser von 2,0 mm und der Bezeichnung IKT 20/10/2 K zum Einsatz (*ES Electronic Sensor GmbH*). Das Thermoelement befindet sich im Betrieb in einer Bohrung im Tiegel und berührt mit seiner Spitze die Oberseite der Düse. Neben der Druckkopftemperatur wird ebenso die Temperatur der Bauplattform über ein Thermoelement gemessen. Die Steuerung bietet eine Schnittstelle für insgesamt bis zu acht Thermoelemente für verschiedene Zwecke.

Die für den Druckkopf während des Betriebs benötigte Heizleistung setzt sich wie beschrieben aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

1. Stationäre Wärmeverluste an die Umgebung
2. Aufheizen und Aufschmelzen des zugeführten Aluminiums

Die Abschätzung der stationären Verluste kann beispielsweise über eine thermische Simulation erfolgen. Für das Aufschmelzen des Aluminiums kann anhand der angestrebten Tropfenrate in Verbindung mit der Tropfengröße die benötigte Leistung berechnet werden. Da der verwendete Druckkopf aus früheren Arbeiten übernommen wurde, konnte auf eine erneute Auslegung des Heizelements verzichtet werden.

Für die Temperaturregelungen wurde ein PID-Regler ausgewählt. Da es sich bei diesen Regelstrecken um Systeme mit vergleichsweise geringer Dynamik handelt, war die Auslegung der Regler unkritisch und erfolgte empirisch.

8.5 Inertgas / Regelung des Sauerstoffgehalts

Zur Erzeugung der inerten Atmosphäre mit reduziertem Sauerstoffgehalt innerhalb der Prozesskammer sowie zum Betrieb der Druckköpfe ist eine Versorgung mit Schutzgas wie beispielsweise Stickstoff notwendig. Dafür musste ein geeignetes pneumatisches System entworfen werden, das die Steuerung des

Schutzgasstroms sowie die Einstellung von Druck und Impulsdauer für den Druckkopf ermöglicht.

Zur Ermittlung des Sauerstoffgehalts innerhalb der Prozesskammer ist ein Sauerstoffsensor notwendig, der die Regelung über das Einstellen des zugeführten Schutzgasvolumenstroms ermöglicht. Dafür kam ein Sensor mit der Bezeichnung EGa0202std-D0001A100 (*SENSORE Electronic GmbH*) zum Einsatz. Dieser besitzt einen Messbereich bis zu 1000 ppm Sauerstoffgehalt. Der Sensor ist an der Rückwand der Prozesskammer befestigt. Die Messgröße wird über einen Stromausgang (4-20 mA) ausgegeben und über eine entsprechende Klemme (Typ EL3174) der Steuerung erfasst.

8.6 Messsystem zur Geometrievermessung

Das Sensorsystem zur Inline-Erfassung der Bauteilgeometrie ist ein weiteres zentrales Element. Verfügbare Messverfahren mussten auf ihre Eignung für den Einsatz im Drucker untersucht und evaluiert werden. Wesentliche Anforderungen waren dabei eine hinreichende Auflösung und Messfrequenz sowie eine kompakte Bauform und ausreichende Temperaturbeständigkeit, um gemeinsam mit dem beheizten Druckkopf montiert werden zu können.

Die in Frage kommenden Messsysteme können hierbei eingeteilt werden in *zweidimensionale* Systeme, die direkt eine räumlich aufgelöste Höhendarstellung des Bauteils liefern, *eindimensionale* Systeme, die einen Höhenabriss entlang einer Linie erzeugen und *nulldimensional* bzw. punktförmig messende Systeme, die lediglich an einem Punkt die Höhe bestimmen können. Linienförmig messende Systeme müssen demnach zur Erstellung einer Höhenkarte entlang einer Dimension bewegt werden. Punktuell messende System müssen entlang von zwei Dimensionen verfahren werden, um eine räumlich aufgelöste Höhendarstellung zu erhalten.

Alle der oben genannten Funktionsprinzipien sind für die hier zu lösende Messaufgabe prinzipiell geeignet. Die Auswahl des Systems wird dabei von den anderen Randbedingungen bzw. Anforderungen bestimmt. Diese sind eine ausreichende Messauflösung und -genauigkeit sowie eine ausreichend hohe Messfrequenz. Gleichzeitig soll das System aufgrund der Montage nah am Druckkopf kompakt und temperaturbeständig sein. Des Weiteren muss das System von außen durch ein optisches Fenster hindurch messen können. Somit ist ein ausreichend großer Messabstand notwendig.

Ausgehend davon wurden für das Messsystem die in Tabelle 6 aufgeführten quantitativen Größen als Mindestanforderungen festgelegt.

Tabelle 6: Quantitative Anforderungen an das Messsystem zur Geometrievermessung

Anforderungen an das Messsystem	
Auflösung X- und Y-Richtung	0,2 mm (0,5 x Tropfendurchmesser)
Auflösung Z-Richtung	0,1 mm (0,25 x Tropfendurchmesser)
Abmessungen	< 20 mm Durchmesser
Messabstand	> 10 mm
Temperaturbeständigkeit	> 60°C

Zusätzlich zu diesen quantitativen Anforderungen muss das System den prozessspezifischen Herausforderungen genügen, also auf reflektierenden Oberflächen (Aluminium) und an steilen Kanten des Bauteils Messdaten gewinnen können. Diese beiden Randbedingungen stellen für optische Messsysteme eine Herausforderung dar.

Das auszuwählende und zu integrierende Messsystem ist dadurch gekennzeichnet, dass es die Höhe der Tropfen, also deren Ausdehnung entlang der z-Richtung ermitteln soll. Es werden also nicht einzelne Tropfen gezielt erfasst, sondern die Bauplatzform beispielsweise in der xy-Ebene in Bahnen rasterförmig abgefahren, um dadurch eine vollständige Abbildung der gedruckten Schicht zu erhalten.

Aufbau des Messsystems und Integration in den Versuchsstand

Das ausgewählte Messsystem musste aufgebaut und in den Prüfstand integriert werden. Um eine Beschädigung des Messsystems durch zu hohe Temperaturen zu vermeiden, ist durch konstruktive Maßnahmen die Einhaltung der erlaubten Betriebsparameter sicherzustellen. Das Messsystem sollte deshalb bevorzugt außerhalb des Bauraums angeordnet werden und durch ein optisches Fenster die gedruckten Schichten vermessen. Die Einhaltung der erlaubten Betriebstemperatur sollte durch eine thermische Simulation und anschließende Validierung sichergestellt werden.

Neben der mechanischen Integration musste auch die softwareseitige Einbindung in die Druckersteuerung umgesetzt werden. Der Druckprozess war entsprechend so anzupassen, dass nach jeder gedruckten Schicht eine Vermessung erfolgen kann, bevor anschließend die nächste Schicht gedruckt wird. Die Messdaten sollen geeignet exportiert werden, um eine leichte Auswertung und Konvertierung zu einem Oberflächenmodell bzw. 3D-Modell zu ermöglichen.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte Auswahl, mechanische und softwareseitige Integration in die Anlage genauer beschrieben.

8.6.1 Auswahl eines geeigneten Systems

Ausgehend von den oben aufgeführten Anforderungen wurden die verfügbaren Sensorsysteme hinsichtlich der einzelnen Kriterien untersucht. Besonders die notwendige Kompaktheit des Messsystems schränkte die Auswahlmöglichkeiten für ein geeignetes System deutlich ein.

Das Verfahren der Fokusvariation ermöglicht prinzipiell, je nach verwendetem Bildsensor, die Erfassung der Bauteiloberfläche in hoher Auflösung. Auf diesem Prinzip basierende Messlösungen sind jedoch überwiegend in stationären, Mikroskop-ähnlichen Geräten erhältlich. Kompakte Systeme zur Integration in bestehende Anwendungen sind dagegen kaum erhältlich.

Verfügbare Systeme, die auf Lasertriangulation basieren, besitzen für den in dieser Anwendung geplanten Bauraum große Abmessungen. Dies trifft sowohl auf die punktförmig, als auch auf die linienförmig messenden Systeme zu. So besitzt beispielhaft der Linien-Laserscanner LT30x2-25 (*Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG*) Abmessungen von etwa 40 mm x 100 mm x 80 mm. Zusätzlich wird ein vergleichsweise großes optisches Messfenster benötigt, da Lichtquelle und Detektor bedingt durch das Funktionsprinzip in deutlichem Abstand zueinander angebracht sind. Dies erschwerte im vorliegenden Fall die Integration in die Prozesskammer der Versuchsanlage.

Besonders kompakte Sensoren sind mit dem Funktionsprinzip der chromatisch-konfokalen Abstandsmessung erhältlich. Die konfokale Anordnung von Lichtquelle und Detektor erlaubt die Herstellung von Messköpfen mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern wie beispielsweise den Messkopf IFS2402 (*Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG*) mit 4 mm Durchmesser. Durch diese Bauweise ist lediglich ein kleines optisches Fenster für den Sensor notwendig. Zusätzlich kann der Sensor nahe am Druckkopf montiert werden, wodurch die benötigten Verfahrenswege zum Erfassen der gesamten Bauplattform reduziert werden.

Tabelle 7: Erfüllung der gestellten Anforderungen durch verschiedene verfügbare Messverfahren

	Auflösung XY	Auflösung Z	Abmessung	Mess- abstand	Temperatur- bereich
Triangulation (punktförm.)	OK	OK	Zu groß	OK	OK
Triangulation (linienförm.)	OK	OK	Zu groß	OK	OK
Chromatisch- konfokal	OK	OK	OK	OK	OK

Ausgehend von den oben aufgeführten Punkten wurde für die konkrete Anwendung ein chromatisch-konfokales Messsystem ausgewählt. Insbesondere die benötigten kompakten Abmessungen waren für die Auswahl ausschlaggebend. In durchgeführten Tests an zuvor gedruckten Bauteilen wurden zwei derartige Systeme evaluiert. Dabei konnten beide Systeme auch an steilen Bauteilkanten noch ausreichend viele gültige Messpunkte gewinnen. Beim abschließend ausgewählten System handelt es sich um den Messkopf IFS2404-2 in Verbindung mit dem Controller IFC2421 (beide *Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG*). Der Messkopf besitzt die in der folgenden Tabelle 8 aufgeführten technischen Daten.

Tabelle 8: Wesentliche technische Daten des Messkopfs IFS2404-2

Messbereich	2 mm
Messbereichsanfang	14 mm
Auflösung (statisch)	40 nm
Auflösung (dynamisch)	125 nm
Linearität	1 μ m
Lichtpunktdurchmesser	10 μ m
Temperaturbereich	5 bis 70°C
Durchmesser	12 mm
Länge	42 mm

In Verbindung mit dem Controller IFC2421 stehen mehrere Schnittstellen für das Messsignal zur Verfügung, darunter Ethernet, EtherCAT, RS422, PROFINET, sowie ein analoger Strom- und Spannungsausgang.

8.6.2 Mechanische Integration und Kühlung des Sensorsystems

Nach der Auswahl des konkreten Messsystems musste dieses mechanisch in die Versuchsanlage integriert werden. Dabei musste eine Überschreitung der erlaubten Betriebstemperatur des Sensors vermieden werden. Der Sensor wird im Betrieb durch den Druckkopf (Wärmeleitung und -strahlung), durch die Prozesskammer (Wärmeleitung) sowie durch die Bauplattform (Wärmestrahlung) erwärmt.

Zur Gewährleistung der erlaubten Betriebstemperatur wurde für das optische Fenster ein Infrarot-Filterglas gegen Wärmestrahlung eingesetzt. Zusätzlich wurde eine thermische Isolierung gegen Wärmeleitung in Verbindung mit einer Wasserkühlung eingesetzt. In Abbildung 15 ist eine CAD-Schnittansicht des Sensors mit umgebendem Kühlsystem zu sehen. Im Folgenden wird das Kühlsystem genauer beschrieben.

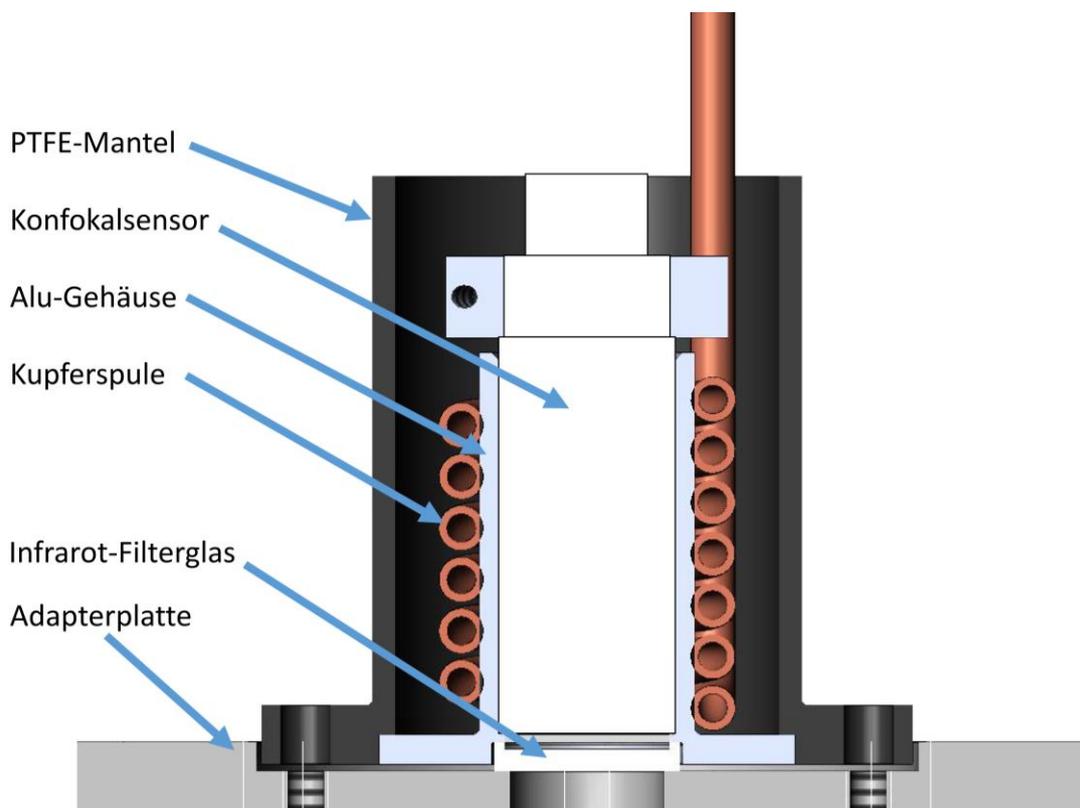


Abbildung 15: Schnittansicht (CAD) des Konfokalsensors mit umgebendem Kühlsystem; der Sensor ist von einem Aluminium-Gehäuse umgeben und wird über eine Kupferspule mit Wasser gekühlt. Ein Infrarot-Filterglas schirmt Wärmestrahlung von der Bauplattform ab. An der Adapterplatte aus Aluminium ist neben dem Sensor der Druckkopf montiert.

Um vom Druckkopf ausgehende Wärmestrahlung abzuschirmen, ist das Kühlsystem von einem PTFE-Mantel umgeben. Dieser dient gleichzeitig zur Befestigung des Systems an der darunter befindlichen Adapterplatte, die auch den Druckkopf aufnimmt. Um den Wärmeeintrag durch Wärmeleitung über die Adapterplatte zu reduzieren, hat das Aluminiumgehäuse keinen direkten Kontakt mit der Adapterplatte. Stattdessen befindet sich dazwischen das Infrarot-Filterglas. Somit findet Wärmeleitung lediglich durch die kleine Kontaktfläche von Adapterplatte zu Glas und von Glas zu Aluminiumgehäuse statt. Zusätzlich tragen die vier Befestigungsschrauben zur Wärmeleitung an den PTFE-Mantel bei. Dieser wiederum hat auch nur eine kleine Kontaktfläche zum Aluminiumgehäuse zur Reduktion der Wärmeleitung.

Neben der Wärmeleitung durch die benachbarten Komponenten ist Wärmestrahlung von der beheizten Bauplattform eine weitere Wärmequelle. Die Ermittlung der durch Strahlung eingebrachten Leistung erfolgt über das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Dieses gibt die gesamte von einem idealen Schwarzen Körper emittierte Strahlungsleistung an. Für einen realen Körper wird die Formel um den Emissionsgrad ergänzt.

$$P = \varepsilon * \sigma * A * T^4 \quad (6)$$

Dabei ist ε der Emissionsgrad, σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, A die Fläche des Körpers und T die Temperatur. Da hier lediglich die vom Sensor aufgenommene Leistung von Interesse ist und sich Sensor und Bauplattform mit geringem Abstand einander gegenüber befinden, wird als Fläche die Stirnfläche des Sensors (Durchmesser 12 mm) herangezogen. Als Temperatur für die Bauplattform werden 550°C , also ca. 823 K angenommen.

Daraus ergibt sich bei einem Emissionsgrad von $\varepsilon = 1$ eine Leistung von etwa 2,9 W. Da die Druckplatten vernickelt sind, ist der Emissionsgrad für Nickel zu berücksichtigen. Für oxidiertes Nickel werden bei einer Temperatur von 600°C Werte im Bereich 0,37 bis 0,48 angegeben (viZaar industrial imaging AG, 2023). Davon ausgehend wird ein Emissionsgrad von maximal 0,5 angenommen, so dass sich eine auf den Sensor einwirkende Strahlungsleistung von maximal 1,45 W ergibt.

Die spektrale Verteilung dieser Wärmestrahlung ist durch das Plancksche Strahlungsgesetz gegeben. Mit dem Wien'schen Verschiebungsgesetz kann die Wellenlänge mit der maximalen Strahlungsintensität berechnet werden.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \approx \frac{2897,8 \mu\text{m} * \text{K}}{823 \text{ K}} \approx 3,5 \mu\text{m} \quad (7)$$

Bei einer angenommenen Plattformtemperatur von 550°C , entsprechend ca. 823 K, ergibt sich somit eine Wellenlänge von etwa $3,5\ \mu\text{m}$. Die Leistung nimmt dabei in Richtung kürzerer Wellenlängen rasch ab.

Der verwendete Konfokalsensor arbeitet mit sichtbarem Licht im Wellenlängenbereich bis 700 nm. Um die unerwünschte Wärmestrahlung vom Sensor abzuhalten, gleichzeitig aber die Messfunktion nicht zu beeinträchtigen, ist ein entsprechend selektives Filterglas notwendig.

Zum Einsatz kam hierfür Glas der Bezeichnung KG2 (*Schott AG*). Dieses garantiert eine Durchlässigkeit von mindestens 92 % im Bereich von 365 bis 600 nm. Bei 700 nm beträgt sie etwa 80 % und nimmt zu längeren Wellenlängen hin ab. Für Wellenlängen oberhalb von $2,85\ \mu\text{m}$ beträgt sie weniger als 1 %. Somit kann bei diesem Glas näherungsweise davon ausgegangen werden, dass die komplette Wärmestrahlung im Schutzglas absorbiert wird, während es gleichzeitig bei den für die Messfunktion relevanten Wellenlängen transparent ist.

Wie weiter oben beschrieben, ist eine Montage des Sensors möglichst nahe am Druckkopf anzustreben, um die benötigten Verfahrswege der Bauplattform gering zu halten. Dafür wurden zwei verschiedene Adapterplatten entwickelt. Eine davon dient zur Aufnahme des Sensors und eines einzelnen Druckkopfs, während die zweite Variante den Sensor sowie einen Doppeldruckkopf aufnehmen kann. Der Sensor wird gemeinsam mit dem ihn umgebenden Kühlsystem mit der Adapterplatte verschraubt.

8.6.3 Integration des Sensorsystems in die Steuerung

Neben der mechanischen Integration des Sensorsystems in die Versuchsanlage musste ebenso dessen Einbindung in die Steuerung realisiert werden. Dafür kam die EtherCAT-Schnittstelle des Sensorsystems zum Einsatz.

Um größtmögliche Flexibilität bei der Auswertung der Daten zu erhalten, kommt als Schnittstelle zum Austausch der Messdaten mit dem restlichen System eine Tabelle im CSV-Format zum Einsatz. Diese wird von der Steuerung erstellt und kann anschließend mit beliebigen Programmen ausgewertet werden. Eine Tabellenzeile besteht dabei aus den jeweiligen Koordinaten der X-, Y- und Z-Achse sowie dem Messwert des Sensorsystems. Der Messwert wird dabei als Rohwert, wie vom Messsystem geliefert, abgespeichert. Das bedeutet, die Einheit des Werts sind Nanometer, wobei über einige reservierte Werte Statusinformationen codiert werden, wie beispielsweise „Messobjekt außer Reichweite“.

Als Trennzeichen in der Tabelle kommt ein Semikolon zum Einsatz, das Dezimaltrennzeichen ist ein Punkt. In Tabelle 9 ist ein Auszug aus einer beispielhaften CSV-Datei zu sehen.

Tabelle 9: Beispielhafter Auszug aus einer CSV-Tabelle mit Koordinaten (X,Y,Z in mm) und Messwert des Sensorsystems (in nm)

-20.798; 37.804; 1.200; 1045940.00
-20.778; 37.804; 1.200; 1049079.00
-20.759; 37.804; 1.200; 1053127.00

Genauere Details zur Implementierung der beschriebenen Funktionalität finden sich in Kap. 8.8.

8.7 Konstruktion, Fertigung und Montage des Gesamtsystems

Konstruktion

Nach der Auswahl aller Zukaufkomponenten und der Konstruktion der Unterbaugruppen wurde die Gesamtkonstruktion der Anlage finalisiert. Dabei standen am Anfang die vorgegebenen Abmessungen durch die Achsensysteme, Antriebe und die gewünschte Größe der Bauplattform. Davon ausgehend konnte die Prozesskammer so dimensioniert werden, dass eine kollisionsfreie Bewegung der Bauplattform in alle Richtungen ermöglicht wird. Die Prozesskammer wurde derart gestaltet, dass eine Beobachtung des Druckprozesses beispielsweise durch eine Hochgeschwindigkeitskamera möglich ist. Prozesskammer und Achsensysteme bilden damit das Herzstück der Anlage und können um die peripheren Komponenten erweitert werden, deren Anordnung flexibler gestaltet werden kann. Für das gesamte System, bestehend aus Schaltschrank mit Steuerungselektronik und mechanischen Komponenten, wurde anschließend ein geeignetes Gehäuse entworfen.

Fertigung und Montage

Nach Finalisierung der Konstruktion wurden Fertigungszeichnungen abgeleitet und sämtliche Komponenten gefertigt bzw. beschafft. Je nach Anforderung an die Komponenten stehen verschiedene Werkstoffe und Fertigungsverfahren zur Auswahl. Besonders bei den mechanisch belasteten Teilen der Achsensysteme ist eine hohe geometrische Genauigkeit und eine ausreichende Steifigkeit erforderlich, um im Betrieb die gewünschte Positioniergenauigkeit der Bauplattform sicherzustellen. Darüber hinaus sind die im Betrieb auftretenden Temperaturen bei der Werkstoffauswahl zu beachten.

Nach der Fertigung aller Komponenten erfolgte die Montage der Anlage, bei der insbesondere auf kritische Anforderungen wie beispielsweise die präzise Ausrichtung der Linearachsen zueinander geachtet werden musste.

Als erster Schritt des Zusammenbaus erfolgte die Montage des Rahmens, der alle weiteren Baugruppen aufnimmt. Dieser hat die Gesamtabmessungen 1000 mm (Breite) * 580 mm (Tiefe) * 2000 mm (Höhe) und besteht aus Aluminium-Systemprofilen, wie in Abbildung 16 zu sehen.

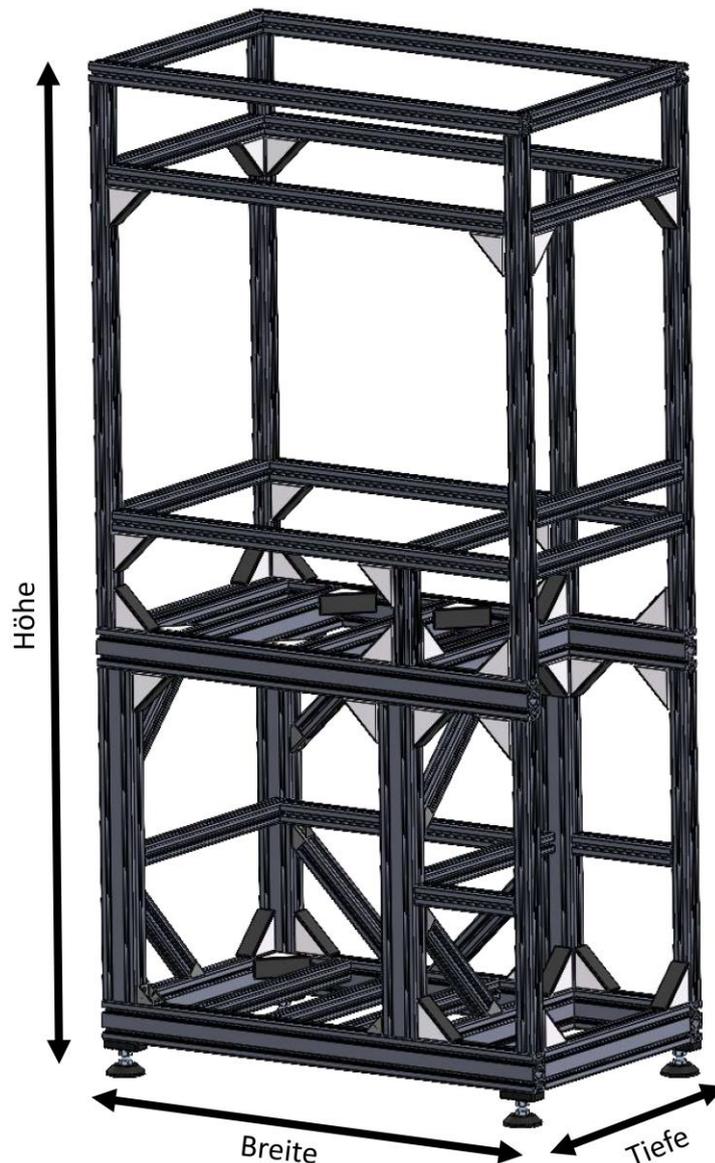


Abbildung 16: Rahmen aus Aluminium-Systemprofilen (CAD-Ansicht) mit den Abmessungen 1000 mm (Breite), 580 mm (Tiefe) und 2000 mm (Höhe).

Nach Montage des Rahmens wurden die zuvor montierten Unterbaugruppen an diesem angebracht. Dies ist beispielsweise das Achsensystem, bestehend aus den

Motoren und Führungen der drei Achsen, das zuvor an den zugehörigen Frästeilen montiert und ausgerichtet wurde.

Anschließend erfolgte die Montage der oberen Abdeckplatte sowie der Prozesskammer, wie in Abbildung 17 zu sehen. Die Prozesskammer besteht aus mehreren Aluminium-Frästeilen mit eingesetzten Glasfenstern an den Seiten und in der Türe. An der Oberseite der Prozesskammer ist eine Aussparung zur Anbringung der Adapterplatte mit Druckkopf vorhanden. Sowohl die untere Ebene der Prozesskammer als auch die obere Fläche, auf der die Adapterplatte aufliegt, sind wassergekühlt. Auch das Messsystem zur Geometrievermessung wurde an den Wasserkreislauf angeschlossen.

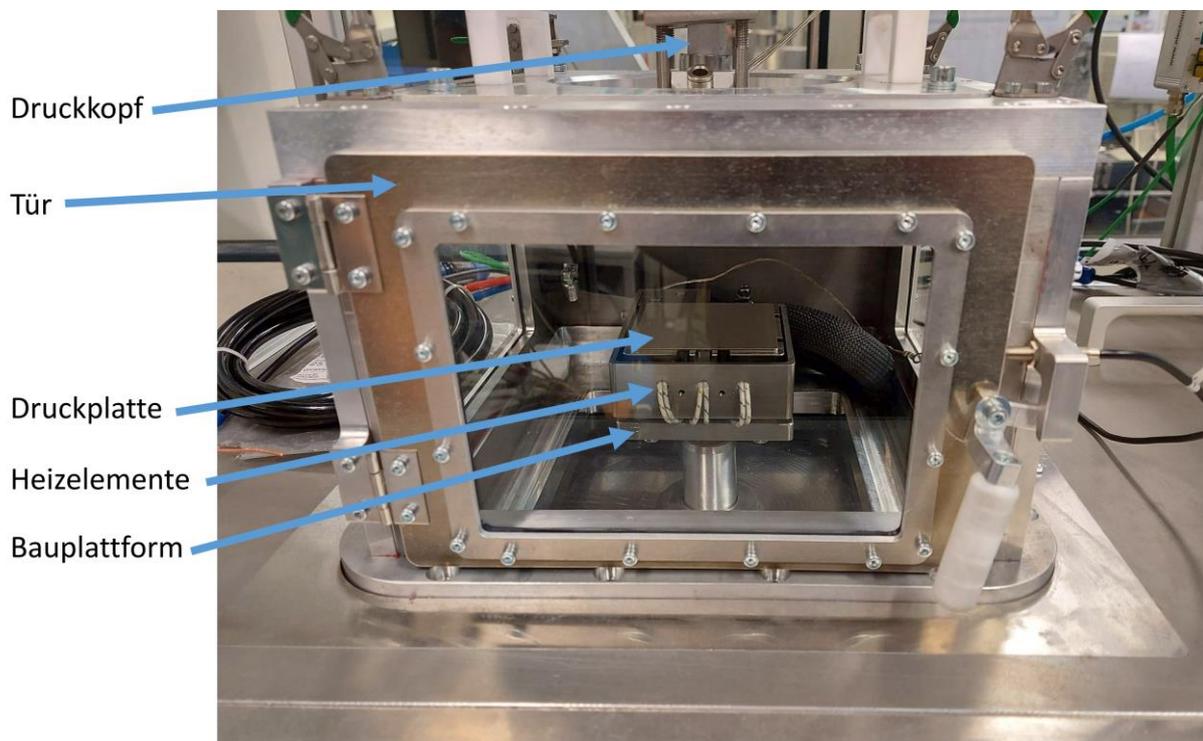


Abbildung 17: Prozesskammer mit Fenstern zur Prozessbeobachtung; oberhalb der Prozesskammer befindet sich der Druckkopf. In der Prozesskammer befindet sich die beheizte und bewegliche Bauplattform mit der darauf befestigten Druckplatte.

Neben der Montage der oben genannten mechanischen Komponenten bzw. Baugruppen erfolgte die Verkabelung der elektrischen Komponenten (Motoren, Sensoren, Heizelemente, Beleuchtung, Druckregler, Magnetventile) sowie der Anschluss von Pneumatik bzw. Schutzgas sowie der Wasserkühlung. In Abbildung 18 sind die wesentlichen Pneumatikkomponenten der Anlage gezeigt.

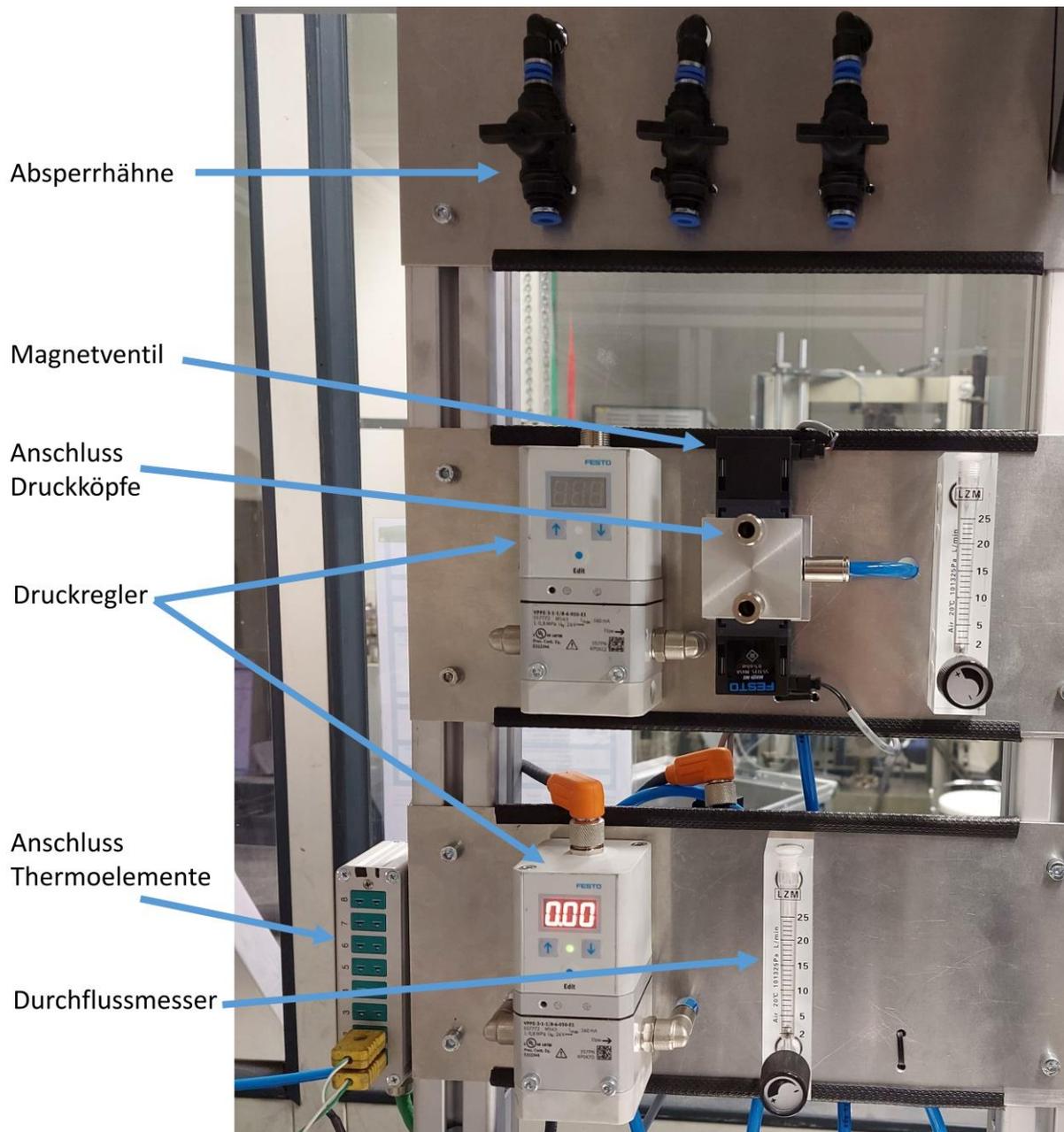


Abbildung 18: Pneumatikkomponenten zur Flutung der Prozesskammer mit Schutzgas sowie zur Erzeugung der Druckpulse für den Druckkopf.

Die zentrale Verkabelung der elektrischen und mechatronischen Elemente erfolgte in einem Schaltschrank an der rechten Seite der Anlage. Abbildung 19 zeigt einen Überblick über die sich im Schaltschrank befindlichen Komponenten. Im unteren Bereich wurden alle Komponenten platziert, die mit Netzspannung (230 V) arbeiten, wie der Hauptschalter, ein Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD), ein Leitungsschutzschalter (LSS), drei Solid-State-Relais zur Ansteuerung der Heizelemente der beiden Druckköpfe und der Bauplattform sowie zwei Schaltnetzteile zur Erzeugung von 24 und 48 V. Im oberen Bereich des Schaltschranks wurden die Komponenten der Steuerung montiert, bestehend aus

den EtherCAT-Klemmen und dem Buskoppler zur Verbindung mit dem PC. Im mittleren Bereich wurde eine Hutschiene zum Anbringen der Sensoreinheit des optischen Konfokalsensors vorgesehen.

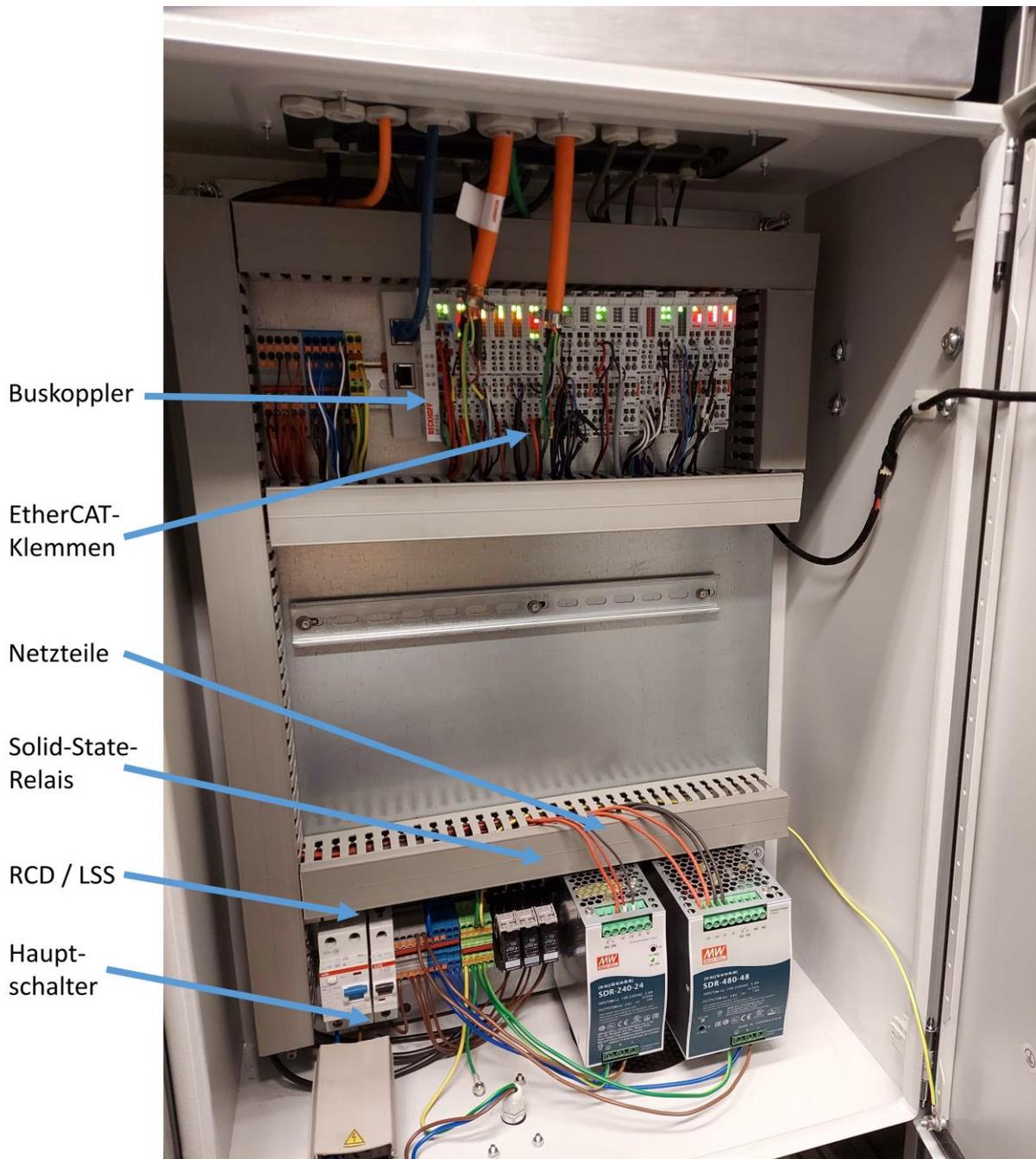


Abbildung 19: Schaltschrank mit den Steuerungskomponenten und der elektrischen Verkabelung; im unteren Bereich befinden sich Komponenten, die mit Netzspannung arbeiten wie der Hauptschalter, der Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD), der Leitungsschutzschalter (LSS), Solid-State-Relais sowie Schaltnetzteile zur Bereitstellung von 24 und 48 V. Im oberen Bereich sind der Buskoppler und die EtherCAT-Steuerungsklemmen montiert. Der freie Bereich in der Mitte ist für die Sensoreinheit des Konfokalsensors vorgesehen (nicht abgebildet).

Abbildung 20 zeigt die Vorderansicht der montierten Gesamtanlage mit Beschriftung der Hauptbaugruppen.

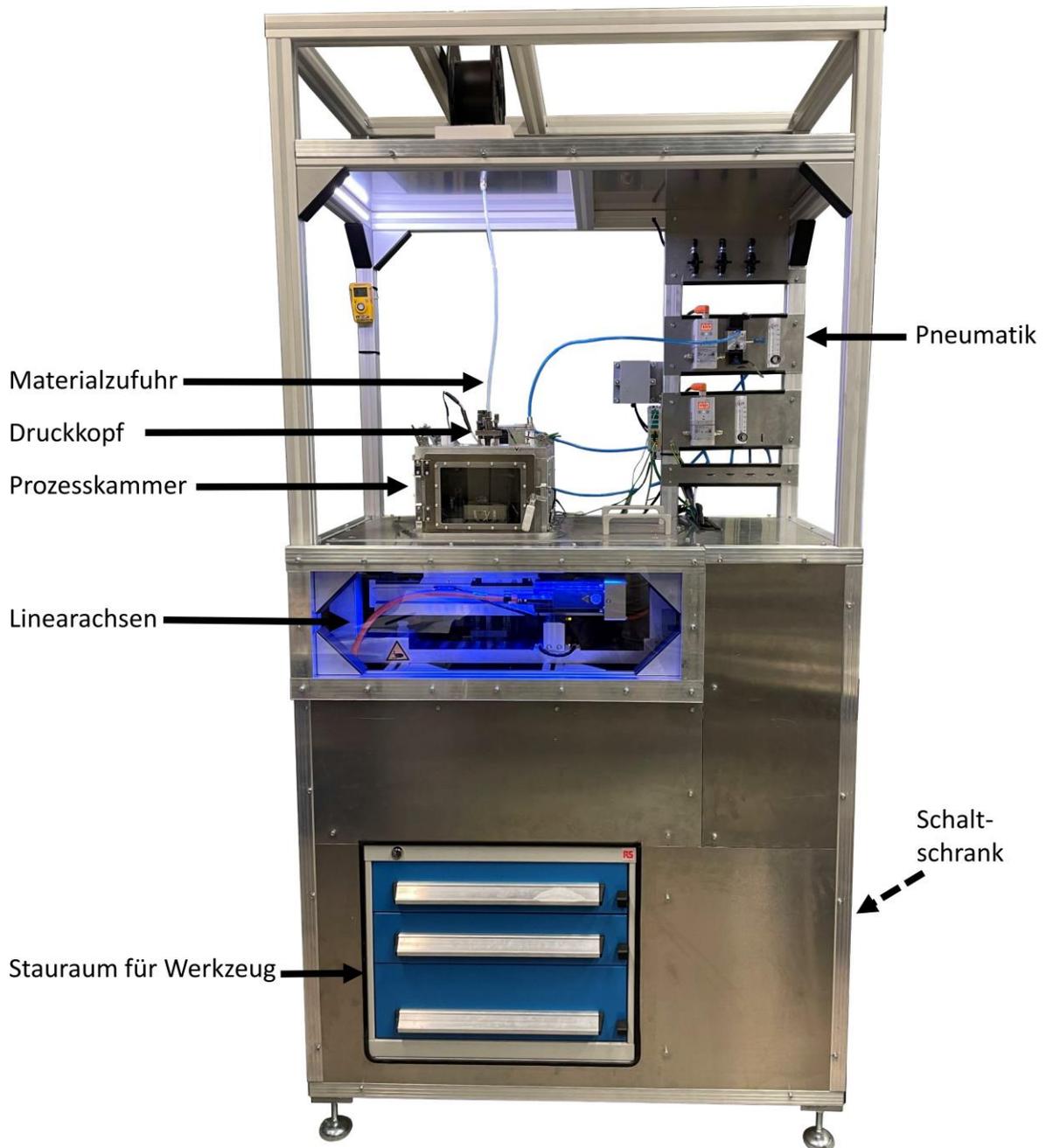


Abbildung 20: Vorderansicht der gesamten Versuchsanlage mit Bezeichnung der wesentlichen Elemente.

8.8 Maschinensteuerung und Software

Auf die mechanische Montage folgte die Integration der Steuerungshardware, um das mechatronische Gesamtsystem fertigzustellen. Nach Verkabelung aller Komponenten mit den entsprechenden Klemmen der Steuerung erfolgte das schrittweise Testen und die Inbetriebnahme aller elektrischen Baugruppen.

Nach erfolgreichem Testen wurde die Steuerungssoftware implementiert. Hierfür wurde ein Zustandsautomat umgesetzt, der die grundlegenden Funktionen und Abläufe der Anlage abbildet. Für die Eingabe und Verarbeitung von Druckaufträgen wurde eine geeignete Schnittstelle definiert und implementiert.

Zum Verarbeiten von Druckaufträgen wurde auf den De-facto-Standard G-Code zurückgegriffen. Dafür wird in der Steuerung ein G-Code-Interpreter integriert, der aus den entsprechenden Befehlen die gewünschte Bewegung der Motoren ableitet. Für die Ansteuerung des Druckkopfes sollte eine individuelle Vorgabe der Parameter für jeden individuellen Tropfen ermöglicht werden. Dadurch wurde die Möglichkeit geschaffen, Tropfen gezielt in ihrer Größe zu ändern und somit die Bauteilgeometrie lokal zu variieren. Dies stellt auch die Grundlage für die Implementierung einer Geometrie- bzw. Schichthöhenregelung dar.

Parallel zum Zustandsautomat und zum G-Code-Interpreter erfolgt die Regelung der Temperaturen und des Inertgasgehalts der Prozesskammer. Die Bedienung durch den Benutzer erfolgt über eine grafische Schnittstelle. Eine Veranschaulichung des Konzepts ist in der folgenden Abbildung 21 zu sehen.

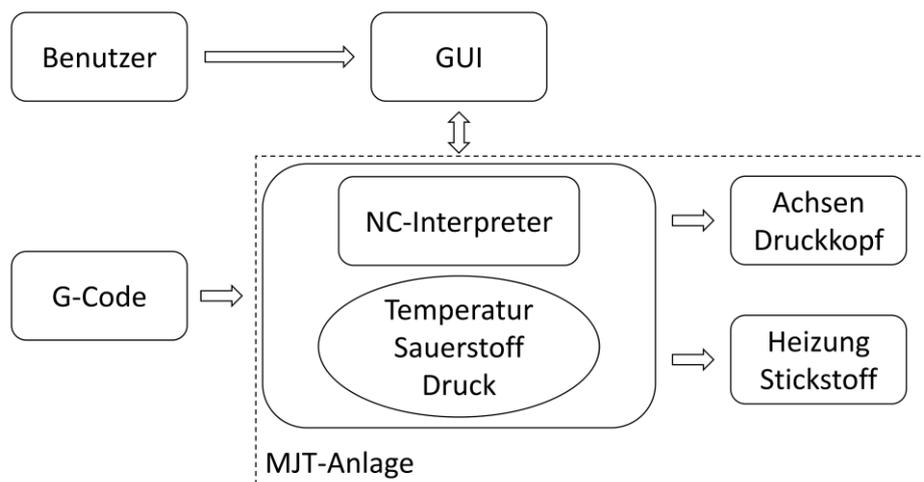


Abbildung 21: Grundprinzip der Steuerung: Der Benutzer bedient das System über eine grafische Schnittstelle. Die Druckbefehle werden über G-Code, der auch weitere Parameter wie Solltemperaturen und -drücke enthält, an die Steuerung übergeben. Der NC-Interpreter leitet aus dem G-Code die Ansteuerung für Achsen und Druckkopf ab, während Temperatur- und Druckregler die Heizelemente sowie die Stickstoffversorgung ansteuern.

8.8.1 Steuerungskonzept

Die Steuerung der Versuchsanlage basiert auf TwinCAT 2 (*Beckhoff Automation GmbH & Co. KG*). Dieses basiert wiederum auf dem EtherCAT-Standard, wobei ein handelsüblicher PC die Steuerung in Form einer speicherprogrammierbaren

Steuerung (SPS) bildet und über den echtzeitfähigen Bus mit den Ein- und Ausgangsklemmen kommuniziert.

Die implementierte Steuerung steuert bzw. regelt alle prozessrelevanten Parameter und ermöglicht über eine grafische Benutzerschnittstelle die Bedienung der Anlage. Die Implementierung erfolgte durch Programmierung mittels strukturiertem Text nach EN 61131-3. Dabei wurden für Teilaufgaben separate Tasks mit einer jeweils passenden Zykluszeit angelegt, wie in der folgenden Tabelle 10 aufgeführt und im Folgenden genauer beschrieben.

Tabelle 10: Tasks der Steuerung mit ihren Aufgaben und Zykluszeiten

Task-Name	Aufgaben	Zykluszeit
PlcTask	Regler (Temperatur, Sauerstoff) und Benutzerschnittstelle	2 ms
FastTask	Erzeugung der Ansteuerpulse für die Druckkopf-Ventile	0,1 ms
NC-Task 1 SAF	NC-Interpreter Satzausführung	1 ms
NC-Task 1 SVB	NC-Interpreter Satzvorbereitung	10 ms

Der Haupttask (PlcTask) beinhaltet die Temperaturregler, den Sauerstoffregler, die Benutzerschnittstelle und die gesamte Logik des Druckprozesses. Dafür wurde ein Zustandsautomat implementiert, der abhängig von Benutzereingaben und den durch die Sensoren gelieferten Prozessdaten zwischen seinen Zuständen wechselt.

Nach dem Starten der Steuerung werden zunächst die Motoren initialisiert. Über die grafische Benutzerschnittstelle (GUI) kann anschließend eine Referenzfahrt der Motoren gestartet werden. Um mögliche Kollisionen der Bauplatzform mit dem Druckkopf zu verhindern, wird zuerst die Z-Achse nach unten gefahren und anschließend die Y- und die X-Achse referenziert. Nach der Referenzfahrt werden die Achsen in die Ausgangsposition gefahren. Die Koordinaten der Hilfsachsen, die die Druckköpfe repräsentieren, werden auf null gesetzt und die Anlage befindet sich anschließend im Grundzustand, in dem entweder G-Code ausgeführt werden kann oder die Achsen manuell verfahren werden können („Jogging“).

Nebenläufig dazu werden zyklisch die Messwerte sämtlicher Temperatursensoren erfasst und davon ausgehend die Regelung durchgeführt.

Für die Erzeugung der Druckimpulse zur Tropfenerzeugung ist eine ausreichend feine zeitliche Auflösung erforderlich. Dies wurde über einen zweiten Task realisiert, der mit einer Zykluszeit von 0,1 ms aufgerufen wird. Die Tropfenerzeugung wird vom Haupttask angestoßen, indem eine Variable (Flag) auf den Wert ‚1‘ gesetzt wird. Im FastTask wird darauf reagiert und ggf. die entsprechenden Ausgangsklemmen zur Ansteuerung der Ventile für die gewünschte Dauer aktiviert. Die Ermittlung der Dauer erfolgt über das Zählen der Taskaufrufe in Verbindung mit der bekannten Zykluszeit. Details dazu werden in Kapitel 8.8.4 beschrieben.

Die Ansteuerung der Achsen durch den NC-Interpreter erfolgt über die beiden Tasks „NC-Task 1 SAF“ und „NC-Task 1 SVB“, die automatisch erstellt werden.

Die Bedienung der Anlage erfolgt über eine grafische Benutzerschnittstelle, mit der unter anderem die folgenden Funktionen ausgeführt werden können:

- Auswahl einer G-Code-Datei zum Drucken
- Starten und Stoppen der G-Code-Ausführung
- Vorgabe von Temperaturen für Druckkopf und Druckplatte
- Vorgabe einer Sauerstoffkonzentration für die Prozesskammer
- Vorgabe von Impulsdauer und -druck für die Tropfenerzeugung
- Manuelles Ansteuern der Achsen und der Druckköpfe
- Auswahl einer Parametertabelle für individuelle Tropfenparameter

Die als Schnittstelle zwischen Steuerungssoftware und Anlage verwendeten Klemmen sind im Folgenden aufgeführt.

Tabelle 11: Auflistung der Ein- und Ausgänge sowie der zugehörigen EtherCAT-Klemmen

Komponente	Typ	Klemmentyp
Heizung Druckplatte	Digitalausgang	EL2808
Heizung Druckkopf	Digitalausgang	EL2808
Temperatursensoren	Thermoelement	EL3314-0002
Motor X und Y	Servomotor mit Encoder	EL7201-0010

Komponente	Typ	Klemmentyp
Motor Z	Schrittmotor mit Encoder	EL7037
Druckregler	Analogausgang 0-10 V	EL4004
Tropfenerzeugung	Digitalausgang	EL2202
Sauerstoffsensord	Analogeingang (Strom)	EL3174
Beleuchtung	Digitalausgang	EL2088
Endschalter / Türschalter	Digitaleingang	EL1004
Konfokalsensord	Messgerät	IFC2421 (micro-epsilon)

8.8.2 G-Code-Definition, Interpreter und Syntax

Ein G-Code-Interpreter führt den ausgewählten G-Code aus und steuert direkt die Achsen an. Weitere Prozessparameter können im G-Code vorgegeben werden und werden an die Steuerungssoftware weitergegeben. Eine Auflistung dieser zusätzlichen Parameter sowie der zugehörigen G-Code-Syntax ist in Tabelle 12 gegeben.

Tabelle 12: Über G-Code einstellbare Prozessparameter

Parameter	Einheit	G-Code-Syntax	Beispiel
Temperatur Druckplatte	°C	R10	R10=550
Temperatur Druckkopf 1	°C	R11	R11=650
Temperatur Druckkopf 2	°C	R12	R12=650
Pulsdauer Druckkopf 1	µs	R21	R21=5000
Pulsdauer Druckkopf 2	µs	R24	R24=5000
Druck für Druckköpfe	hPa	R22	R22=3000
Sauerstoffkonzentration	ppm	R23	R23=100
Pause nach Schichtwechsel	-	R25	R25=0
XYZ-Offset Druckkopf 1	mm	R30, R31, R32	R30=-6 R31=-39 R32=0
XYZ-Offset Druckkopf 2	mm	R33, R34, R35	R33=-6 R34=+16 R35=0

XYZ-Offset Sensor	mm	R36, R37, R38	R36=1 R37=2 R38=3
-------------------	----	---------------	-------------------------

Die so angegebenen Parameter dienen der SPS als Eingangswerte für Temperaturregler bzw. Sauerstoffregler und für die Einstellung des gewünschten Drucks und der Pulsdauer für die Druckköpfe.

Nachfolgend ist ein Auszug aus einem beispielhaften G-Code mit erläuternden Kommentaren gegeben. Im ersten Teil des Codes werden die wesentlichen Prozessparameter eingestellt (Impulsdauer, Druck, Druckkopf Temperatur, Abstand zwischen Druckkopf und Sensor, angestrebte Sauerstoffkonzentration, Bauplattformtemperatur). Der untere Teil des Codes zeigt beispielhaft das Verfahren der Achsen ohne und mit Tropfenausstoß.

```
R21=3500 (pulse duration PH1 in µs)
R22=3500 (nozzle pressure in mbar)
R11=700 (Temperatur Druckkopf)
R30=-6 (Aluoffset X)
R31=-39 (Aluoffset Y)
R32=0 (Aluoffset Z)
#set paramZeroShift( G54; R30; R31; R32)#
R33=-6 (Sensoroffset X)
R34=+16 (Sensoroffset Y)
R35=0 (Sensoroffset Z)
#set paramZeroShift( G56; R33; R34; R35)#
R23=20 (oxygen concentration in ppm)
R25=0 (enable or disable layer height control after M13)
R10=500 (Temperatur Plattform)
G01 Z0.800 F300
G01 X0 Y0 F300
G54
(Nullpunktverschiebung Alu)
G01 X Y Z F300 (NPV anfahren)
G01 X3.000 Y25.000 F300 (Fahrt ohne Drucken)
G01 X5.000 Y25.000 F300 (Fahrt ohne Drucken)
G01 X17.500 Y25.000 Q1=10 F50 (Fahrt mit Drucken von 10 Tropfen)
```

Abbildung 22: Beispielhafter G-Code mit Definition der wesentlichen Druckparameter.

8.8.3 Messdatenauswertung in Matlab

Im Folgenden wird die Umsetzung des in Kapitel 6.2 beschriebenen grundlegenden Konzepts zur Datenauswertung beschrieben. Als Software zur Auswertung wurde Matlab (MathWorks, Inc.) verwendet, dabei kam insbesondere die Toolbox „SG-Library“ zum Einsatz (Lueth, 2015). Die zur Erklärung verwendeten Messdaten stammen von Bauteilen, die aus 10 * 10

Tropfen bestehen. Die Messdaten umfassen einen Bereich von 18 mm (X-Richtung) auf 16 mm (Y-Richtung).

Der erste Schritt der Datenverarbeitung bestand darin, ungültige Daten zu entfernen. Ein Punkt wurde als ungültig betrachtet, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt war:

- Der Sensor hat einen Punkt als ungültig gemeldet, was in den meisten Fällen bedeutet, dass der Punkt außerhalb des Messbereichs lag. Dies kann beispielsweise bei steilen Oberflächenregionen aufgrund von Reflexionen des vom Sensor ausgestrahlten Lichts vorkommen.
- Der gemessene Wert ist extrem gering und damit unplausibel (weniger als 1 Mikrometer).

Danach wurden die verbleibenden Rohwerte weiter analysiert. Abbildung 23 zeigt eine Darstellung der Rohdaten sowie der vorverarbeiteten Daten des Beispielbauteils. In den vorverarbeiteten Daten wurden ungültige Punkte entfernt und die Anzahl der Datenpunkte wurde durch Interpolation im Raster von 0,2 mm, was auch dem Bahnabstand der einzelnen Messbahnen entspricht, reduziert, um den gewünschten Abstand der einzelnen Punkte zu erreichen und eine Vernetzung der Oberfläche zu ermöglichen.

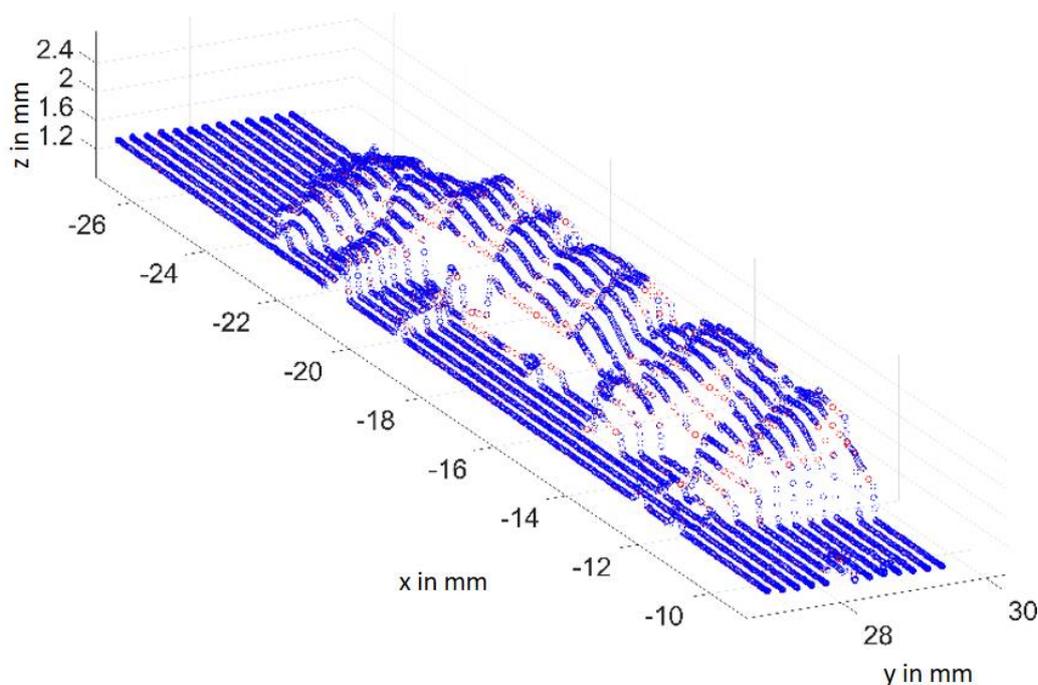


Abbildung 23: Visualisierung eines Auszugs der Bauteiloberfläche; dargestellt sind Rohdaten (blau) sowie aufbereitete Daten (rot).

Eine detaillierte Ansicht der Datenreduktion und die Ausrichtung in einem einheitlichen Raster sind in Abbildung 24 dargestellt. Dabei sind die Rohdaten blau und die interpolierten Datenpunkte rot dargestellt.



Abbildung 24: Draufsicht auf die Rohdaten (blau) und die vorverarbeiteten Daten (rot); durch die Reduktion und Interpolation der Datenpunkte wird ein einheitliches Raster für die Vernetzung generiert.

Nachdem dieser Prozess auf alle Datenpunkte angewandt wurde, befinden sich diese alle in einem Raster mit festem Abstand und es sind keine doppelten Werte vorhanden. Daher können die Punkte problemlos zu einer geschlossenen Fläche vernetzt werden, die die Geometrie des Teils darstellt. Die äquidistanten Punkte sowie die vernetzte Oberfläche sind in Abbildung 25 dargestellt.

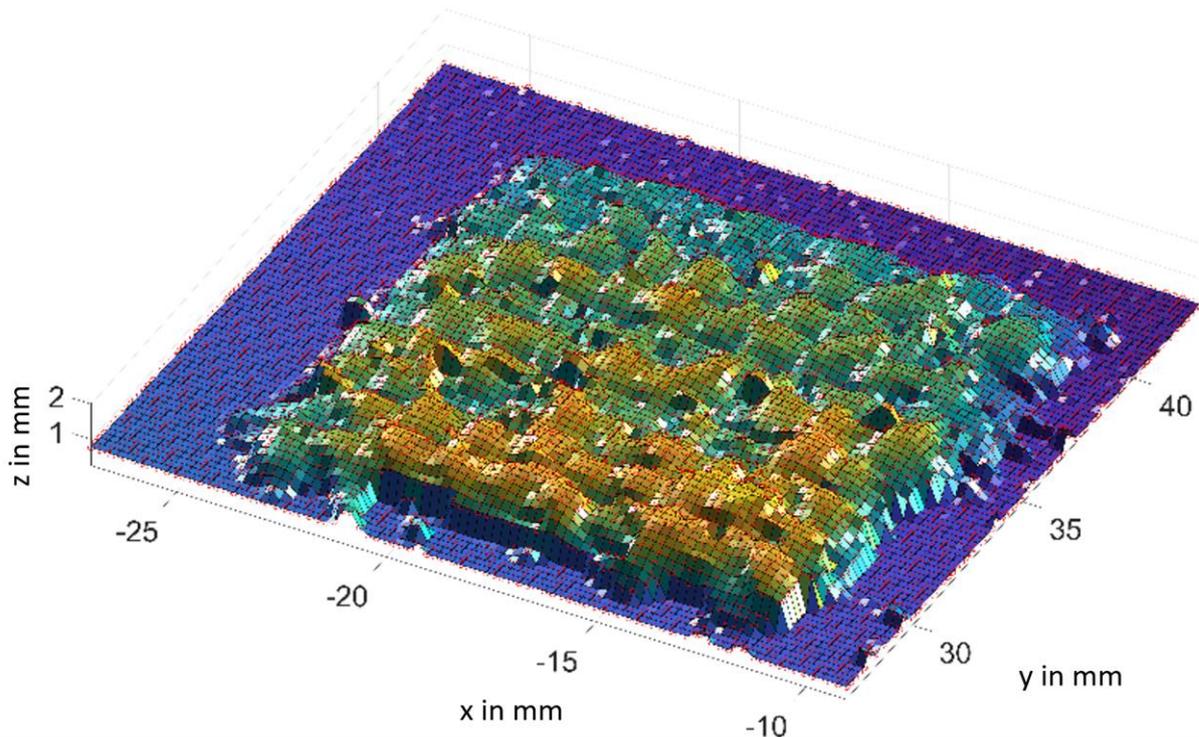


Abbildung 25: Verarbeitete Oberfläche einer gedruckten Schicht; die einzelnen Datenpunkte (rot) sind zusammen mit dem erzeugten Oberflächennetz des Bauteils dargestellt.

Im so erhaltenen digitalen Abbild der gedruckten Schicht ist für jede Tropfenposition problemlos die Ermittlung der jeweiligen Bauteilhöhe möglich.

8.8.4 Individuelle Tropfengrößensteuerung

Um eine gezielte Beeinflussung bzw. Gestaltung der Bauteilgeometrie zu ermöglichen, ist eine individuelle Tropfengrößensteuerung wünschenswert. Zur Beeinflussung der Tropfengröße können dabei die beiden Parameter Druck und Pulsdauer verwendet werden. Die Veränderung des Drucks erfordert jedoch eine Mindestwartezeit, bis der Druck am Ausgang des Druckreglers sich stabilisiert hat. Somit ist die Variation nur vergleichsweise langsam möglich und eignet sich nicht zur Beeinflussung einzelner Tropfen, ohne den Druckprozess dadurch deutlich zu verlangsamen. Die Pulsdauer dagegen kann problemlos für jeden Tropfen individuell variiert werden. Im Folgenden wird zunächst das Verfahren zur Ableitung der Druckpulse aus dem G-Code beschrieben. Anschließend wird die Realisierung der Variation der Pulsdauer erläutert.

Die Druckpulse zur Tropfenerzeugung werden im G-Code über sog. Hilfsachsen abgebildet. Jeder Druckkopf wird also als eigene, virtuelle Achse betrachtet, wobei ein Achsenweg von einem Millimeter jeweils einem ausgestoßenen Tropfen entspricht. Die Ableitung der Tropfenpulse von der Achsenposition geschieht innerhalb des Haupttasks (PlcTask). Die aktuelle Achsposition wird

dazu auf einen ganzzahligen Wert abgerundet und der Modulo-Operator (modulo 2) auf diesen Wert angewendet. Als Ergebnis entsteht eine Folge von abwechselnd Null und Eins mit zunehmender Achsposition, wobei jeweils bei Erreichen eines ganzen Millimeters ein Wechsel von Null auf Eins oder andersrum stattfindet. Dies entspricht einem Rechtecksignal, wobei sowohl steigende als auch fallende Flanken die Tropfenerzeugung auslösen sollen. Um dies zu realisieren, wird bei jeder Flanke eine Flag-Variable gesetzt, die im häufiger ausgeführten Ventil-Task (FastTask) die Ansteuerung des Druckkopfventils anstößt. Gleichzeitig stellt der ganzzahlig abgerundete Wert der Achsposition die Nummer des aktuellen Tropfens dar und identifiziert diesen somit eindeutig innerhalb der aktuellen Schicht. Bei Beginn der nächsten zu druckenden Schicht wird der Tropfenzähler bzw. die Achsposition auf null zurückgesetzt. In der folgenden Abbildung 26 sind diese Zusammenhänge grafisch veranschaulicht.

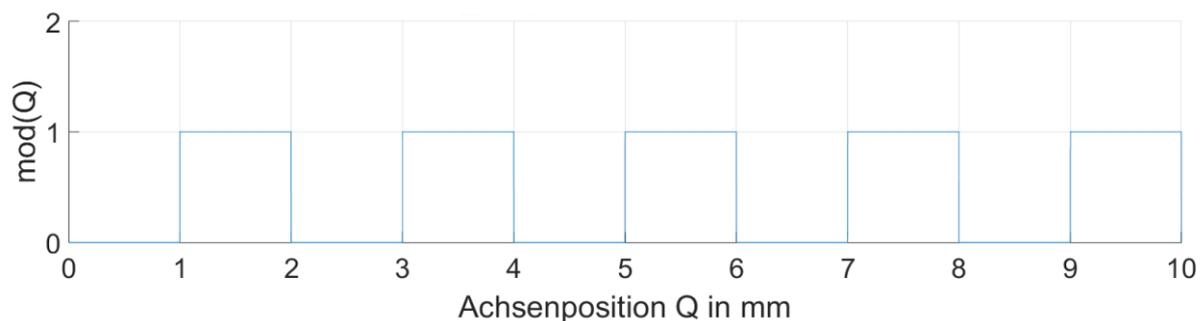


Abbildung 26: Ableitung von Tropfenimpulsen aus der Position der Hilfsachse; an jeder Flanke des resultierenden Rechtecksignals wird ein Tropfen ausgestoßen. Die jeweilige Achsenposition dient der eindeutigen Identifikation jedes Tropfens.

Im Ventil-Task (FastTask) erfolgt die Realisierung der gewünschten Impulsdauer durch Zählen der Taskaufrufe und Vergleich mit einer Zählvariablen, die die Solldauer vorgibt. Für die individuelle Tropfengrößenvariation kann über die eindeutige Tropfennummer jeweils ein beliebiger Wert für die Pulsdauer geladen werden. Dafür kann über die Benutzerschnittstelle eine entsprechende Wertetabelle geladen werden und deren Verwendung aktiviert werden. Sofern für die jeweilige Tropfennummer in dieser Tabelle ein Eintrag vorhanden ist, wird dieser verwendet. Andernfalls wird der Standardwert, der entweder über den G-Code oder über die Benutzerschnittstelle vorgegeben ist, verwendet. Diese Schnittstelle zur Vorgabe individueller Parameter bietet somit die Grundlage zur lokalen Beeinflussung der Tropfengröße.

8.9 Inbetriebnahme und Evaluation

Nach der vollständigen Implementierung der Steuerung und Montage aller elektrischen und mechanischen Komponenten wurde das Gesamtsystem hinsichtlich der gestellten Anforderungen evaluiert. Dafür wurde der verwendete Druckkopf mit verschiedenen Druckparametern charakterisiert. Anschließend wurden Probekörper mit variablen Parametern gedruckt und mithilfe des Messsystems während des laufenden Druckprozesses vermessen. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung des Messsystems hinsichtlich seiner Eignung zum Inline-Prozessmonitoring. Details dazu werden in Kapitel 9 beschrieben.

Zur Durchführung eines Druckvorgangs sind mehrere Vorbereitungsschritte erforderlich:

- Reinigung und Zusammenbau des Druckkopfs
- Montage des Druckkopfs und des Sensors an der Adapterplatte
- Anschluss der Wasserkühlung des Sensors
- Montage einer Druckplatte an der Bauplattform
- Fluten der Prozesskammer mit Schutzgas
- Aufheizen von Bauplattform und Druckkopf
- Befüllen des Druckkopfs mit Aluminium
- Referenzfahrt der Linearachsen durchführen

Vor der Montage des Druckkopfs wird zunächst der Tiegel von Aluminiumresten gereinigt. Die Düse wird auf Verschmutzungen oder Beschädigungen untersucht und ggf. mit Druckluft gereinigt oder gegen eine neue Düse ausgetauscht. Die Graphitdichtungen zwischen Düse und Tiegel sowie zwischen Tiegel und Deckelplatte werden untersucht und bei Beschädigungen gegen neue ersetzt. Die Montage beginnt mit dem Einsetzen der Düse in die Isolierung am unteren Ende. Eine Graphitdichtung wird auf der Düse platziert, anschließend folgt der Tiegel mit montiertem Heizelement. Bei der Montage der Deckelplatte mit der zugehörigen Graphitdichtung ist die korrekte Ausrichtung der Bohrung für das Thermoelement im Tiegel zu beachten. Durch vier Gewindebolzen mit Federn und Muttern werden die Druckkopfkomponenten fixiert und anschließend das Thermoelement in die Bohrung eingeführt. Die Adapterplatte mit dem montierten Druckkopf wird oberhalb der Prozesskammer platziert und befestigt.

Nach diesen Vorbereitungen wird der Druck über den vorbereiteten G-Code gestartet und die gedruckten Schichten vermessen. Nach dem Abkühlen kann das

Bauteil entnommen werden und der Druckkopf ggf. von verbleibendem Aluminium gereinigt werden.

9. Experimente zur Inline-Messung beim Material Jetting von Aluminium

Im Rahmen der durchgeführten Experimente sollte validiert werden, ob die Inline-Messung der gedruckten Bauteilschichten mit der realisierten Anlage möglich ist. Dazu wurde zunächst untersucht, ob der Messaufbau mit dem integrierten Infrarot-Filterglas negativen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Sensors hat. Im nächsten Schritt wurden vorab gedruckte Probekörper vermessen, um die Eignung des Systems für gedruckte Bauteile zu validieren. Zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur und Oberflächeneigenschaften (fehlende Oxidschicht) wurden im dritten Experiment Messungen an frisch gedruckten Tropfen bzw. Schichten durchgeführt. Im vierten Experiment wurde im Hinblick auf eine mögliche gezielte, lokale Beeinflussung der Bauteilgeometrie der Zusammenhang zwischen Druckparametern und resultierender Tropfengröße ermittelt.

9.1 Validierung des Sensorsystems

Ziel dieses Experiments war die Validierung der Messgenauigkeit des Sensorsystems nach der Integration in die Versuchsanlage. Der optische Sensor befand sich in der eigens konstruierten Halterung, während die Messung durch das Infrarot-Filterglas hindurch erfolgte. Es wurden sowohl ein gefräster Kalibrierkörper als auch gedruckte Probekörper vermessen. Das Experiment wurde in Rehekampff et al. (2021) vorgestellt.

9.1.1 Validierung mit gefrästem Probekörper

Aufgabenstellung

Für eine ausreichend präzise Vermessung gedruckter Bauteilschichten ist die Auflösung und Genauigkeit des Messsystems im eingebauten Zustand und bei Messung durch das Infrarot-Filterglas hindurch zu validieren. Dadurch sollte nachgewiesen werden, dass das Filterglas keinen negativen Einfluss auf die für die Anwendung notwendige Messfunktion hat. Zusätzlich sollte der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Messergebnisse untersucht werden. Als Referenzobjekt kam ein gefräster Kalibrierkörper aus Aluminium mit bekannten Abmessungen zum Einsatz, wie in Abbildung 27 dargestellt.

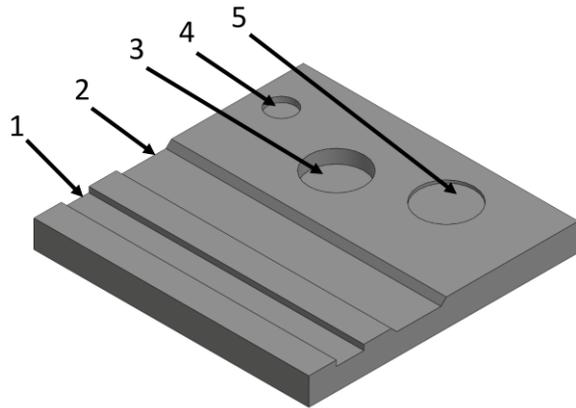


Abbildung 27: Isometrische CAD-Ansicht des Kalibrierkörpers mit Nuten (1, 2) und Kreistaschen (3, 4, 5).

Material und Methoden

Der Kalibrierkörper wurde entsprechend einer technischen Zeichnung durch CNC-Fräsen gefertigt. Die Maßhaltigkeit des Körpers wurde nach der Fertigung durch Vermessen mit kalibrierten Messmitteln überprüft.

Als geometrische Merkmale des Körpers wurden zwei Nuten, drei Kreistaschen sowie zwei Fasen verwendet. Die Nuten besitzen eine Tiefe von 1 Millimeter, die Kreistaschen sind 0,5 (Nr. 5), 1,0 (Nr. 4) und 2,5 mm (Nr. 3) tief. Nut Nr. 2 besitzt beidseitig eine Fase mit 45° . Die Breite der Nuten beträgt 5 (Nr. 1) bzw. 8-10 mm (Nr. 2). Die Kreistaschen haben Durchmesser von 5 (Nr. 4) und 10 mm (Nr. 3 und 5).

Labor- und Geräteaufbau

Dieses Experiment wurde vor der Fertigstellung der neuen Versuchsanlage durchgeführt. Deshalb kam hier die vorherige Version der Anlage zum Einsatz. Der Konfokalsensor befand sich in der konstruierten Halterung oberhalb der Bauplattform. Die Messung erfolgte durch das Infrarot-Filterglas hindurch. Der Kalibrierkörper befand sich auf der Bauplattform, welche in Bahnen von 1 mm Abstand bewegt wurde, während die Messwerte des Sensors gemeinsam mit den Achsenpositionen aufgezeichnet wurden. Die Messdaten wurden dabei in beiden Fahrrichtungen aufgezeichnet (positive und negative X-Richtung). Insgesamt wurde die gesamte Fläche des Körpers mit dem Sensor erfasst. Die Komponenten des Messaufbaus sind in Abbildung 28 zu sehen. Anstelle des Kalibrierkörpers ist auf der Bauplattform dort ein gedruckter Probekörper zu sehen, wie er in Kap. 9.1.2 verwendet wird.

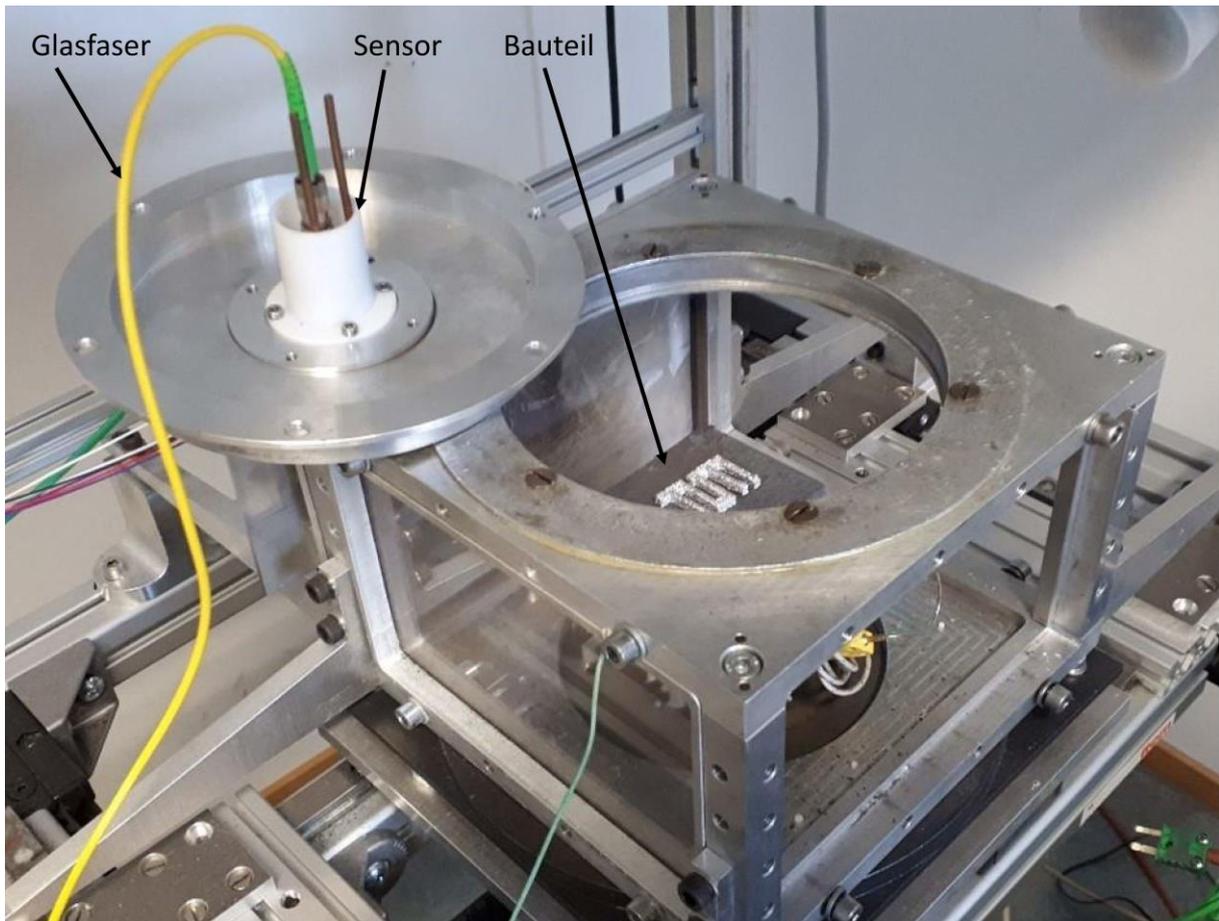


Abbildung 28: Aufbau zum Vermessen von Kalibrierkörper und gedruckten Probekörpern; links ist der optische Sensor in der zugehörigen Halterung zu sehen. Über das Glasfaserkabel (gelb) ist er mit der Auswerteeinheit verbunden. In der Mitte befindet sich die Bauplatzform mit dem zu vermessenden Objekt. Zur Messung wird die Sensorhalterung mittig über der Bauplatzform platziert.

Um den Einfluss der Achsgeschwindigkeit auf die Messung zu untersuchen, wurde die Messung sowohl bei einer Geschwindigkeit von 300 als auch 600 mm/min durchgeführt. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte dabei mit 250 bzw. 500 Hz, so dass sich jeweils die gleiche Dichte von 50 Messpunkten je Millimeter ergibt.

Ergebnisse

Die aufgezeichneten Messwerte wurden in Matlab importiert und dort weiterverarbeitet. Zunächst wurden dazu Messpunkte außerhalb des Bauteils sowie ungültige Messwerte entfernt. Die verbleibenden Werte wurden in einer grafischen Darstellung qualitativ bewertet, wie in Abbildung 29 dargestellt. Die aus den Messwerten ermittelten Abmessungen der jeweiligen geometrischen Merkmale sind in Tabelle 13 aufgelistet.

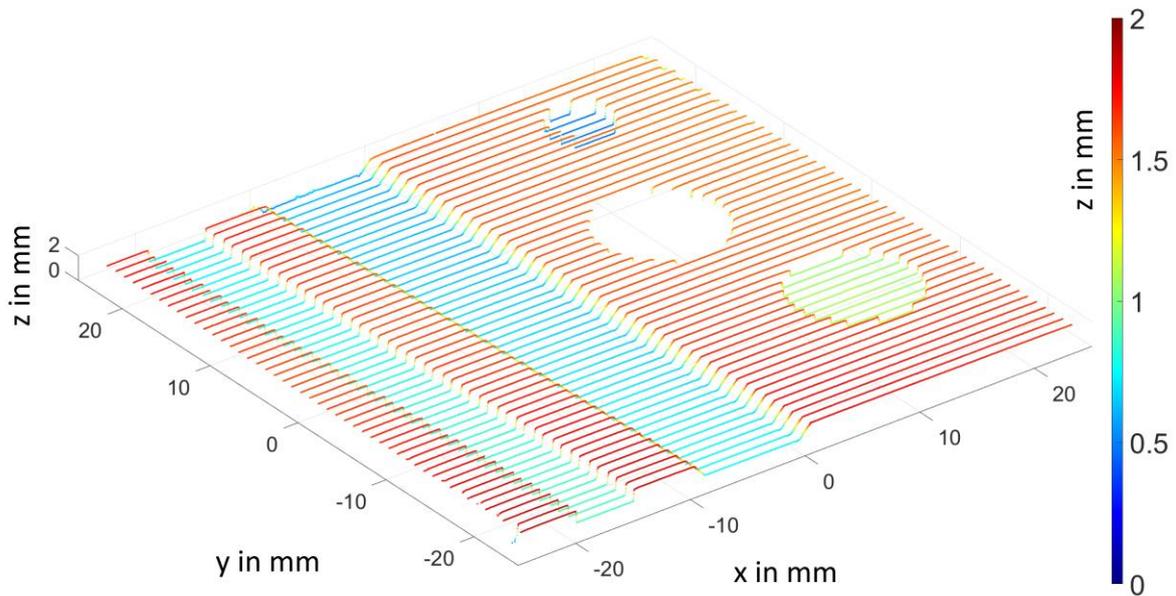


Abbildung 29: Grafische Darstellung der Messergebnisse des Kalibrierkörpers.

Wie in der Abbildung zu erkennen, sind bei der mittleren Kreistasche aufgrund deren Tiefe keine Messwerte vorhanden.

Tabelle 13: Messergebnisse bei der Vermessung des Kalibrierkörpers

Geometrisches Merkmal	Sollwert laut Zeichnung in mm	Messwert in mm
Breite linke Nut	5,0	5,02
Tiefe rechte Nut	1,0	0,97
Tiefe vordere Kreistasche	0,5	0,56
Tiefe hintere Kreistasche	1,0	1,07
Tiefe mittlere Kreistasche	2,5	n.a.

Abbildung 30 zeigt die mit 600 mm/min aufgenommenen Messdaten als Projektion in der Seitenansicht.

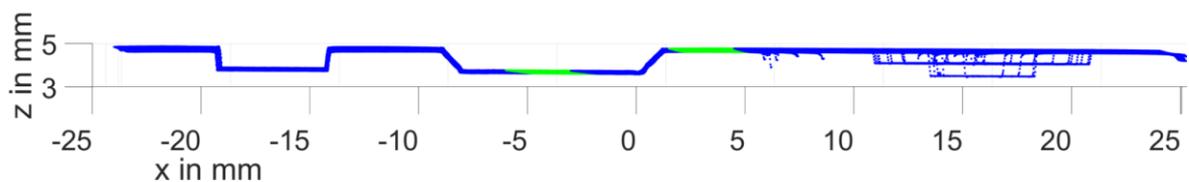


Abbildung 30: Projizierte Messergebnisse in Seitenansicht; die beispielhaft grün dargestellten Bereiche wurden zur Ermittlung der Tiefe der zweiten Nut verwendet. Rechts sind die hintereinander gelegenen Kreistaschen in der Projektion zu sehen.

Eine detaillierte Betrachtung von jeweils zwei aufeinanderfolgenden Messlinien bei 300 sowie bei 600 mm/min Geschwindigkeit zeigt Abbildung 31 in der projizierten Ansicht. Die Messdaten wurden sowohl in positiver als auch in negativer Fahrtrichtung der X-Achse aufgezeichnet.

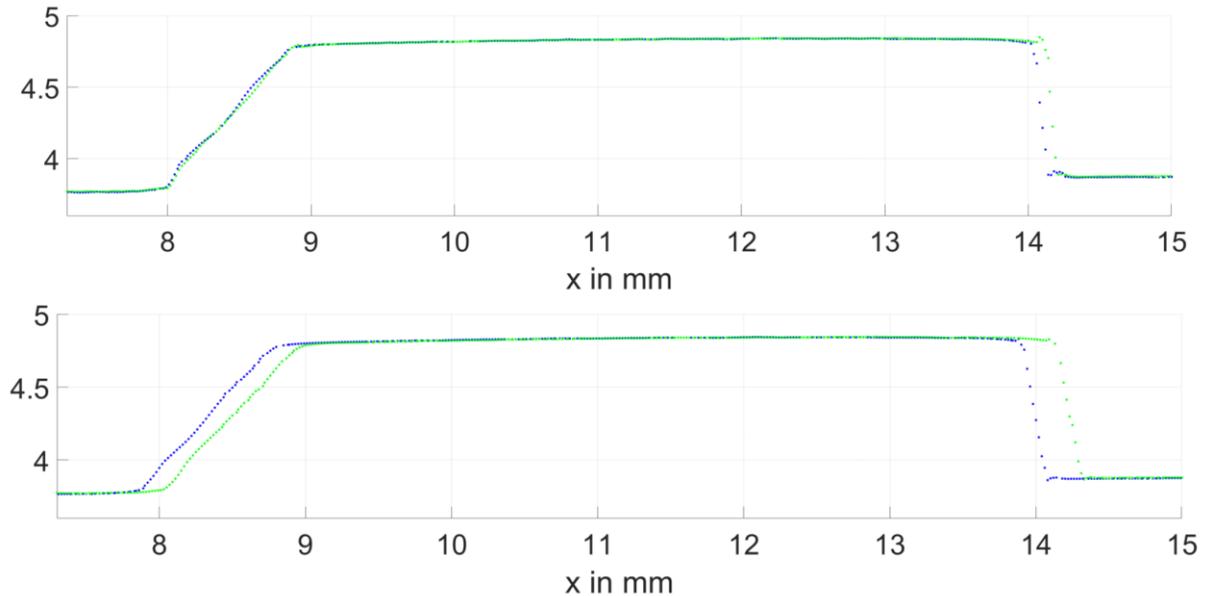


Abbildung 31: Versatz von Messpunkten je nach Messrichtung; die obere Darstellung zeigt zwei Messlinien bei einer Geschwindigkeit von 300 mm/min, die untere bei 600 mm/min. Dabei wurden die beiden Messlinien jeweils mit positiver bzw. negativer Fahrtrichtung der X-Achse aufgezeichnet.

Aus der grafischen Darstellung lässt sich erkennen, dass eine höhere Messgeschwindigkeit zu einem größeren Versatz der senkrechten Bauteilkanten bei zwei aufeinanderfolgenden Messbahnen führt.

Auswertung und Diskussion

Die Messwerte aller vermessenen Merkmale des Kalibrierkörpers befinden sich innerhalb der Fertigungstoleranzen des Körpers. Die mittlere Kreistasche wurde bewusst tiefer als der Messbereich des Sensors gestaltet, um das Verhalten in diesem Fall zu testen. Wie erwartet, erkennt der Sensor die Messung in diesem Bereich als ungültig. Folglich kann daraus geschlossen werden, dass der Sensor im gewählten Aufbau und durch das Infrarot-Filterglas hindurch wie erwartet arbeitet.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Fahrgeschwindigkeit auf die Messergebnisse zeigte sich ein stärkerer seitlicher Versatz entlang der Fahrtrichtung bei höherer Geschwindigkeit. Während ein konstanter Versatz durch mechanisches Umkehrspiel zu erwarten ist, lässt sich der geschwindigkeitsabhängige Versatz auf die Verzögerung bzw. Rechenzeit bei der

Erfassung der teilweise gepufferten Daten zurückführen. Eine Möglichkeit, diesen negativen Einfluss zu verhindern, ist es, die Messdaten stets nur in einer Fahrtrichtung aufzuzeichnen. Dadurch wird das mechanische Umkehrspiel kompensiert und die Messdaten sind passend zueinander ausgerichtet.

9.1.2 Untersuchung vorab gedruckter Probekörper

Aufgabenstellung

Zur Untersuchung des Sensorsystems bei der Vermessung gedruckter Bauteile wurden die Oberflächen vorab gedruckter Bauteile vermessen. Im Gegensatz zum gefrästen Kalibrierkörper besitzen die gedruckten Bauteile bedingt durch die Tropfen eine unregelmäßige Oberfläche mit teilweise steilen Kanten. Dadurch bestehen erhöhte Anforderungen an das Sensorsystem bei der Erfassung der Oberfläche.

Material und Methoden

Als Probekörper wurden zwei vorab gedruckte Quader mit Abmessungen von etwa 5 mm x 5 mm x 32 bzw. 37 mm verwendet. Wie in Abbildung 32 zu sehen, ist die Oberflächenqualität der beiden Bauteile stark unterschiedlich. Während Bauteil 1 eine gleichmäßige Oberfläche besitzt, sind bei Bauteil 2 deutliche Unebenheiten erkennbar.



Abbildung 32: Gedruckte Quader aus Aluminium zur Vermessung: Bauteil 1 (oben) besitzt eine gleichmäßige Oberfläche, während die Oberfläche von Bauteil 2 (unten) sichtbare Unebenheiten aufweist.

Labor- und Geräteaufbau

Der Aufbau entspricht dem aus dem oben beschriebenen Experiment, wobei anstelle des Kalibrierkörpers die gedruckten Probekörper zur Vermessung auf der Bauplattform platziert wurden.

Ergebnisse

Wie im vorigen Versuch wurden die aufgezeichneten Messwerte in Matlab importiert und dort ausgewertet. Der insgesamt vermessene Bereich der Bauteiloberfläche war etwa 4 mm x 28 mm groß und umfasste ca. 29.100 Messpunkte. 8,4 % (Bauteil 1) bzw. 22,8 % (Bauteil 2) der Messpunkte wurden vom Sensor als ungültig markiert und vor der Auswertung aus den Datensätzen entfernt. Ungültige Messdaten befanden sich insbesondere am Rand des Bauteils aufgrund des begrenzten Messbereichs des Sensors. Wie die folgenden Auswertungen zeigen, sind aufgrund der hohen Anzahl von Messpunkten danach dennoch genügend Messpunkte vorhanden, um die Bauteiloberflächen präzise genug abzubilden.

In Abbildung 33 sind die Messdaten der Oberfläche von Bauteil 1 grafisch dargestellt. Es ist deutlich die gleichmäßige Oberflächenstruktur mit den individuellen Tropfen erkennbar.

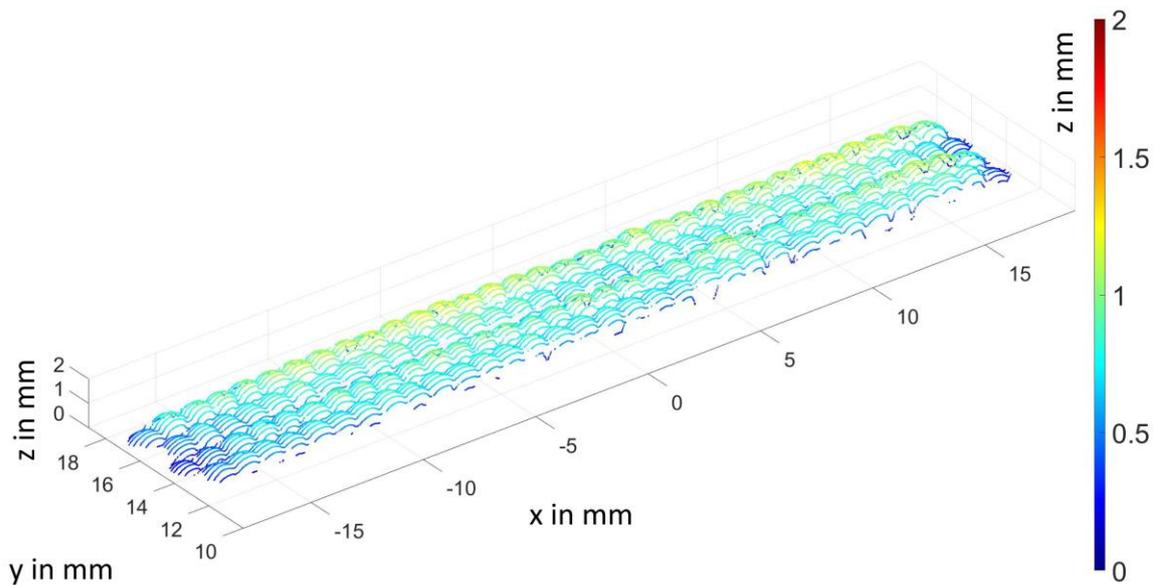


Abbildung 33: Oberfläche von Bauteil 1 mit deutlich erkennbaren, individuellen Tropfen.

In Abbildung 34 ist eine Detailansicht der Oberfläche von Bauteil 2 dargestellt. Im direkten Vergleich mit der Oberfläche von Bauteil 1 sind die stärkere Unregelmäßigkeit der Oberfläche sowie die Höhenabweichungen deutlich erkennbar.

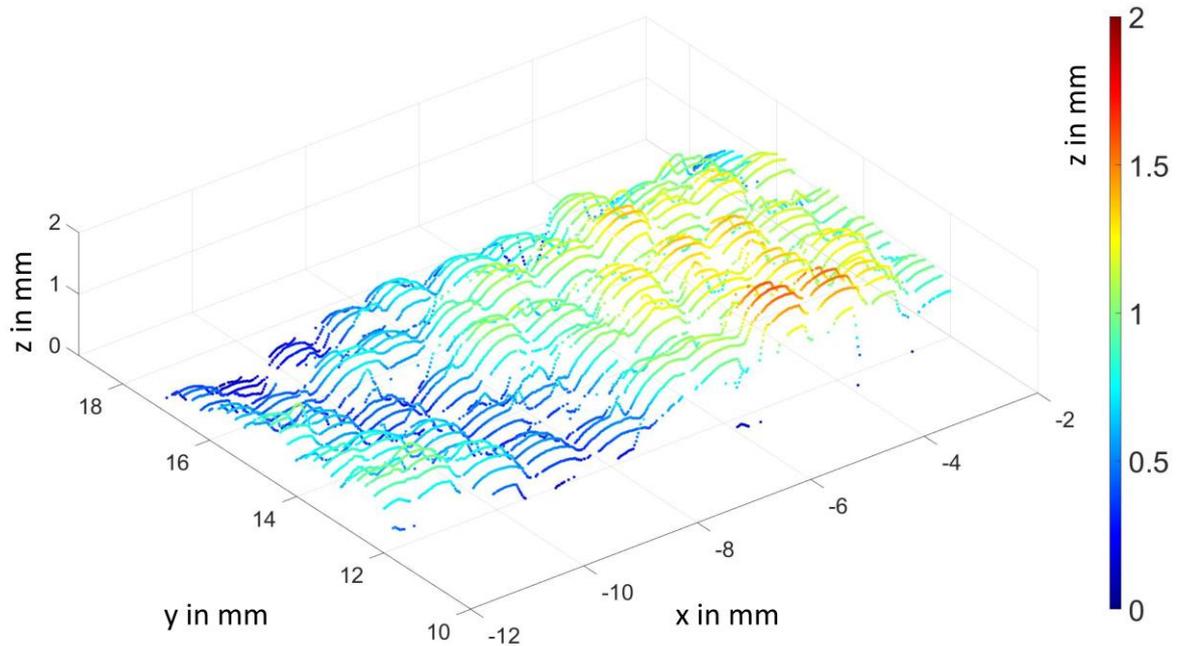


Abbildung 34: Detailansicht der Oberfläche von Bauteil 2; im Vergleich mit Bauteil 1 lassen sich hier deutlich die Schwankungen in der Höhe der Bauteiloberfläche erkennen.

Der Vergleich von zwei Messlinien entlang der Bauteil-Längsrichtung zeigt den Unterschied der beiden Bauteile deutlicher (Abbildung 35). Die beiden Linien befinden sich jeweils an einer Position von $Y = 12,4$ mm und zeigen den X-Bereich von -12 bis -2 mm.

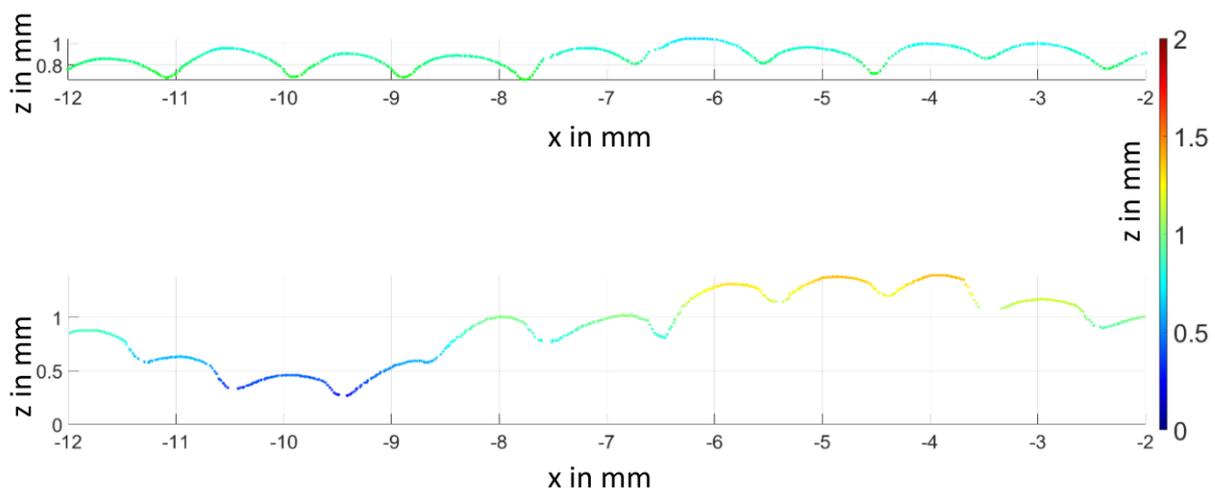


Abbildung 35: Vergleich zweier Messlinien in Bauteil-Längsrichtung von Bauteil 1 (oben) und Bauteil 2 (unten).

Entlang der beiden Messlinien wurde die Höhendifferenz zwischen zwei Minima und dem jeweils benachbarten Maximum ermittelt. Für Bauteil 1 liegt diese zwischen 0,19 und 0,29 mm bei einem Mittelwert von 0,22 mm. Bei Bauteil 2 umfasst das Intervall den Bereich von 0,73 bis 1,21 mm bei einem Mittelwert von

0,98 mm. Der Betrag der maximalen Höhendifferenz entlang der Linie beträgt 0,38 mm bei Bauteil 1 und 1,13 mm bei Bauteil 2.

Eine Berechnung der Standardabweichung aller Messpunkte über den vermessenen Bereich ergab für Bauteil 1 einen Wert von 0,16 mm, für Bauteil 2 0,26 mm. Auch diese Kennzahl ist ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Oberflächen.

Auswertung und Diskussion

Die Auswertung der Messwerte der beiden Probekörper zeigte, dass es insbesondere bei Bauteil 2 aufgrund der ungleichmäßigeren Oberfläche zu einer vermehrten Anzahl (22,8 %) ungültiger Messwerte kam. Dennoch ließen sich aufgrund der hohen Anzahl von Messpunkten auch nach dem Entfernen der ungültigen Daten die Oberflächen der gedruckten Bauteile ausreichend präzise abbilden. Die Ergebnisse zeigen, dass anhand der Messdaten eine quantitative Beurteilung der Oberflächenqualität möglich ist. Die Struktur der einzelnen Tropfen lässt sich in beiden Bauteilen klar erkennen. Somit kann gefolgert werden, dass die Auflösung der gewonnenen Messdaten ausreichend ist, um damit Aussagen über die Größe einzelner Tropfen treffen zu können.

9.2 Inline-Messungen gedruckter Bauteilschichten

Aufgabenstellung

Zur Untersuchung des Sensorsystems bei der Inline-Messung wurden einzelne Tropfen bzw. Schichten direkt nach dem Drucken vermessen. Die frisch gedruckten Tropfen bzw. Bauteile befanden sich in der mit Inertgas gefüllten Prozesskammer, so dass keine bzw. kaum Oxidation des Werkstoffs stattfindet. Dadurch war die Oberfläche metallisch glänzend und somit reflektiver als die von abgekühlten Bauteilen mit Oxidschicht. Dies könnte beim verwendeten optischen Messverfahren zu Problemen führen. Zusätzlich besaßen die Bauteile aufgrund der beheizten Bauplattform eine Temperatur von etwa 600°C, was ebenso Einfluss auf die optischen Eigenschaften und damit auf die Messung haben konnte.

Durch diese Untersuchung sollte die Eignung des Messsystems auch unter dem Einfluss dieser Faktoren verifiziert werden.

Material und Methoden

Über einen entsprechenden G-Code wurde eine Schicht aus 10x10 Tropfen gedruckt und unmittelbar danach mit dem Konfokalsensor mit einem

Bahnabstand von 0,2 mm vermessen. Auf die gedruckte Schicht wurden zwei weitere Schichten gedruckt, die ebenfalls vermessen wurden. Als Werkstoff zum Drucken der Proben wurde die Aluminiumlegierung AlSi12 (3.2585) verwendet. Die Druckparameter sind in der folgenden Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14: Verwendete Druckparameter

Parameter	Wert
Verfahrgeschwindigkeit	50 mm/min
Tropfenabstand	1,25 mm
Druck	3500 hPa
Pulsdauer	3,5 ms
Bahnabstand beim Vermessen	0,2 mm

Labor- und Geräteaufbau

Der Aufbau bestand aus der realisierten Anlage zum Material Jetting mit einem Druckkopf sowie dem integrierten Konfokalsensor. Druckkopf und Sensor befanden sich dabei wie beschrieben jeweils ortsfest an der Oberseite der Prozesskammer, während die Bauplatform und die darauf montierte Druckplatte entlang der drei Raumrichtungen verfahren wurde. Eine Gesamtansicht der Versuchsanlage zeigt Abbildung 36.

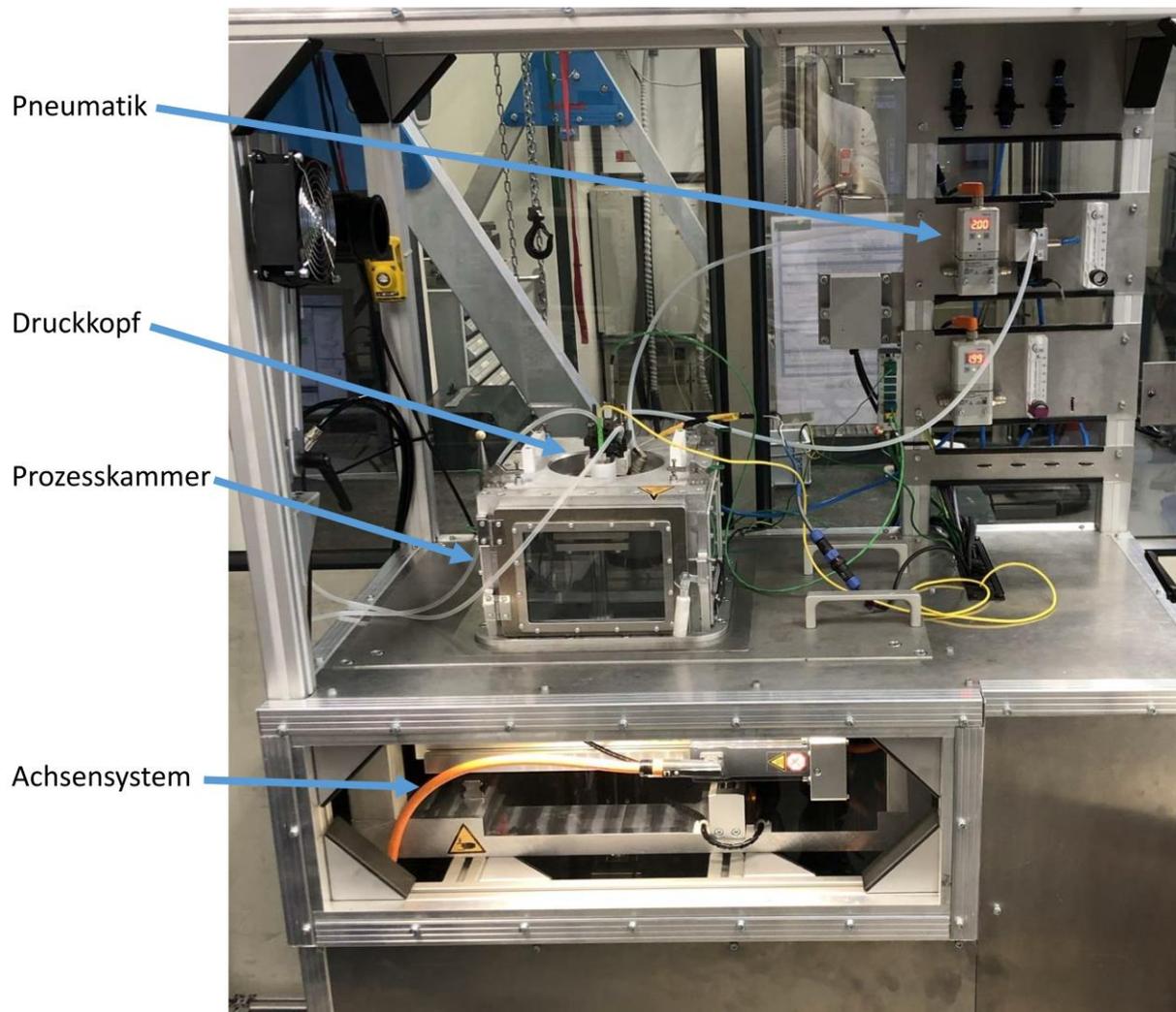


Abbildung 36: Versuchsanlage zum Material Jetting mit integrierter Bauteilvermessung; zu sehen sind die Pneumatikkomponenten (1), die Adapterplatte mit montiertem Druckkopf und Konfokalsensor (2), die Prozesskammer (3) sowie das Achsensystem der X- und Y-Achse (4).

Eine detailliertere Ansicht der Prozesskammer und der umgebenden Komponenten zeigt Abbildung 37.

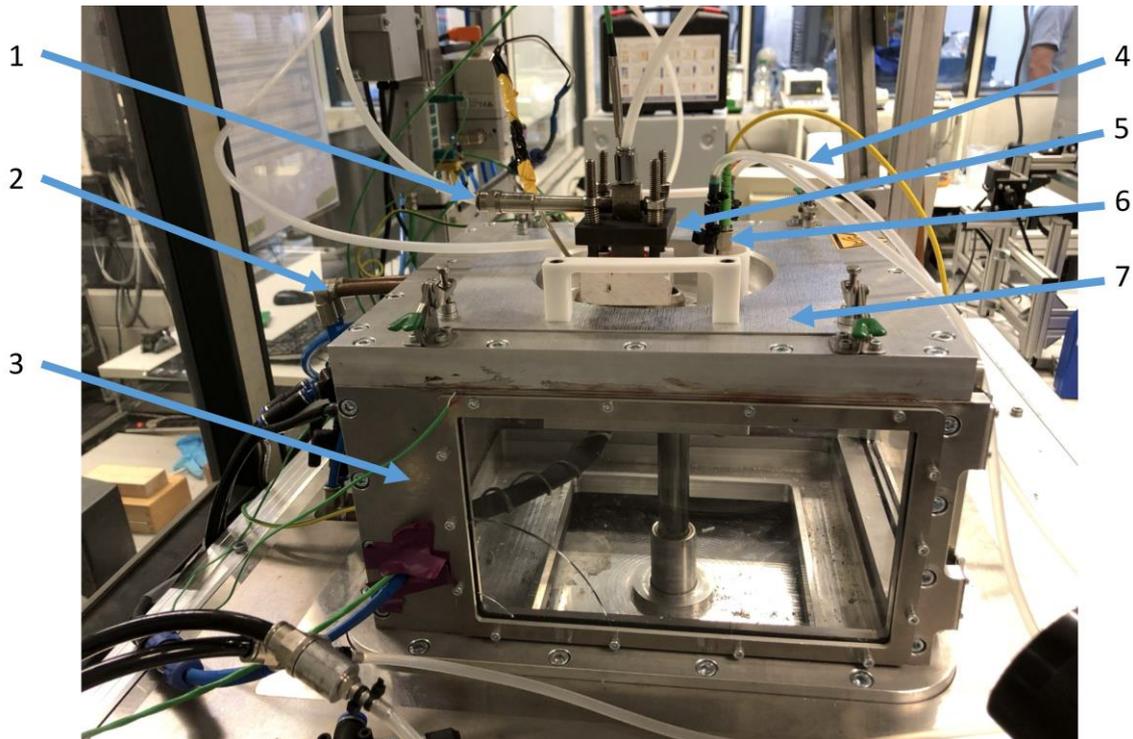


Abbildung 37: Versuchsaufbau zur Vermessung gedruckter Schichten; zu sehen ist der Pneumatikanschluss (1), die Wasserkühlung der Adapterplatte (2), die Prozesskammer mit der innenliegenden Bauplattform (3), die Wasserkühlung (4) des Konfokalsensors (6), der Druckkopf (5) sowie die Adapterplatte für Druckkopf und Sensor (7).

Ergebnisse

Abbildung 38 zeigt den aus drei Schichten bestehenden Probekörper mit 100 Tropfen je Schicht. In Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die Messdaten der drei aufeinander gedruckten Schichten grafisch dargestellt. In jeder Schicht sind die einzelnen Tropfen deutlich zu erkennen.



Abbildung 38: Gedruckter Probekörper bestehend aus drei Schichten, aufgenommen aus zwei unterschiedlichen Ansichten; zu sehen ist die Tropfenmatrix bestehend aus 100 Tropfen je Schicht. Teilweise sind Satellitentropfen neben dem Bauteil auf der Druckplatte zu sehen.

In der ersten Schicht wurde neben dem Bauteil auch die Druckplatte erfasst, da sie sich im Messbereich des Sensors befand. Diese diente als Referenz in z-Richtung. Anhand von drei Eckpunkten der Druckplatte können leichte Abweichungen der Oberfläche der Druckplatte von der XY-Ebene kompensiert werden. Dazu wurden die Messwerte linear entsprechend der jeweiligen Höhenunterschiede der Druckplatte angepasst, so dass nach der Verarbeitung alle Messwerte relativ zur Druckplatte ausgerichtet waren.

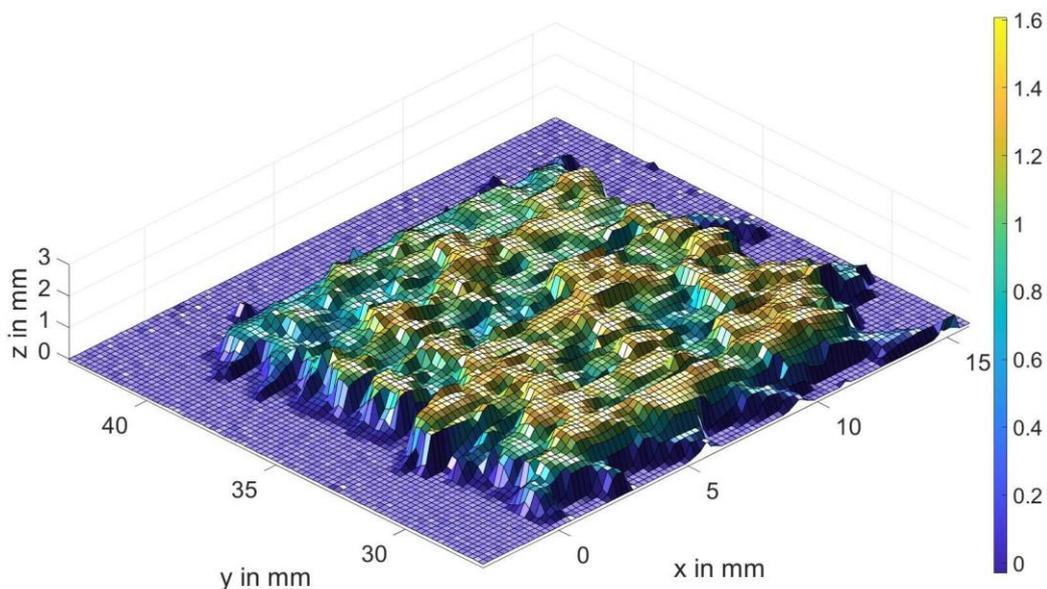


Abbildung 39: Grafische Darstellung der Messdaten der ersten Schicht; am Rand des Bauteils sind die auf dem Foto sichtbaren Satellitentropfen ebenfalls zu erkennen.

In der zweiten und dritten gedruckten Schicht befand sich die Druckplatte nicht mehr im Messbereich des Sensors (2 mm), so dass außerhalb des Bereichs des Bauteils keine gültigen Messdaten vorlagen. Für die Visualisierung der Daten wurde diesen ungültigen Punkten der Wert Null zugewiesen. Dadurch entsteht in der grafischen Darstellung an den Rändern des Bauteils der Eindruck nahezu senkrecht abfallender Kanten.

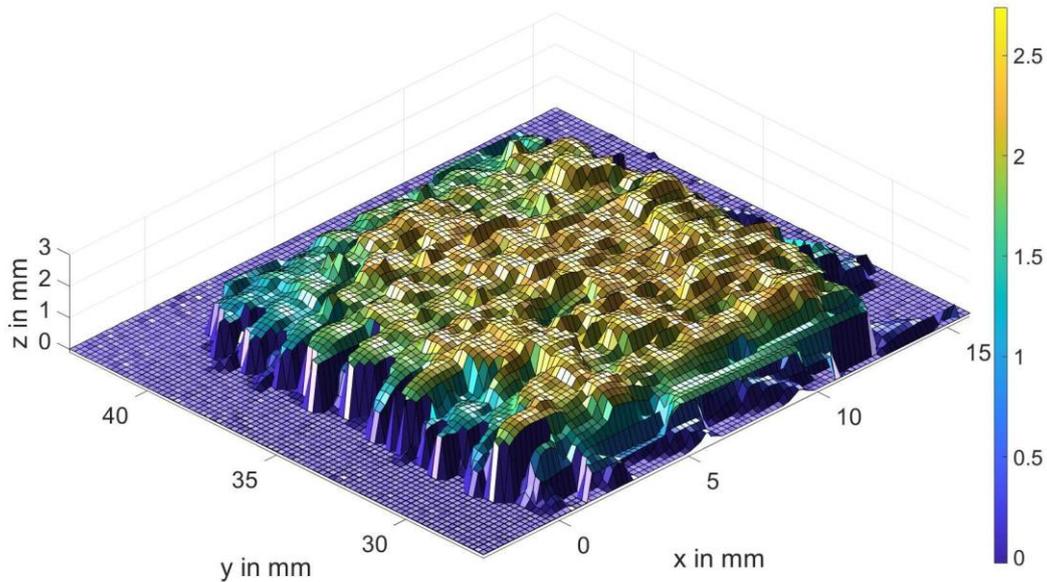


Abbildung 40: Grafische Darstellung der Messdaten der zweiten Schicht; die Darstellung der nahezu senkrechten Kanten an den Rändern des Bauteils ist bedingt durch das Fehlen von Daten in diesem Bereich, da sich die Druckplatte außerhalb des Messbereichs befindet.

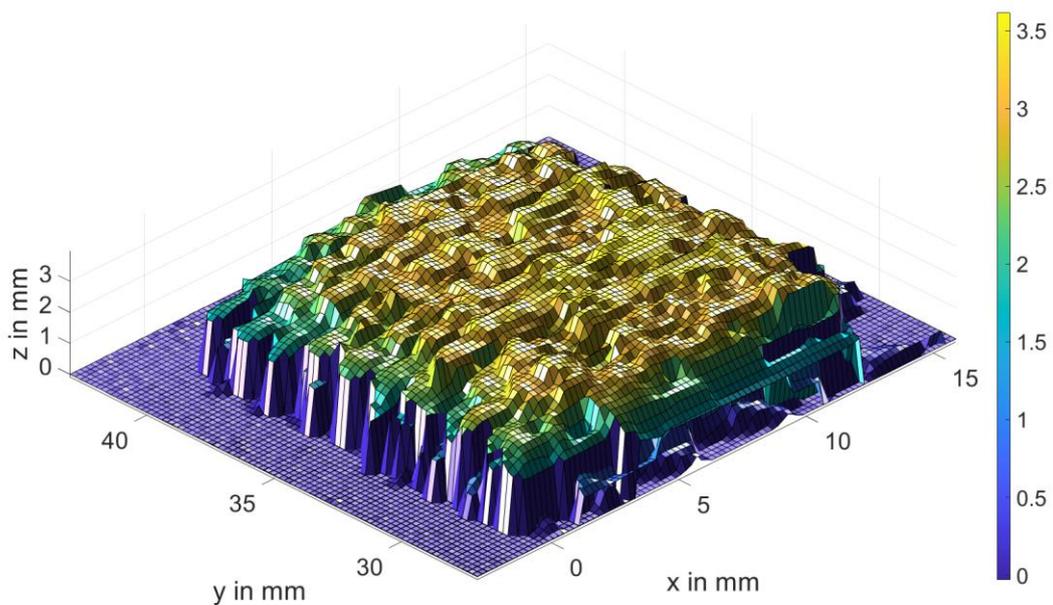


Abbildung 41: Grafische Darstellung der Messdaten der dritten Schicht.

Zur quantitativen Bewertung der Messdaten wurde in allen drei Schichtaufnahmen jeweils ein Messbereich im inneren Bereich des Bauteils ausgewählt, so dass ausschließlich Messwerte von gedruckten Tropfen betrachtet werden. Dieser Messbereich umfasste den Bereich von 2 – 12 mm in X-Richtung sowie 29 – 39 mm in Y-Richtung. Innerhalb dieses Bereichs wurde der Mittelwert der Bauteilhöhe, die Standardabweichung der Höhe sowie der minimale und maximale Wert der Höhe ermittelt. Die Anzahl der ausgewerteten Messpunkte war in jeder Schicht identisch, da die aufbereiteten Daten im selben Raster vorlagen und somit stets die gleiche Anzahl vorhanden war.

Die folgende Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse für die drei vermessenen Schichten.

Tabelle 15: Auswertung der Messdaten der drei vermessenen Druckschichten

Parameter	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3
Mittelwert Höhe	1,12 mm	2,21 mm	3,16 mm
Standardabweichung Höhe	0,22 mm	0,24 mm	0,29 mm
Minimale Höhe	0,25 mm	1,42 mm	2,23 mm
Maximale Höhe	1,61 mm	2,74 mm	3,62 mm
Anzahl Messpunkte	2450		

Ausgehend von den Messdaten der aufeinander gedruckten Schichten können Details des Bauteils auch an Stellen betrachtet werden, die nach dem Abschluss des Drucks nicht mehr von außen sichtbar sind. Dadurch können z.B. während des Drucks entstandene Fehlstellen erkannt werden oder interessante Stellen für eine anschließende zerstörende Untersuchung beispielsweise über Schliffbilder identifiziert werden. Die folgende Abbildung 42 zeigt beispielhaft eine Schnittansicht durch die Messdaten der drei Schichten parallel zur X-Z-Ebene an der Position $Y = 35$ mm.

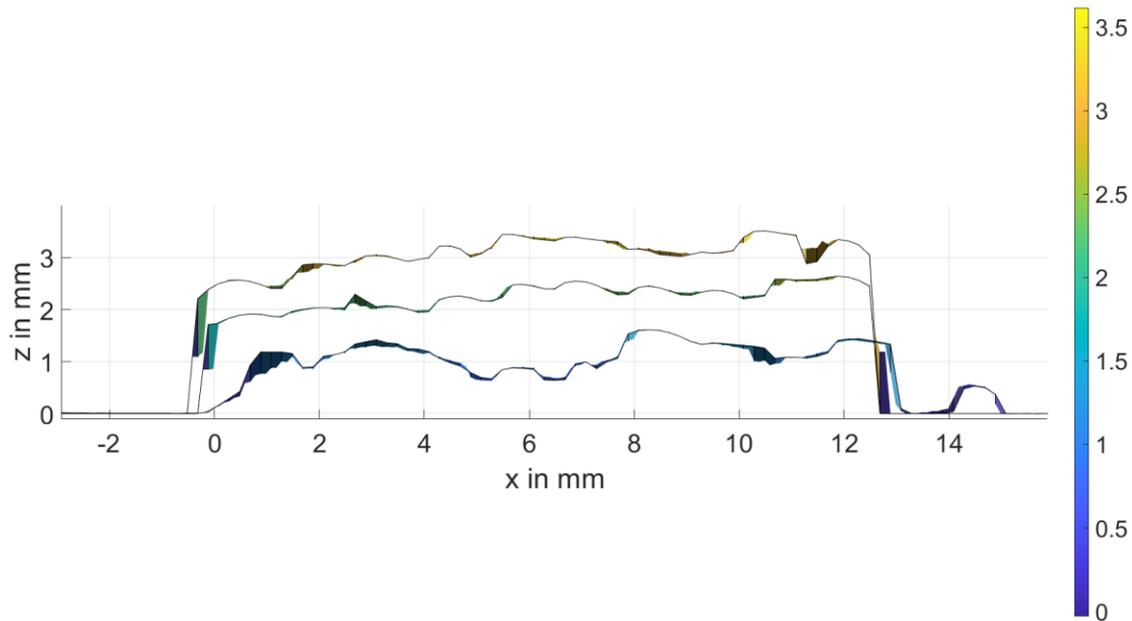


Abbildung 42: Schnittansicht der Messdaten des dreischichtigen Bauteils an der Position $Y=35$ mm.

Auswertung und Diskussion

Die Messgenauigkeit und Verlässlichkeit des Sensorsystems konnte anhand des gefrästen Kalibrierkörpers nachgewiesen werden. In diesem Experiment konnte gezeigt werden, dass die Aufnahme von Messdaten der gedruckten Schichten während des Druckvorgangs möglich ist. Somit ist verifiziert, dass die gewonnenen Messdaten das Bauteil in ausreichender Genauigkeit repräsentieren können. Über Weiterverarbeitung dieser Daten kann die Oberfläche jeder Schicht erfasst und rekonstruiert werden. Dies ermöglicht einen detaillierten Einblick in den Druckprozess in Echtzeit.

Darauf aufbauend sind verschiedene Möglichkeiten zur Verwendung dieser Daten denkbar, wie beispielsweise eine Schichthöhenregelung, die Erkennung von Fehlstellen oder eine automatische Kalibrierung des Druckkopfes anhand der ermittelten Tropfengrößen bei unterschiedlichen Druckparametern.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Versuchsanlage mit integrierter Sensorik zur Vermessung der gedruckten Bauteilschichten während des Druckprozesses realisiert. Zusätzlich wurde ein Prozess zur Umsetzung der Vermessung entwickelt und implementiert. Dadurch ist das Inline-Prozessmonitoring beim Material Jetting von Metallen, insbesondere Aluminium, möglich.

10.1 Zusammenfassung

Für die kosteneffiziente Herstellung von Bauteilen in kleinen bis mittleren Stückzahlen bieten sich additive Fertigungsverfahren als wirtschaftliche Methode an. Während für die Herstellung von Kunststoffbauteilen eine breite Auswahl an kostengünstigen Anlagen existiert, sind Maschinen für die Verarbeitung von Metallen noch vergleichsweise teuer. Die gängigen Verfahren für die additive Fertigung von Metallbauteilen verwenden Pulver als Ausgangsmaterial. Dies bewirkt einerseits höhere Materialkosten verglichen mit dem reinen Werkstoffpreis. Andererseits stellt Metallpulver in seiner Handhabung besondere Anforderungen an den Gesundheits- und Arbeitsschutz. Aufgrund seiner Partikelgröße ist es beim Einatmen lungengängig sowie entzündlich.

Eine Möglichkeit, die Nachteile pulverbasierter Fertigungsverfahren zu überwinden, bietet der direkte flüssige Auftrag von Metall, das Material Jetting. Das Metall wird bei diesem Verfahren innerhalb eines Schmelztiegels aufgeschmolzen und anschließend werden flüssige Tropfen freifliegend auf eine Bauplattform aufgetragen. Folglich ist die Ausgangsform des Werkstoffs nahezu beliebig und es kann beispielsweise kostengünstig verfügbarer Schweißdraht oder Stangenmaterial verwendet werden. Aktuell befindet sich dieses Verfahren für Metalle überwiegend noch im Forschungsstadium.

Die hohen Temperaturen und die hohe Reaktivität von flüssigem Aluminium stellen besondere Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe für einen geeigneten Druckkopf. Der Prozess der Tropfenentstehung besitzt dabei eine Vielzahl von Einflussfaktoren wie beispielsweise die exakte Zusammensetzung der Legierung, die Temperatur der Schmelze, den Durchmesser und die Länge der Düse sowie Verschmutzungen und Oxidation des Werkstoffs an der Düse. Aufgrund dieser Faktoren kann es während des Druckprozesses zu schwankenden Tropfengrößen kommen. In Folge dessen weicht die Geometrie des gedruckten Bauteils potentiell von der angestrebten Form ab.

Um präzisere Einblicke in die Zusammenhänge zwischen den Druckparametern des Druckkopfs und den resultierenden Tropfen und somit der Bauteilgeometrie zu erhalten, ist eine Vermessung der gedruckten Schichten während des Druckprozesses notwendig. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Versuchsanlage konzipiert, die es ermöglicht, zwei Druckköpfe sowie einen optischen Geometriesensor gleichzeitig zu verwenden. Für die Realisierung der Anlage wurden die einzelnen Baugruppen ausgelegt, passende Zukaufteile ausgewählt und mechanische Komponenten konstruiert. Die ausgewählten Sensoren und Aktoren wurden mit der aufgebauten Steuerung verbunden und die Software dazu entwickelt. Die Ansteuerung der Achsen und der Druckköpfe sowie die Vorgabe von Prozessparametern erfolgt über G-Code. Für die Vermessung der Druckschichten während des Prozesses wurde ein Konzept erarbeitet, das die gezielte Datenaufzeichnung der Sensordaten ebenfalls über G-Code ermöglicht. Die Sensordaten werden über eine universelle Schnittstelle für die Weiterverarbeitung in anderen Programmen zur Verfügung gestellt.

Das Sensorsystem wurde an einem gefrästen Kalibrierkörper sowie an vorab gedruckten Probekörpern validiert. Anschließend wurden gedruckte Schichten während des Druckprozesses vermessen. Für die automatische Auswertung der Messdaten wurde ein Algorithmus entwickelt und in Matlab implementiert. Die Auswertung zeigt, dass anhand der Messdaten die Oberfläche der gedruckten Teile rekonstruiert werden kann und dass qualitative und quantitative Aussagen zur Bauteilqualität abgeleitet werden können. Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass mit der realisierten Anlage mit integrierter Sensorik zur Vermessung der Druckschichten die Voraussetzungen geschaffen sind, genauere Einblicke in den Druckprozess und damit ein besseres Prozessverständnis zu gewinnen.

10.2 Ausblick

Aufbauend auf dieser Arbeit sind verschiedene Ansätze für weitere Arbeiten denkbar, die im Folgenden beschrieben werden.

10.2.1 Automatische, KI-gestützte Kalibrierung zur Auswahl optimaler Druckparameter

Während der Druckversuche konnte festgestellt werden, dass neben statistischen Schwankungen der Tropfengröße auch systematische Veränderungen auftreten. Dies kann beispielsweise bei der Verwendung einer neuen Düse mit leicht abweichendem Durchmesser oder beim Auftreten von partiellen Verschmutzungen der Düse auftreten. Eine solche systematische Abweichung

kann durch Anpassen der Druckparameter für den jeweiligen Druckprozess in der Regel kompensiert werden. Die Ermittlung der passenden Parameter erfolgte während der Druckversuche manuell durch das Drucken von Probetropfen und die visuelle Beurteilung des Druckbilds.

Ausgehend von Sensordaten des Geometriesensors ist eine automatische Kalibrierung und Ermittlung passender Parameter denkbar. Ein möglicher Ansatz besteht darin, zu Beginn des Druckvorgangs in einem bestimmten Bereich der Druckplatte mehrere Tropfen mit unterschiedlichen Parametern zu drucken und diese anschließend zu vermessen. Durch automatische Ermittlung der jeweiligen Tropfengröße, der Form und der Volumina kann die für den aktuellen Druckvorgang optimale Parameterkombination ausgewählt werden und mit dieser das gewünschte Bauteil gedruckt werden. Des Weiteren kann durch diese Kalibrierung gleichzeitig die exakte relative Position von Sensor und Druckkopf zueinander ermittelt werden. Durch die Demontage und Montage des Druckkopfs und insbesondere der Düse weicht diese jeweils leicht vom vorherigen Abstand ab. Für die genaue Zuordnung der Messdaten zu den jeweils gedruckten Tropfen ist die Kenntnis des exakten Abstands notwendig.

10.2.2 Schichthöhenregelung

Wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, ist die Implementierung einer Schichthöhenregelung durch geeignete lokale Variation der Tropfengrößen denkbar. Wird in einer Schicht eine Abweichung der Bauteilhöhe von der gewünschten Höhe festgestellt, kann diese in der darauffolgenden Schicht durch Drucken eines entsprechend kleineren oder größeren Tropfens kompensiert werden. Dafür werden in den Messdaten für jede Tropfenposition der folgenden Schicht Soll- und Istwert der Höhe verglichen und bei Abweichungen für den jeweiligen Tropfen entsprechend angepasste Druckparameter verwendet.

10.2.3 Lokale Variation der Tropfengröße zur Beschleunigung des Druckprozesses

Neben der Variation der Tropfengröße zur Kompensation von Geometrieabweichungen ist auch eine Nutzung zur Beschleunigung des Druckprozesses bei gleichzeitiger Beibehaltung einer ausreichenden geometrischen Auflösung denkbar. Abbildung 43 veranschaulicht dieses Konzept.

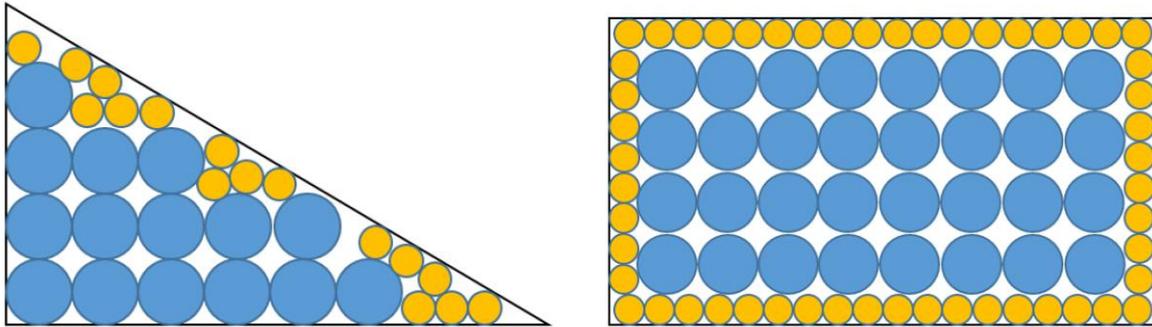


Abbildung 43: Gezielte Variation der Tropfengröße innerhalb eines Bauteils; durch diesen Ansatz können entweder geometrische Details besser abgebildet werden (links) oder aber die Druckzeit bei Beibehaltung der Oberflächenqualität verringert werden (rechts).

Da das Tropfenvolumen mit dritter Potenz vom Durchmesser abhängt und die Tropfenfrequenz nicht beliebig gesteigert werden kann, würde ein Drucken des gesamten Bauteils mit kleineren Tropfen die Druckzeit signifikant verlängern. Durch die Kombination unterschiedlicher Tropfengrößen ist es denkbar, Bauteilregionen mit feinen Details präziser abzubilden oder aber die Druckzeit durch schnelleres Auffüllen mit großen Tropfen im Innenbereich zu reduzieren, während die Außenkontur gleichbleibend mit hoher Präzision gedruckt wird. Dadurch kann ein Kompromiss zwischen ausreichend hoher Auflösung und geringer Druckzeit realisiert werden.

Literatur

- ARBURG GMBH & CO. KG. 2023. *ARBURG Kunststoff-Freiformen mit dem freeformer* [Online]. Available: <https://www.arburg.com/de/de/produktwelt/additive-fertigung/freeformer/> [Accessed 17.04.2024].
- AZIZ, S. D. & CHANDRA, S. 2000. Impact, recoil and splashing of molten metal droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 2841-2857.
- CAO, W. & MIYAMOTO, Y. Droplet-based Freeform Fabrication of Aluminum Objects through Internet. 2002.
- CHAO, Y.-P., QI, L.-H., ZUO, H.-S., LUO, J., HOU, X.-H. & LI, H.-J. 2013. Remelting and bonding of deposited aluminum alloy droplets under different droplet and substrate temperatures in metal droplet deposition manufacture. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 69, 38-47.
- DESKTOP METAL, I. 2017. *Material Supply for Magnetohydrodynamic Metal Manufacturing*. USA patent application. 07.09.2017.
- DIN E.V. (HRSG.) 2022. DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03.
- FÄHNDRICH, M. 1997. *Modellierung der Verdampfungs- und Strömungsvorgänge beim Bubble-Jet-Prozess*, VDI-Verlag.
- GIBSON, I., ROSEN, D. W. & STUCKER, B. 2009. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer US.
- GOTTWALD, J. F. 1971. Liquid metal recorder. Google Patents.
- GRANDVIEWRESEARCH 2021. Metal 3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software, Services), By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2022 - 2030.
- GRÜNWALD, S. 2006. *Berührungsloses Dispensieren hochviskoser Flüssigkeiten*, VDI-Verlag.
- HARMON, D. 1955. Drop sizes from low speed jets. *Journal of The Franklin Institute-engineering and Applied Mathematics*, 259, 519-522.
- HARNISCH, J. 2009. *Aufbau und Untersuchung eines Drop-on-demand-Systems für den Hochtemperatureinsatz*, VDI.
- HEINZL, J. Schnell und lautlos drucken mit dem Tintenstrahl. 1978 Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 238-248.
- HERTZ, C. H. & SIMONSSON, S.-I. 1966. *Ink Jet Recorder*.
- HIMMEL, B. 2020. *Material Jetting of Aluminium: Analysis of a Novel Additive Manufacturing Process*. Universitätsbibliothek der TU München.
- HIMMEL, B., RUMSCHÖTTEL, D. & VOLK, W. 2019. Tensile properties of aluminium 4047A built in droplet-based metal printing. *Rapid Prototyping Journal*, 25, 427-432.
- HIMMEL, B., RUMSCHÖTTEL, D. & VOLK, W. 2018. Thermal process simulation of droplet based metal printing with aluminium. *Production Engineering*, 12, 457-464.
- JIANG, X.-S., QI, L.-H., LUO, J., HUANG, H. & ZHOU, J.-M. 2010. Research on accurate droplet generation for micro-droplet deposition manufacture. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 535-541.
- KAGERER, M., RUMSCHÖTTEL, D., IRLINGER, F. & LUETH, T. C. Fabrication and Application of a Chemical Resistant Low-Cost Microdrop Generator. ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2011. 601-610.
- KIRCHEBNER, B., PLOETZ, M., REHEKAMPFF, C., LECHNER, P. & VOLK, W. 2021a. Influence of Salt Support Structures on Material Jetted Aluminum Parts. *Materials*, 14, 4072.

- KIRCHEBNER, B., REHEKAMPPF, C., TRÖNDLE, M., LECHNER, P. & VOLK, W. 2021b. Analysis of salts for use as support structure in metal material jetting. *Production Engineering*.
- KIRCHEBNER, B., WEIDNER, C., PLÖTZ, M., REHEKAMPPF, C., VOLK, W. & LECHNER, P. Liquid Metal Jetting of Aluminum Parts with Salt Support Structures. 2023 International Solid Freeform Fabrication Symposium, August 14-16 2023 Austin, Texas, USA.
- KOTO, H. 1978. *Print Head*. Japan patent application JPS5586767A.
- LE, H. P. 1998. Progress and trends in ink-jet printing technology. *Journal of Imaging Science and Technology*, 42, 49-62.
- LI, S., WEI, Z., DU, J., ZHAO, G., WANG, X. & LU, B. 2016. Numerical and experimental investigation of molten metal droplet deposition applied to rapid prototyping. *Applied Physics A*, 122.
- LORD RAYLEIGH, F. R. S. 1878. On The Instability Of Jets. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s1-10, 4-13.
- LUETH, T. C. SG-Library: Entwicklung einer konstruktiven MATLAB-Toolbox zur räumlichen Modellierung von Körpern, Gelenken und Getrieben. 2015.
- MANTELL, D. A., CHUNGBIN, C. T., CORMIER, D. R., VADER, S. J., VADER, Z. S., SUKHOTSKIY, V., BALA, R. & HSIAO, W. 2019. *Method and system for operating a metal drop ejecting three-dimensional (3d) object printer to compensate for drop size variations*.
- MEINERS, W., WISSENBACH, K. & GASSER, A. 1998. *Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers*. Germany patent application DE19649865C1.
- ORME, M., COURTER, J., LIU, Q., HUANG, C. & SMITH, R. 2000. Electrostatic charging and deflection of nonconventional droplet streams formed from capillary stream breakup. *Physics of Fluids*, 12, 2224-2235.
- ORME, M. & SMITH, R. F. 2000. Enhanced Aluminum Properties by Means of Precise Droplet Deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 122, 484-493.
- REHEKAMPPF, C., HUBER, M., KIRCHEBNER, B., IRLINGER, F. & LUETH, T. C. Automatic Evaluation of Inline Surface Topology Measurement Data of Material Jetted Metal Parts for Closed Loop Control. ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2023. New Orleans, Louisiana, USA.
- REHEKAMPPF, C., KIRCHEBNER, B., KREBS, F., IRLINGER, F. & LUETH, T. C. Inline Topology Measurement of Material Jetted Metal Parts. ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2021.
- RUMSCHOETTEL, D., GRIEBEL, B., IRLINGER, F. & LUETH, T. C. A fast pneumatic droplet generator for the ejection of molten aluminum. 2017 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), 6-9 Feb. 2017 2017. 1-8.
- RUMSCHOETTEL, D., KÜNZEL, F., IRLINGER, F. & LUETH, T. C. A novel piezoelectric printhead for high melting point liquid metals. 2016 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), 25-28 Jan. 2016 2016. 1-8.
- SACKINGER, P. A., ESSIEN, M., PEEBLES, H. C. & SCHLIENGER, E. M. 1998. *Apparatus for jet application of molten metal droplets for manufacture of metal parts*.
- SOHN, H. & YANG, D. Y. 2005. Drop-on-demand deposition of superheated metal droplets for selective infiltration manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 392, 415-421.
- SUKHOTSKIY, V., KARAMELAS, I., GARG, G., VERMA, A., TONG, M., VADER, S., VADER, Z. & FURLANI, E. Magnetohydrodynamic Drop-on-Demand Liquid Metal 3D Printing. 2017.

- SUTER, M. 2012. *Magnetohydrodynamischer (MHD) Druckkopf für die additive Fertigung von Metallbauteilen*, Zürich, ETH.
- TSENG, A., LEE, M. & ZHAO, B. 2001. Design and Operation of a Droplet Deposition System for Freeform Fabrication of Metal Parts. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123.
- VAUGHT, J. L., CLOUTIER, F. L., DONALD, D. K., MEYER, J. D., TACKLIND, C. A. & TAUB, H. H. 1982. *Thermal Inkjet Printer*. USA patent application US4490728A.
- VIZAAR INDUSTRIAL IMAGING AG. 2023. *Emissionsgrad-Tabelle* [Online]. Available: <https://vizaar-xtra.de/emissionsgrad-tabelle/> [Accessed 01.12.2023].
- WIEDEMANN, T., DORFNER, V., BRANN, G. & DURST, F. 2000. *Vorrichtung zur Erzeugung monodisperser Tropfen*. DE10013450B4.
- WOHLERS, T. T., CAMPBELL, I., DIEGEL, O., HUFF, R., KOWEN, J. & ASSOCIATES, W. 2023. *Wohlers Report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry*, Wohlers Associates.
- YANPU, C., LEHUA, Q. & ZHENGMIN, B. 2016. 3D Dynamic Simulation Analysis of Thermal-Mechanical Coupling during 7075 Aluminum Alloy Micro-droplet Deposition Manufacture. *Rare Metal Materials and Engineering*, 45, 1924-1930.
- ZHANG, D., QI, L., LUO, J., YI, H. & HOU, X. 2017. Direct fabrication of unsupported inclined aluminum pillars based on uniform micro droplets deposition. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 116, 18-24.
- ZUO, H.-S., LI, H.-J., QI, L.-H., LUO, J., ZHONG, S.-Y. & WU, Y.-F. 2014. Effect of non-isothermal deposition on surface morphology and microstructure of uniform molten aluminum alloy droplets applied to three-dimensional printing. *Applied Physics A*, 118, 327-335.

Publikationen

Erstautor

- Rehekampff, C.;** Huber, M.; Kirchebner, B.; Irlinger, F. & Lueth, T. C., (2023): Automatic Evaluation of Inline Surface Topology Measurement Data of Material Jetted Metal Parts for Closed Loop Control. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2023), Oct. 29-Nov. 2, 2023. doi: 10.1115/IMECE2023-112380
- Rehekampff, C.;** Kirchebner, B.; Krebs, F.; Irlinger, F.; Lueth, T. C. (2021): Inline Topology Measurement of Material Jetted Metal Parts. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2021), Nov. 1-5, 2021. doi: 10.1115/IMECE2021-70279
- Rehekampff, C.;** Rumschoettel, D.; Schroeffler, A.; Irlinger, F.; Lueth, T. C. (2021): Production of Spherical Monodisperse Metal Powders by Means of the Plateau-Rayleigh Instability of a Liquid Metal Jet. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2021), Nov. 1-5, 2021. doi: 10.1115/IMECE2021-FM2A
- Rehekampff, C.;** Schroeffler, A.; Irlinger, F.; Lueth, T. C. (2019): Influence of Infill Structures and Process Parameters on the Tensile Strength of 3D-printed PEEK Parts. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2019), Dali, Yunnan, China, December 6-8, 2019.
- Rehekampff, C.;** Rumschöttel, D.; Irlinger, F. and Lueth T. (2019): Polychromatic Coloring of Dental Zirconia by Inkjet Printing. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2019), Salt Lake City, USA, November 11-14, 2019. doi: 10.1115/IMECE2019-11277
- Rehekampff, C.;** Lueth, T. C. (2019): For a natural smile - Automated, digitally planable coloring of zirconium oxide for dental applications. Medical Technology in Bavaria 2019/2020, pp. 26 - 28.
- Rehekampff, C.;** Lueth, T. C. (2019): Für ein natürliches Lächeln - Automatisiertes, digital planbares Einfärben von Zirkoniumoxid für Dentalanwendungen. Medizintechnik in Bayern 2019/2020, pp. 30 - 32.

Mitautor

- Parhofer, C. A. W., Pancheri, F., **Rehekampff, C.**, Lueth, T. (2023): Workspace Specific Robot Arm Design. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2023), Oct. 29-Nov. 2, 2023. doi: 10.1115/IMECE2023-113461
- Huber, M. M., Merz, J. U., **Rehekampff, C.**, Irlinger, F., Lueth, T. C., (2023): Design of an extendable robot arm based on origami foldpatterns. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2023), Oct. 29-Nov. 2, 2023. doi: 10.1115/IMECE2023-111586
- Pancheri, F., Sun, Y., Parhofer, C. A. W., **Rehekampff, C.**, Zhang, D., Lueth, T. C., (2023): Automated Design of Custom Printed Circuit Board Enclosures with Integrated Cooling Capabilities. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2023), Oct. 29-Nov. 2, 2023. doi: 10.1115/IMECE2023-113510
- Zhang, D.; Birner, L.; Zinkernagel, V.; **Rehekampff, C.**; Burschka, D.; Lueth, T. C. (2023, accepted): Carrier Bot: A UWB-Based Human Following Mobile Platform for Intra-Office Transport with an Intuitive Teach-And-Repeat Programming. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2023), December 4-9, 2023, Koh Samui, Thailand
- Kirchebner, B., Weidner, C., Plötz, M., **Rehekampff, C.**, Volk, W., echner, P. (2023): Liquid Metal Jetting of Aluminum Parts with Salt Support Structures. 2023 Internationals Solid Freeform Fabrication Symposium, August 14-16, Austin, Texas, USA.
- Schiele, S., **Rehekampff, C.**, Schroeffler, A., Schweigert, L. & Lueth, T. C., (2022): Automated design of FDM-printable snake-like compliant mechanisms with predefined end-effector poses. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2022), Columbus, OH, USA, Oct. 30 - Nov. 3, 2022.
- Zhang, D.; Pancheri, F.; **Rehekampff, C.**; Sun, Y.; & Lueth, T. C., (2023): Automated Digitization of Three-Dimensional Structures Using AprilTag and Solid Geometry-Library in MATLAB. ASME. J. Comput. Inf. Sci. Eng. August 2023; 23(4): 044503 (Published Online: January 23, 2023). doi:10.1115/1.4056065

-
- Kirchebner, B.; Ploetz, M.; **Rehekampff, C.**; Lechner, P.; Volk, W. (2021): Influence of Salt Support Structures on Material Jetted Aluminum Parts. *Materials* 2021, 14, 4072. doi.org/10.3390/ma14154072
- Kirchebner, B.; **Rehekampff, C.**; Tröndle, M.; Lechner, P.; Volk, W. (2021): Analysis of salts for use as support structure in metal material jetting. *Prod. Eng. Res. Devel.* (2021). doi.org/10.1007/s11740-021-01055-1
- Schroeffler, A.; **Rehekampff, C.**; Lueth, T. C. (2019): An Automated Design Approach for Task-Specific two Finger Grippers for Industrial Applications. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2019)*, Dali, Yunnan, China, December 6-8, 2019.
- Werner, V.; Krumpholz, R.; **Rehekampff, C.**; Scherzer, T.; Eblenkamp, M. (2019): Thermoplastic Encapsulations of a Sensor Platform by High-Temperature Injection Molding up to 360°C. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE* 2019. pp. 1315 - 1331.
- Coemert, S.; Olmeda, M.; Fuckner, J.; **Rehekampff, C.**; Brecht, S. V.; Lueth, T. C. (2018): An Empirically Determined Design Guideline for Rectangular Cross Section Nitinol Flexure Hinges with the Focus on Flexibility-Strength Trade-Off. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Pittsburgh, PA, USA, pp. 1 - 9.
- Werner, V., **Rehekampff, C.**; Dengler, S., Zeppenfeld, M., Eblenkamp, M. (2016): Integration of electronic components into medical plastic parts by injection molding. *BMT 2016 "Dreiländertagung"* Swiss, Austrian and German Societies of Biomedical Engineering.

Betreute studentische Arbeiten

Smialy, S. 2023, Automatic Localization of Speaking Persons through Auditory and Visual Cues, Semesterarbeit, Technische Universität München.

Lode, S. 2022, Untersuchungen zur prozessbegleitenden Geometrievermessung beim Material Jetting von Aluminium, Semesterarbeit, Technische Universität München.

Krebs, F. 2021, Topologieerfassung von additiv gefertigten Aluminiumbauteilen durch einen Konfokalsensor, Bachelorarbeit, Technische Universität München.

Klein, M. 2020, Entwicklung einer Materialzufuhr für einen Hochtemperatur-Druckkopf, Semesterarbeit, Technische Universität München.

Pancheri, F. 2020, Entwicklung eines Messsystems zur Detektion des Füllstands eines Trinkgefäßes, Masterarbeit, Technische Universität München.

Hensgens, V. 2020, Konstruktive Optimierung und Validierung eines Aluminium Tropfenerzeugers mit Fokus auf verringerte Wärmeverluste und Montierbarkeit, Semesterarbeit, Technische Universität München.

Weisbrod, V. 2019, Prozessparameter 3D-Druck PEEK, Semesterarbeit, Technische Universität München.