

# Schlussbericht vom 30.09.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21553N / 1

### Thema

Additive Verarbeitung von Kupferwerkstoffen (Reinkupfer und Bronze) im Verfahren Material Jetting (MJT)

### **Berichtszeitraum**

01.12.2020 - 30.04.2023

### Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.

### Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität München Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen Walther-Meißner-Straße 4 85748 Garching



Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

Inha	Inhaltsverzeichnis		
Zusa	Zusammenfassung		
Summary			
Abbi	ildung	gsverzeichnis	6
Tabe	ellenv	/erzeichnis	8
Abki	ürzun	gsverzeichnis und Formelzeichen	9
1	E	Einleitung	10
2	5	Stand der Technik	12
2.	1 A	Additive Fertigung	12
	2.1.1	Einteilung und Charakteristik	12
	2.1.2	Anwendungen von additiven Fertigungsverfahren	14
	2.1.3	Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren	15
	2.1.4	Material Jetting mit metallischen Werkstoffen	21
2.	2 ł	Kupfer und Kupferlegierungen	24
3	A	Ausgangssituation, Forschungsziel, Vorgehensweise	
3.	1 A	Ausgangssituation	
3.	2 F	Forschungsziel	27
3.	3 \	Vorgehensweise	
4	١	Versuchs- und Messeinrichtungen	31
4.	1 N	MJT Anlage am <i>utg</i>	31
4.2 Digitalmikroskop Keyence VHX-2000			
4.	4.3 Auflichtmikroskop Axioplan 2		
4.	4 ι	Universalprüfmaschine Typ 1484 / DUPS-M	33
4.	5 F	Rasterelektronenmikroskop JSM-7500F	33
5	١	Versuchswerkstoffe	
5.	1 1	Technisch reines Kupfer Cu-ETP	34
5.	2 ł	Kupfer-Zinn-Bronze CuSn8	35
6	٦	Teststand zur Verarbeitung von Kupferwerkstoffen	
6.	1 [	Druckkopf	
	6.1.1	Widerstandsbeheizter Druckkopf ohne Flutung	
	6.1.2	Widerstandsbeheizter Druckkopf mit Flutung	
	6.1.3	Induktiv beheizter Druckkopf mit Flutung	39
	6.1.4	Isoliermaterial	41
6.	2 E	Bauplattform	42
	6.2.1	Konzept zylindrische Heizelemente	44
	6.2.2	Konzept flächiges Heizelement	45
6.	3 5	Sauerstoffsensor	46
7	١	Versuchsplanung und -durchführung	47
7.	1 N	Material für Düse und Tiegel	47
	7.1.1	Düsenmaterial	47
	7.1.2	Tiegelmaterial	

7.2	Tro	pfenerzeugung	49		
7.3	Pro	zessuntersuchung	50		
7.3	3.1	Einfluss der Bauplattform- und Tropfentemperatur	50		
7.3	3.2	Einfluss der Druckfrequenz	53		
8	Erg	ebnisse	55		
8.1	Mat	terial für Düse und Tiegel	55		
8.	1.1	Düsenmaterial	55		
8.1	1.2	Tiegelmaterial	57		
8.1	1.3	Erkenntnisse Düsen- und Tiegelmaterial	59		
8.2	Tro	pfenerzeugung	60		
8.2	2.1	Einfluss von Ventilöffnungszeit und Druckhöhe	60		
8.2	2.2	Weitere Einflussgrößen auf die Tropfenerzeugung	61		
8.2	2.3	Erkenntnisse der Tropfenerzeugung	64		
8.3	Pro	zessuntersuchung	64		
8.3	3.1	Einfluss der Bauplattform- und Tropfentemperatur	65		
8.3	3.2	Einfluss der Druckfrequenz			
8.3	3.3	Erkenntnisse der Prozessuntersuchung			
8.4	Slic	er Software	74		
8.5	Pro	zesssimulation			
9	Zus	sammenfassung und Ausblick			
10	Wis	ssenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse insbesondere für KMU			
Eins	chätz	ung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	79		
11	Ver	wendung der Zuwendungen	81		
Notw	vendig	gkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	81		
12	Pla	n zum Ergebnistransfer	82		
13	Förderhinweis				
14 Lite	raturv	verzeichnis	86		

### Zusammenfassung

Die Verarbeitung von metallischen Werkstoffen mittels Material Jetting (MJT) bietet ein erhebliches Potential zur kostengünstigen Herstellung von endkonturnahen Bauteilen mit komplexer Geometrie. Insbesondere bei der Verarbeitung von Kupferwerkstoffen kann das Verfahren eine potentielle Alternative zu den etablierten pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren darstellen, da kein Laser und pulverförmiges Halbzeug benötigt werden. MJT mit metallischen Werkstoffen bietet potentiell einen geringen Rohstoffverbrauch, vergleichsweise hohe Aufbauraten und es können theoretisch eine Vielzahl an Werkstoffe verarbeitet werden.

Bisherige Untersuchungen beschränken sich jedoch vorrangig auf vergleichsweise niedrig schmelzende Werkstoffe wie Zinn und Aluminium. Um die Menge an Werkstoffen, die mittels MJT verarbeitet werden können, zu erweitern und insbesondere für KMUs nutzbar zu machen, wird in diesem Projekt die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen mittels MJT untersucht.

Im Rahmen des Projekts konnten geeignete Werkstoffe für den Tiegel und die Düse identifiziert werden, welche eine ausreichende chemische und thermische Beständigkeit aufweisen, um damit Tropfen aus Kupfer und Kupferlegierungen erzeugen zu können. Zudem wurden für den Druckkopf und die Bauplattform geeignete Heizkonzepte entwickelt, um die Temperaturen, die für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen benötigt werden, zur Verfügung zu stellen. Mittels Studien konnten geeignete Parameterkombinationen für die Druckhöhe und die Ventilöffnungszeit identifiziert werden, um stabil Tropfen aus Kupferwerkstoffen erzeugen zu können. Dabei konnten die Abhängigkeit der beiden Parameter und die Schwierigkeit einer stabilen Tropfenerzeugung aufgrund der Vielzahl an Einflussparametern gezeigt werden. Durch die Variation der thermischen Prozessparameter Bauplattform- und Tropfentemperatur konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften der gedruckten Bauteile wesentlich von der Höhe der Temperatur der Bauplattform beeinflusst werden. Durch die Erhöhung der thermischen Prozessparameter konnte die Zugfestigkeit der gedruckten Bauteile von 103 MPa auf 330 MPa erhöht werden. Zudem konnte die erreichbare Gleichmaßdehnung von  $A_{\alpha} = 0,5\%$  auf  $A_{\alpha} = 54\%$ gesteigert werden. Es konnte gezeigt werden, dass neben der Tropfen- und der Bauplattformtemperatur eine lokale Anpassung der Substrattemperatur durch die Frequenz der Tropfenablage durchgeführt werden kann. Die experimentellen Untersuchungen wurden durch den Aufbau eines Simulationsmodells des MJT Prozesses mit Kupferwerkstoffen ergänzt. Ebenso erfolgte die Entwicklung eines Slicers mit dem es möglich ist, ausgehend von einer CAD-Datei einen anlagenspezifischen G-Code zu generieren. Dadurch können der manuelle Aufwand und die Zeit von der Konstruktion bis zum fertigen Bauteil reduziert werden.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen mittels MJT prinzipiell möglich ist.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

### Summary

The processing of metallic materials by material jetting (MJT) offers significant potential for the cost-effective production of near-net-shape components with complex geometries. Particularly when processing copper materials, the process can offer a potential alternative to established powder bed-based additive manufacturing processes such as selective laser melting or selective laser sintering, since no laser and powdered semi-finished product are required. MJT with metallic materials potentially offers low raw material consumption, comparatively high build rates, and a wide range of materials can theoretically be processed with it.

However, previous investigations have been limited primarily to comparatively low-melting materials such as tin and aluminum. In order to expand the range of materials that can be processed using MJT and to make it useful for SMEs in particular, the processing of copper materials using MJT was investigated in this work.

Within the scope of the project, suitable materials for the crucible and the nozzle were identified which have sufficient chemical and thermal resistance to be able to produce copper and copper alloy droplets. In addition, suitable heating concepts were developed for the print head and the build platform in order to provide the temperatures required for processing copper materials. By means of parameter studies, suitable parameter combinations for the pressure and the valve opening time were identified in order to be able to stably produce gobs from copper materials. The dependence of the two parameters and the difficulty of stable droplet generation due to the large number of influencing parameters were demonstrated. By varying the thermal process parameters of build platform temperature and droplet temperature, it could be shown that the properties of the printed components are significantly influenced by the level of build platform temperature. By increasing the thermal process parameters, the tensile strength of the printed components could be increased from 103 MPa to 330 MPa. By increasing the thermal process variables, it was also possible to increase the uniform strain from Ag = 0.5% to Ag = 54%. It was shown that, in addition to the droplet and build platform temperatures, a local adjustment of the substrate temperature can be adapted by the frequency of droplet deposition. The experimental investigations were complemented by the construction of a simulation model of the MJT process with copper materials. Likewise, a slicer was developed with which it is possible to generate a plant-specific G-code from a CAD file. This allows the manual effort and thus the time from component design to the finished component to be reduced.

The investigations carried out showed that the processing of copper materials by using MJT is possible in principle.

The research objective was achieved.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Eingliederung der additiven Fertigung nach DIN 8580 (2022)	12
Abbildung 2 2: Elliptic del additivon Eartigung nach Cabberdt (2016)	12
Abbildung 2.22. Finizip der additvert Ferigung nach Gebrardt (2010)	13
Abbildung 2-3. Abhangigkeit der Hersteinungskosten von der Bauteikomprexität bei der konventionellen	14
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des BJT Verrahrens nach DIN EN ISO 1/296-2 (2016)	15
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des DED Verfahrens nach DIN EN ISO 1/296-2 (2016)	16
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des MEX Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016)	17
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des MJT Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016)	18
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung des PBF Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016)	19
Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des SHL Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016)	20
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des VPP Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016)	21
Abbildung 2-11: Schematische Darstellung eines kontinuierlichen Tropfenerzeugers nach Himmel (2020).	22
Abbildung 2-12: Schematische Darstellung von DOD Tropfenerzeugern nach Himmel (2020)	23
Abbildung 2-13: Phasendiagramm Kunfer-Zinn aus Deutsches Kunferinstitut (2004)	24
Abbildung 2-12 Potentiale des MIT Prozesses	26
Abbildung 2.2. Zusamenhang der Arbeitsnakote. Die Bearbeitung des Earschungsverhabens erfolgt anband v	20
Abbildung 9-2. Zusammerinang der Albeitspakete. Die Dealbeitung des Forschungsvornabens endigt annahu v	201
Sectis inflatuicit duellialider abgestimmer Albeitspakete.	20
Abbildung 4-1: MJ I Prutstand am utg inklusive beneizter Bauplattform und Druckkopa.	31
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des MJT Prufstands nach Ploetz et al. (2023).	32
Abbildung 6-1: Widerstandbeheizter Druckkopt ohne Flutung	36
Abbildung 6-2: CAD Darstellung des Widerstandsbeheizten Druckkopfs im Schnitt. Die Anschlüsse der Heizeleme	nte
und die Leitungen für den Druckstoß sind zur besseren Ubersicht nicht dargestellt	37
Abbildung 6-3: Widerstandsbeheizter Druckkopf mit Flutung.	38
Abbildung 6-4: Schnittdarstellung des widerstandsbeheizten Druckkopfs mit Flutung.	38
Abbildung 6-5: Kühlkanal im Kopfteil des Druckkopfs zur Kühlung der Heizelementanschlüsse und zum vorheizen o	des
Stickstoffs	39
Abbildung 6-6: Induktiv beheizter Druckkopf	40
Abbildung 6-7: Schnittdarstellung des induktiv beheizten Druckkopfs	40
Abhildung 6-8: Aufarund von Rissen zerstörtes Bauteil aus Kalziumsilikat	41
Abhildung 6-9: Angenasste Konfolatte des induktivbeheizten Druckkonfs aus Siliziumnitrid und Kalziumsilikat	42
Abbildung 6-10. Schemstische Darteillung der entwickelten und gefertigten Bauditformen	12
Abbildung 6 11. CAD Darstellung der entwickelten Bauplattform mit zulindrischen Heizelementen	11
Abbildung 6 11: CAD-Datsteinung der entwickeiten Dauplationn mit zymunschieft netzelententent.	44
Abbildung 6 12. Dauplation mit zymonschen heizelennen ein matigeneizen zustand.	40
Abbildung C 10. CAD Datsteinung der erftwickeiten Dauplattionn mit nachigen Reizeitenent.	40
Abbildung 6-14: Bauplattion mit keramischem Heizelement im aufgeneizten Zustand.	40
Abbildung 7-1: Untersuchte Dusen aus verschiedenen werkstoffen.	47
Abblidung 7-2: Untersuchte Tiegel aus verschiedenen werkstoffen.	48
Abbildung 7-3: Schematische Darstellung des Versuchsstands zur Bewertung der Troptenerzeugung.	49
Abbildung 7-4: Probengeometrie und Druckstrategie.	50
Abbildung 7-5: Vorgehen und verwendete Untersuchungsmethoden	51
Abbildung 7-6: Vorgehen bei der Probenpräparation.	52
Abbildung 8-1: Graphitdüsen links im Neuzustand, mittig nach 6 Stunden Einsatzzeit ohne Flutung und rechts nach	20
Stunden Einsatzzeit mit Flutung des Druckkopfs	57
Abbildung 8-2: Tiegel aus Magnesium stabilisiertem Zirkonoxid vor und nach der Versuchsdurchführung	57
Abbildung 8-3: Tiegel aus elektrisch leitfähigem Siliziumnitrid vor und nach der Versuchsdurchführung	58
Abbildung 8-4: Tiegel aus Graphit vor und nach der Versuchsdurchführung mit und ohne Flutung des Druckkopfs	59
Abbildung 8-5: Stabile Tropfenerzeugung in Abhängigkeit von Druckhöhe und Ventilöffnungszeit	60
Abbildung 8-6: Berechneter Tropfendurchmesser in Abhängigkeit der Ventilöffnungszeit.	61
Abbildung 8-7: Stabile Tropfenerzeugung: Vergleich einer Düse aus Graphit und Standard Siliziumpitrid	63
Abbildung 8-8: Ontische Untersuchung der Bauteiloberfläche nach Ploetz et al. (2023)	65
Abbildung 8-0: Optione Children in Abbildung der unterruchten Parameter nach Plaetz et al. (2023)	65
Abbildung 8 40. Vordelsh der Buteilehoffischer geb Dietz et al. (2023)	66
Abbildung 8 11. Ermittelte relative Pourieldighte in Abbildung 8 11. Ermittelte relative Pourieldighte in Abbildung 8 11.	200
Abbildung 6-11. Emiliteite felative Bautelidichte in Abhangigkeit der untersuchten Farameter hach Floeiz et al. (202	.S).
Abbildung 8 12: Workstoffgofügo dar bai variiartan Tamparaturan bargastalltan Bautaila pash Blasta at al. (2022)	0/ 60
Abbildung 6-12. Werkstongeruge der bei vanierten Temperaturen nergesteilten Bauteile hach Pibetz et al. (2023).	00
Abbildung o-13. Komgroisennummer G in Abhangigkeit der Untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (2023)	00
Abblidung 8-14: vergleich von Gussgefuge und rekristallisiertem Gefüge nach Ploetz et al. (2023).	69
Abbildung 8-15: Ermittelte Zugtestigkeit in Abhängigkeit der untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (2023)	70
Abbildung 8-16: Ermittelte Gleichmaßdehnung in Abhängigkeit der untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (202	23).
	70
Abbildung 8-17: REM Aufnahme der Bruchflächen in Abhängigkeit der Bauplattformtemperatur nach Ploetz et	10
	al.
(2023)	al. 71
(2023) Abbildung 8-18: REM Aufnahme der Bruchflächen in Abhängigkeit der Tropfentemperatur nach Ploetz et al. (202	al. 71 3).
(2023). Abbildung 8-18: REM Aufnahme der Bruchflächen in Abhängigkeit der Tropfentemperatur nach Ploetz et al. (202	al. 71 23). 72

Abbildung 8-20: Gegenüberstellung der Höhe von säulenförmigen Bauteilen für variierte Druckfrequenzen	und
Bauplattformtemperaturen	73
Abbildung 8-21: Mittels MJT hergestellte Bauteile aus Kupfer und Kupfer-Zinn-Bronze.	74
Abbildung 8-22: Ablauf bei der Erstellung des anlagenspezifischen G-Codes auf Basis von CAD-Daten	74
Abbildung 8-23: Temperaturverteilung während der Herstellung eines Bauteils.	75
Abbildung 8-24: Versuch zur Messung der Temperatur eines Tropfens während der Erstarrung mittels Thermoeler	nent.
	76

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Technische Daten der MJT Anlage am Lehrstuhl utg.	31			
Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs Cu-ETP nach DIN CEN/TS 13388 (2015)	34			
Tabelle 5-2: Physikalische Eigenschaften des Kupferwerkstoffs Cu-ETP nach Wieland-Werke AG (2021b)	34			
Tabelle 5-3: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs CuSn8 nach DIN CEN/TS 13388 (2015)	35			
Tabelle 5-4: Physikalische Eigenschaften des Kupferwerkstoffs Cu-ETP Wieland-Werke AG (2021a)	35			
Tabelle 7-1: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Tropfen-	und			
Bauplattformtemperatur	51			
Tabelle 7-2: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Druckfrequenz	54			
Tabelle 8-1: Untersuchte Düsen im Neuzustand, nach der Versuchsdurchführung und nach der Reinigung55				
Tabelle 12-1: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Druckfrequenz	82			
Tabelle 12-2: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Druckfrequenz	83			

# Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

### Abkürzungsverzeichnis

AiF	Industrielle Forschungsvereinigung
AP	Arbeitspaket
AM	Additive Manufacturing
ASTM	Internationale Standardisierungsorganisation
BJT	Binder Jetting
CAD	Computer Aided Design
DED	Direct Energy Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoD	Drop-on-Demand
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente Methode
HMI	Human Machine Interface
ISO	Internationale Organisation für Normung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MEX	Material Extrusion
MJT	Material Jetting
PbA	Projektbegleitender Ausschuss
PBF	Powder Bed Fusion
PM	Personenmonate
REM	Rasterelektronenmikroskop
SHL	Sheet Lamination
SLM	Selektives Laser Schmelzen
SLS	Selektives Laser Sintern
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TUM	Technische Universität München
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPP	Vat Photopolymerization
utg	Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen

### Formelzeichen

Ag	[%]	Gleichmaßdehnung
<b>C</b> O2	[ppm]	Restsauerstoffgehalt
<b>d</b> <sub>Tropfen</sub>	[mm]	Tropfendurchmesser
f	[Hz]	Druckfrequenz
G	[-]	Korngrößenzahl
n	[-]	Probenanzahl
R <sub>m</sub>	MPa	Zugfestigkeit
$T_{Tropfen}$	[°C]	Tropfentemperatur
T <sub>Plattform</sub>	[°C]	Plattformtemperatur

# **1 Einleitung**

Kupferwerkstoffe werden bereits seit Jahrtausenden von Menschen genutzt. Durch die umfangreiche Nutzung wird sogar die Zeit ab dem 5. Jahrtausend v. Chr. bis zum 3. Jahrtausend v. Chr. als Kupferzeit bezeichnet (Sicius 2017). Aufgrund der hervorragenden elektrischen und thermischen Leitfähigkeit besitzen Kupferwerkstoffe auch in der modernen Welt weiterhin eine hohe industrielle Relevanz. Insbesondere im Hinblick auf die Transformation von fossilen Energieträgern hin zu regenerativen Energiequellen wird mit einer kontinuierlich steigenden Nachfrage nach Kupferwerkstoffen gerechnet.

Für den Bau von Windkraftanlagen werden im Jahr 2040 voraussichtlich 317.00 Tonnen Kupfer benötigt. Das entspricht einem Anstieg von mehr als 300 % im Vergleich zum Jahr 2018. Auch im Bereich des Ausbaus von Stromnetzen wird mit einer Zunahme des Bedarfs um knapp 2 Mio. Tonnen auf eine Gesamtmenge von 5.759.000 Tonnen im Jahr 2040 gerechnet. Der größte prozentuale Anstieg des Bedarfs an Kupferwerkstoffen wird im Bereich der Elektrifizierung von Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge prognostiziert. Der Bedarf soll von 33.200 Tonnen im Jahr 2018 auf 816.000 Tonnen im Jahr 2040 steigen. (Marscheider-Weidemann 2021)

Aufgrund der vielfachen zukünftigen Anwendungen wird Kupfer deshalb häufig auch als das Metall der Energiewende bezeichnet (Deutsches Kupferinstitut 2023).

Werden Bauteile mit besonders hohen Anforderungen an die geometrische Komplexität und/oder in geringer Stückzahl benötigt, können diese oftmals nicht wirtschaftlich durch herkömmliche Fertigungsverfahren hergestellt werden. Additive Fertigungsverfahren haben sich in den letzten Jahren von einer Nischentechnologie zu etablierten Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit komplexer Geometrie entwickelt. Die Verwendung von additiv gefertigten Bauteilen reicht vom Maschinen- und Anlagenbau über die Medizintechnik bis hin zu Anwendungen für die Luftfahrt. Derzeit sind insbesondere Verfahren, die nach DIN EN ISO 17296-2:2016 dem pulverbettbasierten Schmelzen (Powder Bed Fusion) zugeordnet werden, zur Herstellung von metallischen Bauteilen verbreitet. Hierzu zählen unter anderem das Selektive Lasersintern (SLS) und das Selektive Laserschmelzen (SLM). Bei diesen Verfahren wird ein pulverförmiges Halbzeug unter Verwendung eines Lasers lokal aufgeschmolzen und durch das anschließende Erstarren des Werkstoffs ein lokaler Materialzusammenhalt geschaffen. Die Verarbeitung von Kupfer, das vor allem wegen seiner thermischen und elektrischen Eigenschaften Anwendung findet, erweist sich mit den derzeit etablierten Verfahren oftmals als schwierig. Technisch reines Kupfer besitzt gegenüber den derzeit vielfach eingesetzten Laserquellen, deren Spektrum zumeist im infraroten Bereich liegt, nur ein geringes Absorptionsvermögen. Zudem erschwert die hohe thermische Leitfähigkeit des Werkstoffs das lokale Einbringen von Energie und damit das lokale Verschmelzen des Werkstoffs. Mögliche Alternativen sind die Verwendung von Lasern, deren Spektrum in einem Bereich liegt, welches von dem Kupferwerkstoff besser absorbiert werden kann oder die Verwendung von Elektronenstrahlen als Energiequelle. Bei diesen Verfahren entstehen jedoch weiterhin hohe Kosten für die Anlage und das pulverförmige Halbzeug. Der MJT Prozess, der ohne pulverförmiges Halbzeug und Laser oder Elektronenstrahl auskommt, bietet eine potentielle Alternative zur additiven Herstellung von Bauteilen aus Kupferwerkstoffen. Beim MJT Prozess wird ein vergleichsweise günstiges Halbzeug, zumeist ein Draht mittels eines Druckkopfs aufgeschmolzen und tropfenweise auf eine Bauplattform aufgebracht, wo die Tropfen erstarren. Durch das sukzessive Hinzufügen von Tropfen kann schichtweise ein dreidimensionales Bauteil aufgebaut werden.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung der additiven Verarbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen mittels MJT. Hierzu wurde ein System bestehend aus einem Hochtemperaturdruckkopf und einer beheizten Bauplattform entwickelt und in die am Lehrstuhl

*utg* vorhandene MJT Anlage integriert. Mit dem aufgebauten System wurden Probekörper hergestellt, um den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die gedruckten Bauteile bewerten zu können. Die Bewertung der Bauteile erfolgte mittels optischer und mechanischer Untersuchungsmethoden. Zudem wurde der Prozess der Tropfenerzeugung durch High-Speed-Kamera Aufnahmen untersucht. Neben den praktischen Untersuchungen erfolgte eine virtuelle Abbildung des MJT Prozesses mittels Simulation um die thermischen Verhältnisse während er Tropfenablage zu untersuchen. Zur schnelleren Erzeugung von anlagenspezifischen Steuerungsdaten, welche für die Herstellung von Bauteilen benötigt werden, wurde ein Slicer entwickelt. Mittels des Slicers kann aus CAD Daten ein für die Anlage verständlicher G-Code generiert und damit die Zeit von der Konstruktion bis zum fertigen Bauteil verkürzt werden.

# 2 Stand der Technik

### **2.1 Additive Fertigung**

### 2.1.1 Einteilung und Charakteristik

Die DIN 8580 (2022) gliedert Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen ein. Die additive Fertigung – im englischen als Additive Manufacturing (AM) bezeichnet - wird dabei der ersten Hauptgruppe dem Urformen zugeordnet. Urformen ist definiert als die Fertigung eines festen Körpers aus formlosen Stoff durch die Schaffung eines Zusammenhalts. Abbildung 2-1 zeigt die Eingliederung der additiven Fertigung nach der DIN 8580 (2022). Die Gruppe "Urformen durch additive Fertigung" unterscheidet sieben Untergruppen, welche in Kapitel 2.1.2 näher beschrieben werden. Die Untergruppen sind dabei analog der Begriffsbestimmungen in DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03 bezeichnet. Da es sich bei dem Verfahren Schichtlaminierung um eine Verfahrenskombination handelt, wird diese Untergruppe in der Einteilung nach DIN 8580 (2022) aufgeführt, aber nicht vergeben.



Abbildung 2-1: Eingliederung der additiven Fertigung nach DIN 8580 (2022).

Eine weitere Einteilung der Fertigungsverfahren, welche insbesondere im englischsprachigen Raum verwendet wird, kann nach Gebhardt (2016) vorgenommen werden. Hierbei werden drei Grundprinzipien (formativ, subtraktiv, additiv) unterschieden, mittels denen die Gestalt eines Bauteils verändert werden kann. Formative Fertigungsverfahren erzeugen die gewünschte Bauteilgeometrie durch Umformen einer vorgegebenen Geometrie. Das zu Beginn vorhandene Volumen bleibt dabei konstant und wird weder abgetragen noch hinzugefügt. Bei subtraktiven Fertigungsverfahren wird Material von einem Halbzeug entfernt, wobei sich das Werkstückvolumen während der Bearbeitung reduziert. Die additiven Fertigungsverfahren bauen ein Bauteil durch das Verbinden von Volumenelementen, auch Voxel (Volumetric Pixel) genannt auf und vergrößern dabei sukzessive das Werkstückvolumen. (Gebhardt 2016) Nach VDI 3405 (2014) wird ein additives Fertigungsverfahren als "Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird", definiert (VDI 3405 2014). Zur Fertigung sind keine Formen oder spezielle Werkzeuge nötig. Häufig sind jedoch noch nachgelagerte Prozessschritte notwendig. Zumeist müssen Restwerkstoff und/oder Stützstrukturen entfernt, Funktionsflächen spanend nachbearbeitet oder eine Wärmebehandlung zur Einstellung der Werkstoffeigenschaften durchgeführt werden. (DIN EN ISO 17296-2 2016)

Die Grundlage für die Herstellung von Bauteilen mittels AM ist das Schichtbauverfahren. Die zu erzeugende dreidimensionale Geometrie wird dazu in mehrere zweidimensionale Geometrien unterteilt. Die Schichthöhe ist dabei abhängig vom gewählten additiven Fertigungsverfahren, dem zu verarbeitenden Baumaterial und den gewählten Prozessparametern. Ausgangspunkt für die Schichterzeugung (engl. "Slicing") ist ein digitales Modell. Abbildung 2-2 veranschaulicht dieses Vorgehen. Die Schichterzeugung erfolgt auf Basis von mathematischen Methoden. Die im Rahmen der Schichterzeugung generierten Daten werden an die Maschine übermittelt, welche Schicht für Schicht das Bauteil erzeugt. (Gebhardt 2016)



Abbildung 2-2: Prinzip der additiven Fertigung nach Gebhardt (2016).

Zur additiven Herstellung von Bauteilen sind nach VDI 3405 (2014) im Wesentlichen die drei nachfolgend dargestellten Prozesse nötig. Neben dem In-Prozess, bei dem der tatsächliche schichtweise Aufbau des Bauteils erfolgt, sind in der Regel ein Prä- und Post-Prozess nötig.

- Prä-Prozess: Dieser Prozess umfasst alle erforderlichen Schritte, die unternommen werden müssen, bevor ein Bauteil additiv gefertigt werden kann. Hierzu gehört die Datenverarbeitung, das Erzeugen von Stütz- und Hilfsstrukturen, die Anordnung der Bauteile im Bauraum und die Generierung der Schichtdaten. Auch die Befüllung der Anlage mit Baumaterial gehört zum Prä-Prozess.
- In-Prozess: Der In-Prozess umfasst alle Fertigungsoperationen, die von der Anlage ausgeführt werden müssen und aus dem Prä-Prozess resultieren. Zentrale Aufgabe ist der schichtweise Aufbau des Bauteils. Des Weiteren sind das Entpacken und Entnehmen des Bauteils Teil des In-Prozesses.
- **Post-Prozess:** Unter den Post-Prozess fallen alle Arbeitsschritte, die nach der Entnahme des Bauteils aus der Fertigungsanlage notwendig sind, um eine Verwendung möglich zu machen. Dazu zählen Tätigkeiten wie das Entfernen der Stützstruktur und der

Pulverreste, die Vermessung und die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften, und Schritte zur Herstellung der technologisch erreichbaren Bauteileigenschaften.

#### 2.1.2 Anwendungen von additiven Fertigungsverfahren

Durch den schichtweisen Aufbau besitzen additive Fertigungsverfahren einige vorteilhafte Eigenschaften gegenüber herkömmlichen Verfahren.

Um Bauteile herzustellen, werden keine speziellen Werkzeuge, Formen oder Vorrichtungen benötigt, wodurch auch geringe Stückzahlen wirtschaftlich hergestellt werden können. Zudem werden dadurch eine schnellere Anpassung der Konstruktion und die Herstellung von individuellen kundenspezifischen Produkten möglich. (Breuninger 2013)

Bei der Herstellung von Bauteilen mittels additiver Fertigungsverfahren wird im Vergleich zu subtraktiven Verfahren weniger Rohmaterial benötigt, da Material nur dort aufgebaut wird, wo es für das Bauteil benötigt wird (Schulte et al. 2020). Der wesentliche Vorteil, warum additive Fertigungsverfahren zunehmend Anwendung finden, liegt in der hohen Gestaltungsfreiheit. Durch den schichtweisen Aufbau können Bauteile gefertigt werden, welche mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur unter hohem Aufwand herstellbar sind. Abbildung 2-3 veranschaulicht den Zusammenhang der Kosten und der Bauteilkomplexität für additive und konventionelle Fertigungsverfahren.



Abbildung 2-3:Abhängigkeit der Herstellungskosten von der Bauteilkomplexität bei der konventionellen und additiven Fertigung nach Zäh (2006).

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung von Bauteilen, die hinsichtlich Gewicht und/oder Belastung optimiert sind. An dieser Stelle sei angemerkt, dass auch additive Verfahren Restriktionen unterliegen, d.h. es können nicht beliebige Geometrien hergestellt werden (Zäh 2006).

### 2.1.3 Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren

Gemäß DIN EN ISO 17296-2 (2016) können additive Fertigungsverfahren in sieben Prozesskategorien eingeteilt werden. Diese werden im Folgenden beschrieben. Als Abkürzung für die Verfahren werden jeweils drei Buchstaben verwendet.

#### Freistrahl-Bindemittelauftrag (binder jetting, BJT)

Binder Jetting (BJT) ist ein ursprünglich am Massachusetts Institute of Technology entwickeltes AM Verfahren. Zu Beginn wurde dieses Verfahren als "3D-Printing" bezeichnet (Wohlers et al. 2019). Beim BJT wird mittels eines beweglichen Druckkopfs lokal ein Bindemittel in ein nivelliertes Pulverbett eingebracht. Durch das Schaffen eines lokalen Zusammenhalts kann schichtweise ein Bauteil aufgebaut werden. Der Prozess des BJT erfolgt im Wesentlichen in drei bzw. vier Schritten. Zu Beginn wird eine Schicht des pulverförmigen Halbzeugs, welches das Baumaterial darstellt, aufgebracht. Die aufgebrachte Schicht wird nivelliert und mit Bindemittel bedruckt. Die Dosierung des Bindemittels erfolgt über im Druckkopf verbaute Düsen. Durch das Bindemittel wird der pulverförmige Werkstoff lokal miteinander verbunden, wodurch eine Schicht eines Bauteils aufgebaut wird. Im dritten Schritt des Prozesses erfolgt das Absenken der Bauplattform. Die Schritte eins bis drei werden fortlaufend wiederholt, bis das Bauteil fertig gedruckt ist. Nach dem Druckvorgang wird das Bauteil vom losen Pulver getrennt. Bei metallischen Bauteilen erfolgt oftmals noch ein weiterer Schritt zur Anpassung der Bauteileigenschaften. Dieser vierte Schritt kann beispielsweise einen Sinter- oder heißisostatischen Pressvorgang beinhalten. Im BJT Prozess hergestellte Metallbauteile werden teilweise auch mit einem weiteren metallischen Werkstoff infiltriert, um die Bauteildichte zu erhöhen. (Gibson 2021) In Abbildung 2-4 ist der BJT Prozess schematisch dargestellt.



- 1 Pulverbeschickungssystem
- 2 Pulverwerkstoff verteilt in einem Pulverbett
- 3 flüssiges Bindemittel
- 4 Dosiereinrichtung einschließlich Verbindung zum Beschickungssystem des Bindemittels
- 5 Pulverstreuvorrichtung
- 6 Bauplattform und Aufzug
- 7 Produkt

#### Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des BJT Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016).

In diversen Arbeiten wurde die Verarbeitung von verschiedenen Werkstoffen wie Polymeren, Metallen und Keramiken durch BJT demonstriert. Die Verarbeitung von Kupfer wurde von Bai und Williams (2015) untersucht. Durch die Identifikation einer geeigneten Parameterkombination konnten Bauteile mit einer Dichte von 85 % und einer Reinheit von 97 % hergestellt werden. Durch die Kombination des BJT mit einem anschließenden heißisostatischen Pressvorgang konnten Yegyan Kumar et al. (2019) Bauteile aus Reinkupfer mit einer Dichte von 97 % fertigen. Die Bauteile wiesen eine Festigkeit von 80 % des Grundwerkstoffs auf.

#### Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (direct energy deposition, DED)

Beim Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DED) wird fokussierte Wärmeenergie verwendet, um den Bauwerkstoff während des Absetzens aufzuschmelzen und dadurch zu einem Bauteil zu verbinden. Als Energiequellen kommen Laser, Elektronenstrahlung oder Plasma zur Anwendung. Das Baumaterial liegt üblicherweise als Draht oder in Form von Pulver vor. An der Stelle, an der der Bauwerkstoff aufgebracht werden soll, wird das Substrat durch die Wärmequelle lokal aufgeschmolzen. Das Baumaterial wird dem Schmelzbad zugeführt und ebenfalls durch die eingebrachte Wärmeenergie aufgeschmolzen. Das aufgeschmolzene Material erstarrt und bildet so einen Teil des herzustellenden Bauteils. Durch die Bewegung des Bauteils bzw. des Bereichs der fokussierten Wärmezufuhr wird eine Linie innerhalb einer Schicht hergestellt. (Wohlers et al. 2019)

Der DED Prozess ist schematisch in Abbildung 2-5 dargestellt.



Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des DED Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016).

Mittels DED können unterschiedliche Materialien verarbeitet werden. Hierzu zählen Polymere, keramische und metallische Werkstoffe. Da der DED Prozess insbesondere mit metallischen Pulvern Anwendung findet wird der DED oftmals auch als "metal deposition" Technologie bezeichnet (Gibson 2021). Ein wesentlicher Unterschied im Vergleich zu pulverbettbasierten Verfahren basiert darin, dass beim DED der Werkstoff nicht in Schichten aufgebracht, sondern dem Prozess kontinuierlich zugeführt wird.

Veröffentlichungen bezüglich der Verarbeitung von Kupfer stammen unter anderen von Dong et al. (2017), Onuike et al. (2018) und Liu et al. (2023). Die Verarbeitung einer Kupfer-Aluminium-Legierung mit drahtförmigem Halbzeug wurde von Dong et al. (2017) gezeigt. Die Besonderheit bei der Herstellung der Versuchskörper lag darin, dass die Legierung erst während der Ablage des Baumaterials gebildet wurde. Hierfür wurden ein Kupfer- und ein Aluminiumdraht mittels eines WIG-Schweißbrenners aufgeschmolzen und auf eine Kupferplatte abgelegt. Onuike et al. (2018) verwendeten den Laser-Engineered-Net-Shape-Prozess (LENS<sup>TM</sup>) zur Herstellung eines Inconel 718-Kupfer-Bimetallbauteils. Dabei wurde ein pulverförmiges Halbzeug verwendet, welches mittels Laserstrahlung aufgeschmolzen wurde. Bauteile aus reinem Kupfer stellten Liu et al. (2023) her. Unter Verwendung eines blauen Lasers konnten würfelförmige Bauteile mit einer Kantenlänge von 10 mm x 10 mm x 10 mm und 20 mm x 20 mm x 20 mm hergestellt werden. Bei den Würfeln mit der kleineren Kantenlänge konnten relative Bauteildichten von 99,6 % erreicht werden.

#### Material Extrusion (material extrusion, MEX)

Die Material Extrusions (MEX) Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass das Baumaterial durch das gezielte Dosieren mittels einer Düse aufgebracht wird. MEX Verfahren sind vor allem unter der geschützten Herstellerbezeichnung Fused Deposition Modelling (FDM<sup>®</sup>) bekannt. Weitere Bezeichnungen lauten Fused Filament Fabrication und Fused Layer Modelling. (Gebhardt 2016; Maniruzzaman 2019)

Als Halbzeug zur Herstellung von Bauteilen mittels MEX dienen Filamente, Granulate oder Pasten. Die Bauwerkstoffe werden in einem Druckkopf zumeist thermisch oder chemisch aktiviert und durch eine Düse gepresst. Während der Extrusion befindet sich das Baumaterial in einem halbflüssigen Zustand. Durch die Bewegung des Druckkopfs und/oder der Bauplattform können einzelne Bahnen des Werkstoffs erzeugt werden. Der ausgegebene Werkstoff verfestigt, wodurch die Bauteilgeometrie sukzessive erzeugt wird. (Gibson 2021)

Eine schematische Darstellung des Prozesses findet sich in Abbildung 2-6.



Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des MEX Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016).

Zur Herstellung von metallischen Bauteilen mittels MEX sind spezielle Filamente nötig, die den späteren metallischen Werkstoff beinhalten. Die additive Fertigung von metallischen Bauteilen erfolgt in vier Schritten. In einem ersten Schritt erfolgt die Herstellung des metallischen Pulvers, welches im Anschluss zu einem metallpulvergefüllten Kunststoff-Filament weiterverarbeitet wird. Im dritten Schritt erfolgt der eigentliche Druckprozess, in dem das Bauteil schichtweise aufgebaut wird. Nach der additiven Fertigung werden die Bauteile in der Regel gesintert, um die vorhandene Porosität zur verringern. Infolge der zusätzlichen Prozessschritte und der dafür benötigten Anlagen sind die Investitions- und Betriebskosten zur Herstellung von metallischen Bauteilen mittels MEX im Vergleich zu Bauteilen aus Kunststoff höher.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen zur Verarbeitung von metallpulvergefülltem Kunststofffilament veröffentlicht. Die thermische Leitfähigkeit von im MEX Verfahren hergestellten Kupferbauteilen wurde von Dehdari Ebrahimi und Ju (2018) untersucht. Durch einen Sintervorgang konnte die Wärmeleitfähigkeit der hergestellten Bauteile deutlich verbessert werden. Mohammadizadeh et al. (2020) stellten Bauteile aus Kupfer mittels MEX her. Nach einem Sintervorgang erreichten die hergestellten Bauteile eine ähnliche maximale Zugfestigkeit und ein Elastizitätsmodul wie geglühtes Kupfer.

#### Freistrahl-Materialauftrag (material jetting, MJT)

Der Freistrahl-Materialauftrag (MJT) ist ein additives Fertigungsverfahren, das Bauteile ohne die Verwendung von pulverförmigen Halbzeug oder Laserquellen herstellen kann. Bauteile werden Schicht für Schicht, wobei eine Schicht aus einzelnen Tropfen besteht, erzeugt. Die von einem Druckkopf erzeugten Tropfen werden auf einer Bauplattform abgelegt und durch eine chemische Reaktion oder die Erstarrung der Tropfen verfestigt. Das sukzessive Hinzufügen von Tropfen ermöglicht die Herstellung von Bauteilen. (Wohlers et al. 2019; Gibson 2021) Der Prozess des MJT ist in Abbildung 2-7 dargestellt.



- 1 Ausgangswerkstoff-Beschickungssystem für den Aufbau- und Stützwerkstoff (optional in Abhängigkeit des spezifischen Prozesses)
- 2 Dosiereinrichtung (Lichtstrahlung oder thermische Quelle)
- 3 Tröpfchen des Aufbauwerkstoffs
- 4 Stützkonstruktion
- 5 Bauplattform und Aufzug
- 6 Produkt

Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des MJT Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016).

MJT ist ein etablierter Prozess bei der Verarbeitung von Polymeren. In Bezug auf Präzision und Oberflächenqualität übertrifft der MJT Prozess bei der Verarbeitung von Polymeren oftmals andere Verfahren wie MEX, BJT und PBF (Mohan et al. 2020). Die Verarbeitung von höher schmelzenden Werkstoffen wie Metallen ist in den letzten Jahren in den Fokus von Forschung und Industrie gerückt (Ansell 2021). Eine Beschreibung der Verarbeitung von Metallen mittels MJT erfolgt in Kapitel 2.1.4.

#### Pulverbettbasiertes Schmelzen (powder bed fusion, PBF)

Verfahren, die dem pulverbettbasierten Schmelzen (PBF) zugeordnet werden, nutzen thermische Energie, um gezielt Partikel aneinanderzubinden. Der Zusammenhalt wird dabei anders wie beim BJT ohne zusätzlich eingebrachten Binder erreicht. In einem ersten Schritt erfolgt der Auftrag einer Pulverschicht, die wie beim BJT nivelliert wird. Im Anschluss erfolgt die lokale Belichtung des Pulvers, wodurch einzelne Partikel aneinandergebunden werden. Als Belichtungsquellen kommen Laserstrahlen, Elektronenstrahlen oder infrarote Flächenstrahlung zur Anwendung. Nach der Erzeugung einer Schicht wird die Bauplattform abgesenkt und eine neue Schicht des pulverförmigen Halbzeugs aufgebracht. Wichtige Vertreter des PBF sind das selektive Laserschmelzen (SLM) und das selektive Lasersintern (SLS). Beim SLM wird das pulverförmige Halbzeug lokal aufgeschmolzen. Im Vergleich dazu erfolgt beim SLS lediglich ein anschmelzen des Pulvers. (Wohlers et al. 2019)

Abbildung 2-8 zeigt eine schematische Darstellung des PBF Verfahrens.



#### Abbildung 2-8: Schematische Darstellung des PBF Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016).

Im PBF Verfahren können grundsätzlich eine Vielzahl an Werkstoffe verarbeitet werden. Hierzu zählen unter anderen thermoplastische Polymere, reine Metalle, Metalllegierungen oder verschiedene keramische Werkstoffe. Bei PBF Verfahren handelt es sich um die mit als erstes kommerziell genutzten AM Verfahren (Gibson 2021). Zudem handelt es sich bei pulverbettbasierten Verfahren derzeit um die mit am weitesten verbreiteten additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von metallischen Bauteilen. Auch bei der Verarbeitung von Kupferwerkstoffen dominieren derzeit pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren (Jiang et al. 2021). Untersuchungen zum Einfluss der Partikelgröße des Pulvers bei der Herstellung von

Bauteilen aus reinem Kupfer mittels SLM wurden von Sinico et al. (2019) durchgeführt. Durch die Verwendung eines feinen Pulvers, bei dem 20 vol% des Halbzeugs einen Durchmesser von 15 µm aufwiesen, konnten Bauteile mit einer relativen Dichte von mehr als 98 % bei verhältnismäßig geringer Laserleistung hergestellt werden.

#### Schichtlaminierung (sheet lamination, SHL)

Bei der Schichtlaminierung (SHL) handelt es sich um einen additiven Fertigungsprozess, bei dem dünne Schichten des Baumaterials üblicherweise Papier, Metall, Polymere- oder Verbundfolien zusammengefügt werden. Die Schichten werden vor oder nach dem Zusammenfügen auf die entsprechende Geometrie des Bauteils zugeschnitten. Hierbei kommen Laser, Messer, Heißdrähte oder Fräser zum Einsatz. Einzelne Schichten werden übereinandergelegt und über eine thermische Reaktion, eine chemische Reaktion oder durch Ultraschallanregung verbunden. Das Halbzeug ist dabei insbesondere gegenüber pulverförmigen Ausgangsmaterialien vergleichsweise günstig. Eine gebräuchliche Handelsbezeichnung für diese Verfahren ist Laminated Object Manufacturing (LOM). (Gebhardt 2016; Gibson 2021) Der SHL Prozess ist in Abbildung 2-9 schematisch dargestellt.



#### Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des SHL Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016).

Zur Herstellung von metallischen Bauteilen werden dünne Metallfolien verwendet, welche zumeist mittels Ultraschallschweißen verbunden werden (Wohlers et al. 2019). Bauteile aus Kupfer wurden von Sriraman et al. (2010) hergestellt. Hierfür wurden Folien mit einer Dicke von 150 µm mittels Ultraschallschweißen verbunden. Bei Vibrationen im Bereich von 20 kHz konnte ein Verbund der Kupferfolien erreicht werden.

#### Photopolymerisation im Bad (vat photopolymerization VPP)

Photopolymerisation im Bad (VPP) kennzeichnet einen additiven Fertigungsprozess, bei dem flüssiges Photopolymer in einem Gefäß gezielt durch Licht-aktivierte Polymerisation ausgehärtet wird. Der Ausgangswerkstoff wird durch eine chemische Reaktion des photoreaktiven Harzes ausgehärtet. Dadurch ist die Werkstoffauswahl sehr begrenzt. Die direkte Herstellung von metallischen Bauteilen mittels VPP ist derzeit nicht möglich, weshalb der Prozess hier nur der Vollständigkeit aufgeführt werden soll. (Wohlers et al. 2019)

Abbildung 2-10 zeigt schematisch die Funktionsweise des VPP Prozesses.

Seite 21 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21553N / 1



Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des VPP Verfahrens nach DIN EN ISO 17296-2 (2016).

### 2.1.4 Material Jetting mit metallischen Werkstoffen

Die Verarbeitung von Polymeren mittels MJT ist in der Industrie bereits etabliert (Gülcan et al. 2021). Durch die Entwicklung von Druckköpfen, die höhere Temperaturen zur Verfügung stellen, können mittels MJT auch metallische Werkstoffe verarbeitet werden.

#### Prozessbeschreibung

Das zugrundeliegende Prinzip des MJT mit metallischen Werkstoffen basiert im Wesentlichen auf der Technologie des Tintenstrahldruckers (Cummins und Desmulliez 2012). In einem Druckkopf wird der Bauwerkstoff mindestens auf Schmelztemperatur aufgeheizt. Als Ausgangswerkstoff wird zumeist ein Draht verwendet. Über ein oder mehrere im Druckkopf verbaute Düsen wird das Baumaterial tropfenweise ausgegeben. Unterhalb des Druckkopfs befindet sich eine Bauplattform, auf welche die Tropfen abgelegt werden und durch Erstarrung verfestigen. Die Tropfen werden dabei entweder direkt auf die auf der Bauplattform befestigte Substratplatte oder auf das sich bereits auf der Bauplattform befindliche teilweise aufgebaute Bauteil abgelegt.

Im weiteren Verlauf des Berichts werden die Substratplatte bzw. das teilweise aufgebaute Bauteil vereinfacht als Substrat bezeichnet. Durch das Einstellen der Temperatur des Substrats kann die Erstarrung der Tropfen und dadurch die Qualität der gedruckten Bauteile beeinflusst werden.

#### Tropfenerzeugungsmethoden

Zur Herstellung von Bauteilen im MJT Verfahren sind Tropfenerzeuger nötig, die Tropfen mit gleichbleibender Größe, Form und Geschwindigkeit generieren. Weichen die erzeugten Tropfen zu stark in Form und/oder Größe voneinander ab, kann das zu Fehlern im Bauteil führen. Ebenso können auf der Bauplattform falsch platzierte Tropfen Fehlstellen oder Materialanhäufungen innerhalb einer Schicht verursachen. Durch den schichtweisen Aufbau werden diese Fehler fortgesetzt und können zum Ausschuss des Bauteils führen.

Grundsätzlich wird beim MJT zwischen kontinuierlichen und Drop-on-Demand (DoD) Tropfenerzeugern unterschieden.

Kontinuierliche Tropfenerzeuger generieren mittels einer Düse einen durchgängigen Fluidstrahl. Dieser Strahl zerfällt in einzelne Tropfen (Rayleigh 1878). Während der Flugphase werden die Tropfen in der Regel elektrisch geladen. Durch die Ablenkung der Tropfen in einem elektrischen Feld können die Flugrichtung der Tropfen angepasst und nicht benötigte Tropfen aussortiert werden. (Orme und Smith 2000)



Abbildung 2-11 zeigt schematisch einen kontinuierlichen Tropfenerzeuger.

Abbildung 2-11: Schematische Darstellung eines kontinuierlichen Tropfenerzeugers nach Himmel (2020). Erste metallische Werkstoffe, die mittels eines kontinuierlichem Tropfenerzeugers verarbeitet wurden, waren Flüssiglote (Ansell 2021). Ein kontinuierlicher Tropfenerzeuger wurde auch von Orme und Smith (2000) zur Herstellung der ersten frei stehenden Bauteile aus Aluminium mittels MJT verwendet.

Neben kontinuierlichen finden in vielen Arbeiten Tropfenerzeuger, die nach dem DoD Prinzip arbeiten Anwendung. Bei DoD Tropfenerzeugern werden Tropfen nur generiert, wenn diese auch tatsächlich gebraucht werden (Ansell 2021). Dadurch müssen keine Tropfen aussortiert werden. Zur Erzeugung von Tropfen mittels eines DoD Tropfenerzeugers wird der Bauwerkstoff in einem Tiegel aufgeschmolzen. Die Unterseite des Tiegels ist mit einer Düse verschlossen. In die Düse ist eine Öffnungsbohrung eingebracht. Der Durchmesser der Düsenbohrungsöffnung wird so gewählt, dass die Oberflächenspannung der Metallschmelze ausreicht, damit im Ruhezustand keine Schmelze durch die Öffnung fließt. Durch eine äußere Anregung können einzelne Tropfen des Bauwerkstoffs ausgegeben werden. Die Anregung kann dabei piezoelektrisch oder elektromagnetisch (Lee et al. 2008), pneumatisch (Tropmann et al. 2012), oder magnetohydrodynamisch (Sukhotskiy et al. 2017) erfolgen.

Abbildung 2-12 zeigt schematisch die verschiedenen Möglichkeiten der Aktuierung.



Abbildung 2-12: Schematische Darstellung von DOD Tropfenerzeugern nach Himmel (2020). Da im Rahmen des Forschungsvorhabens ein pneumatischer DoD Tropfenerzeuger verwendet wird, soll im Folgenden ausschließlich die pneumatische Aktuierung vorgestellt werden.

Bei pneumatischen Tropfenerzeugern wird zur Erzeugung von Tropfen ein Druckstoß von oben auf die sich im Tiegel befindende Schmelze aufgebracht. Die auf die Schmelze wirkende Kraft verursacht das Ausdrücken von Material durch die Düsenbohrungsöffnung. Dieser Druckstoß wird durch das Öffnen eines in der Anlage verbauten Ventils erzeugt. Die Dauer, wie lange der pneumatische Druckstoß auf die Schmelze wirkt (Ventilöffnungszeit) und die Höher des Druckstoßes (Druckhöhe) können durch das Ventil gesteuert werden. Tropfen werden erst bei einem bestimmten Schwellenwert der Druckhöhe bzw. Ventilöffnungszeit ausgegeben. Darunter reicht die Kraft nicht aus, um die Oberflächenspannung des Werkstoffs zu überwinden und Material aus der Düsenöffnung auszugeben. Zhong et al. (2014) konnten zeigen, dass mit steigendem Druck die Geschwindigkeit des Tropfens zunimmt. Durch die Erhöhung der Ventilöffnungszeit konnten Tropfen mit größerem Durchmesser erzeugt werden.

#### Vorarbeiten mit niedrig schmelzenden Werkstoffen

Bisherige Untersuchungen des MJT Verfahrens mit metallischen Werkstoffen beschränkten sich meist auf Werkstoffe mit einem Schmelzpunkt, der dem von Aluminium oder darunter entspricht. Erste Untersuchungen zur Herstellung von Aluminiumbauteilen wurden von Orme und Smith (2000) durchgeführt. Fang et al. (2009) untersuchten anhand von Parameterstudien den Wärmeübergang beim Drucken von Aluminiumsäulen. Es zeigte sich, dass für eine gute Tropfenanhaftung die Temperatur des obersten Tropfens in der Nähe der Schmelztemperatur des Baumaterials liegen muss. Bei Überschreiten der Schmelztemperatur kollabierte die gedruckte Geometrie. Den Einfluss verschiedener Tropfen- und Bauplattformtemperaturen auf die mechanischen Eigenschaften von gedruckten Aluminiumbauteilen zeigten Zuo et al. (2016). Dabei konnten mittels MJT Bauteile hergestellt werden, welche eine vergleichbare Zugfestigkeit wie extrudierte Proben aufweisen. Himmel et al. (2019) zeigten ebenfalls den dominanten Einfluss der Temperaturen im Kontaktbereich der Tropfen auf die Tropfenanbindung und damit auf die mechanischen Bauteileigenschaften. Zu gering gewählte Temperaturen führten dabei zu einer Erhöhung der im Bauteil vorherrschenden Porosität und zu einer Verringerung der Bauteilfestigkeit, da sich die neu auftreffenden Tropfen schlechter mit dem bereits abgelegten Substrat verbinden. Zahlreiche Untersuchungen mit Aluminium zeigen, dass die Qualität der Tropfenanbindung und damit die mechanischen Eigenschaften der mittels MJT hergestellten Bauteile wesentlich von den thermischen Verhältnissen während der Tropfenablage beeinflusst werden.

### 2.2 Kupfer und Kupferlegierungen

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Verarbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen mittels MJT. Im Folgenden soll kurz auf die Eigenschaften und die Anwendungsgebiete von Kupferwerkstoffen eingegangen werden.

Technisch reines Kupfer besitzt nach Silber die zweit höchste elektrische Leitfähigkeit aller Metalle (Arnold 2017). Ebenso weist Kupfer eine besonders hohe thermische Leitfähigkeit auf. Aufgrund dieser Eigenschaften wird Kupfer insbesondere für Anwendungen im Bereich der Elektro- und Elektronikindustrie oder als Material für Wärmetauscher verwendet (Davis 2001). Die thermische und elektrische Leitfähigkeit wird dabei insbesondere durch die Reinheit des Materials beeinflusst. Kupfer weist eine gute Umformbarkeit auf, was auf die kubischflächenzentrierte Gitterstruktur des Werkstoffs zurückzuführen ist. An der Oberfläche bildet der Werkstoff eine Schicht, welche zuerst braun und nach längerer Zeit grün (Patina) wird. Dadurch wird der Werkstoff vor Korrosion geschützt. (Arnold 2017)

Neben dem reinen Metall finden insbesondere Legierungen auf Basis von Kupfer vielseitig Anwendung in verschiedenen Industriebereichen (Freudenberger und Warlimont 2018). Wichtige Vertreter der Kupferlegierungen sind Messing und Bronze. Im Folgenden soll insbesondere auf die Eigenschaften und Anwendungen von Kupfer-Zinn-Bronze eingegangen werden, welche im Rahmen des Projekts untersucht werden sollen. Abbildung 2-13 zeigt das Phasendiagramm Kupfer - Zinn.



Abbildung 2-13: Phasendiagramm Kupfer-Zinn aus Deutsches Kupferinstitut (2004).

Die Eigenschaften von Kupfer-Zinn-Legierungen werden insbesondere durch den Zinngehalt beeinflusst. Reines Kupfer besitzt einen Schmelzpunkt von 1083 °C. Mit steigendem Zinngehalt sinken die Liquidus- und die Solidustemperatur. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit des Werkstoffs nimmt mit zunehmendem Zinngehalt ab. Gleichzeitig steigen die mechanische Festigkeit und die Korrosionsbeständigkeit an. Viele Kupfer-Zinn-Legierungen sind zudem meerwasserbeständig (Arnold 2017).

In Abhängigkeit des Zinngehalts finden Kupfer-Zinn-Bronzen deshalb in unterschiedlichen Bereichen wie der Automobil- und Schiffbauindustrie, dem Maschinenbau, in der Papier- und Textilindustrie, der Chemie- und Nahrungsmittelindustrie und der Trinkwasserinfrastruktur Anwendung (Deutsches Kupferinstitut 2003).

# **3** Ausgangssituation, Forschungsziel, Vorgehensweise

### **3.1 Ausgangssituation**

Kupfer weist eine besonders hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit auf und ist daher als Werkstoff für diverse Anwendungen insbesondere im Bereich der Elektroindustrie unabdingbar. Additive Fertigungsprozesse besitzen ein hohes Potential zur wirtschaftlichen Herstellung von komplexen Bauteilen und zur Fertigung von Prototypen oder Bauteilen in geringer Stückzahl. Derzeit ist die Verarbeitung von Kupfer mittels der etablierten pulverbettbasierten Fertigungsverfahren prozesstechnisch aufwendig. Als Folge dessen entstehen KMU hohe Kosten für die Anlagen und die benötigten pulverförmigen Halbzeuge. Zudem ist derzeit die additive Herstellung von Bauteilen oftmals mit langen Prozesszeiten infolge von geringen Aufbauraten und/oder dem eigentlichen Druckprozess nachgelagerten Prozessschritten wie beispielsweise Sintern verbunden. Der MJT Prozess bietet durch seine Charakteristik des tropfenweisen Aufbaus von Bauteilen ein erhebliches Potential zur wirtschaftlichen und schnellen Herstellung von endkonturnahen Bauteilen. Einige Vorteile können bereits bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen industriell genutzt werden. Abbildung 3-1 zeigt ausgewählte Potentiale des MJT Prozesses.



#### Abbildung 3-1: Potentiale des MJT Prozesses.

Im Vergleich zu pulverbettbasierten Verfahren werden beim MJT Prozess deutlich geringere Anforderungen an den Ausgangswerkstoff für die Bauteilherstellung gestellt. Zumeist wird als Ausgangswerkstoff ein Draht verwendet, da dieser besonders einfach dosiert und im Tiegel aufgeschmolzen werden kann. Da der Werkstoff im Druckkopf aufgeschmolzen wird, sind durch die Integration entsprechender Peripherie prinzipiell auch andere Werkstückformen wie beispielsweise Masseln oder Schrott möglich. Dadurch entstehen KMU geringere Kosten für den Ausgangswerkstoff im Vergleich zu pulverförmigem Halbzeug. Zudem ist die Handhabung des Ausgangswerkstoffs im Vergleich zu den oftmals hautgängigen Metallpulvern einfacher und dadurch kostengünstiger. In Abhängigkeit der Tropfengröße und der Frequenz der Tropfenablage sind mittels MJT hohe Aufbauraten möglich. Bei der Verarbeitung von Aluminium können rechnerisch Aufbauraten von 320 cm<sup>3</sup>/h erreichte werden (GROB-WERKE GmbH & Co. KG 2022). Durch die Verwendung von vergleichsweise günstigen Anlagenkomponenten besteht zudem das Potential zur wirtschaftlichen Skalierung des Prozesses. Zur Nutzung der Vorteile von

MJT bei der additiven Verarbeitung von Kupferwerkstoffen ist die Befähigung des Prozesses zur Verarbeitung dieser Werkstoffe nötig.

### **3.2 Forschungsziel**

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung der Verarbeitung von Kupferwerkstoffen im Verfahren MJT. Dabei soll ein geeignetes System, bestehend aus Druckkopf und beheizter Bauplattform entwickelt und im Anschluss durch die Erprobung des Systems der Einfluss relevanter Prozessparameter auf die Bauteilqualität ermittelt werden.

Im Rahmen des Projekts waren nachfolgend aufgelistete Forschungshypothesen zu untersuchen:

- 1. Es sind Werkstoffe verfügbar, die bei ausreichender thermischer und chemischer Stabilität Benetzungseigenschaften aufweisen, die für den Aufbau eines kupferverarbeitenden Druckkopfes geeignet sind.
- 2. Eine Variation der Tropfentemperatur im Bereich der Liquidustemperatur bis 100 °C darüber ist für die Eigenschaften der gedruckten Bauteile nicht wesentlich. Die Hypothese stützt sich auf die Untersuchung von Himmel et al. (2019). Eine Variation der Tropfentemperatur zeigt demnach im Gegensatz zur Variation der Bauplattformtemperatur keine wesentlichen Auswirkungen auf die Dichte gedruckter Bauteile.
- 3. Durch Variation der Bauplattformtemperatur können die mechanischen Eigenschaften der Bauteile beeinflusst werden.
- 4. Durch die Höhe des Druckes für die Tropfenausbringung ist die Tropfengeschwindigkeit beeinflussbar, was in direktem Zusammenhang mit der Flugzeit steht. Die Flugzeit wiederum hat Auswirkung auf die Oxidation des Tropfens, was sich auf die Tropfenanbindung auswirkt.
- 5. Mit der Ventilöffnungszeit ist die Größe der ausgebrachten Tropfen einstellbar. Die Tropfengröße bestimmt zusammen mit dem Tropfenabstand die Überlappung. Die Überlappung beeinflusst die mechanische Festigkeit der Bauteile.
- 6. Durch die Druckfrequenz ist der Energieeintrag in das Bauteil zu steuern. Hohe Druckfrequenzen führen zum Schmelzen bereits gedruckter Strukturen und zu Abweichungen der Ist- von der Sollbauteilgeometrie.
- 7. Der Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer beeinflusst die Tropfenanbindung.

Seite 28 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21553N / 1

### 3.3 Vorgehensweise

Um das Forschungsziel zu erreichen und die aufgestellten Hypothesen zu prüfen, wird nach dem in Abbildung 3-2 dargestellten Arbeitsplan vorgegangen. Der dargestellte Arbeitsplan besteht aus sechs inhaltlich aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP).



Abbildung 3-2: Zusammenhang der Arbeitspakete. Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens erfolgt anhand von sechs inhaltlich aufeinander abgestimmter Arbeitspakete.

Zu erfolgt AP1 Beginn des Forschungsvorhabens in die Entwicklung eines Hochtemperaturdruckkopfs, der im Anschluss in die am utg vorhandene MJT Anlage integriert werden soll. In dem Druckkopf sollen die Kupferwerkstoffe aufgeschmolzen und bevorratet werden. Über die Düse des Druckkopfs sollen Tropfen nach dem Drop-on-Demand Prinzip ausgestoßen werden können. Die bereits vorhandenen Druckköpfe, welche für die Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen und für Salze als Stützstrukturen für den Aluminiumdruck konzipiert wurden, sind für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen nicht geeignet. Deshalb erfolgt in AP1 eine neue Auslegung des Heizkonzepts und die Auswahl geeigneter Werkstoffe für die wichtigsten Komponenten des Druckkopfs wie den Tiegel, Düse, Isolationsmaterial und Strukturbauteile. Die Absicherung der Auslegung des neuen Heizkonzepts erfolgt mittels eines Finite Elemente Modells (FEM) des Druckkopfs. Zudem erfolgt in AP1 die Entwicklung einer beheizten Bauplattform, welche ebenfalls im Anschluss an die Fertigung in die MJT Anlage integriert wird. Während des Herstellungs- und des Abkühlprozesses des Bauteils wird die Prozesskammer der MJT Anlage mit Stickstoff geflutet. Zur Messung des sich in der Prozesskammer befindlichen Restsauerstoffgehalts wird ein O2-Sensor integriert und in die Steuerung der MJT Anlage eingebunden.

Für die industrielle Anwendung sind stabile Prozesse notwendig, mit denen in konstanter Qualität produziert werden kann. Da die Bauteilqualität bei additiven Fertigungsprozessen wesentlich von den gewählten Prozessparametern beeinflusst wird, erfolgt in AP2 die Erprobung des Druckprozesses anhand einer Variation der Druckparameter. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen Bauteile aus der Kupfer-Zinn-Bronze CuSn8 und aus Reinkupfer Cu-ETP mittels MJT hergestellt werden. Dabei soll der Einfluss der Tropfentemperatur, der Bauplattformtemperatur, der Druckhöhe und der Ventilöffnungszeit bei der Tropfenerzeugung, der Druckfrequenz und des Restsauerstoffgehalts in der Prozesskammer untersucht werden. Die Wahl der Druckparameter ist dabei nicht gänzlich frei. Aufgrund der Verwendung eines pneumatischen Druckstoßes zur Erzeugung von Tropfen ist die Frequenz bei der Tropfenerzeugung begrenzt. Zudem zeigte sich während der Versuchsdurchführung eine Abhängigkeit der für die Tropfenerzeugung wesentlichen Parameter Druckhöhe und Ventilöffnungszeit. Um eine stabile Tropfenerzeugung zu gewährleisten, musste von dem ursprünglichen Versuchsplan abgewichen werden. Eine detaillierte Darstellung der Abhängigkeit von Druckhöhe und Ventilöffnungszeit befinden sich in Kapitel 8.2.1.

Die in AP2 bei verschiedenen Parametern hergestellten Probekörper werden in **AP3** bezüglich mehrerer Eigenschaften charakterisiert. Die Anbindung der Tropfen wird anhand optischer Aufnahmen mittels Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie bewertet. Mittels Lichtmikroskopie wird zudem die Form der Tropfen bzw. die Oberfläche der gedruckten Bauteile untersucht. Um eine Untersuchung des Werkstoffgefüges vorzunehmen, werden Schliffproben angefertigt. Im Anschluss erfolgt eine Bewertung des Werkstoffgefüges anhand von Mikroskopaufnahmen der Schliffbilder. Anhand der Schliffbilder erfolgt zudem eine Bewertung der relativen Bauteildichte. Neben der Bestimmung der relativen Bauteildichte anhand von Schliffbildern erfolgt die Ermittlung zudem nach dem archimedischen Prinzip. Da für einen späteren Einsatz von im MJT Prozess hergestellten Bauteilen insbesondere die mechanischen Eigenschaften von Bedeutung sind, wird eine mechanische Charakterisierung von gedruckten Proben mittels Zugversuch durchgeführt. Hierfür werden quaderförmige Probekörper hergestellt, aus denen spanend Rundzugproben gefertigt werden. Mit einer Universalprüfmaschine werden die mechanischen Kennwerte der Proben nach DIN EN ISO 6892 ermittelt. Die entstehenden Bruchflächen werden anschließend mittels Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Seite 30 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21553N / 1

Die am *utg* vorhandene MJT Anlage wird über G-Code-Befehle gesteuert. In **AP4** des Forschungsvorhabens wird ein anlagenspezifisches "Slicer"-Programm entwickelt. Mit diesem Programm soll automatisch aus CAD-Daten ein für die Anlage verständlicher G-Code erzeugt werden können. Hierfür werden die CAD-Daten in mehrere Schichten zerteilt, wobei die Schichtdicke in Abhängigkeit der angestrebten Tropfengröße gewählt wird. Dadurch wird die dreidimensionale Geometrie in mehrere zweidimensionale Geometrie überführt. Innerhalb jeder zweidimensionalen Schicht muss im Anschluss ein Aufbaupfad generiert werden, entlang dessen sich während des Druckprozesses die Bauplattform relativ zum Druckkopf bewegt. Im G-Code müssen neben den geometrischen Informationen auch die Prozessparameter zur Herstellung des Bauteils vorhanden sein. Das betrifft neben den in AP3 identifizierten Parametern zudem den Vorschub des Halbzeugs, um den Schmelzespiegel im Tiegel während des Druckvorgangs konstant zu halten und die Geschwindigkeit der einzelnen Achsen.

Neben der experimentellen Untersuchung des MJT mit Kupferwerkstoffen wird der Prozess in **AP5** numerisch simuliert. Dadurch soll die Temperaturverteilung im Bauteil während des Druckprozesses untersucht werden können. Die Kenntnis der thermischen Verhältnisse während der Tropfenablage sind wesentlich für die Vorhersage der späteren Bauteilqualität, da die Tropfenanbindung insbesondere von der Temperatur der Tropfen bzw. dem Substrat (Bauplattform oder bereits gedruckte Schicht) abhängt (Fang et al. 2009; Himmel et al. 2019). Im ersten Schritt wird hierfür ein Simulationsmodell aufgebaut. Um mit dem aufgebauten Modell eine Prognose der Bauteilqualität durchführen zu können, erfolgt der Versuch der Validierung mittels Pyrometermessungen und Messung der Tropfenabkühlung mittels Thermoelement.

# 4 Versuchs- und Messeinrichtungen

### 4.1 MJT Anlage am *utg*

Für die Bearbeitung des Projekts wurde die am *utg* vorhandene MJT Anlage verwendet. Die Anlage ermöglicht durch ihr modulares Konzept die Erprobung verschiedener Druckköpfe. In Abbildung 4-1 sind die MJT-Anlage und die zwei für die Herstellung von Bauteilen wesentlichen Komponenten Druckkopf und beheizte Bauplattform dargestellt. Zentral und weiß beleuchtet ist das Achsensystem zu sehen. Die Beleuchtung weist dabei auf den Betriebszustand der Anlage hin (blau: Initialisierung, weiß: betriebsbereit, grün: druckt, rot: Fehlerzustand). Direkt über dem Achssystem ist die Prozesskammer zu erkennen, in der sich die beheizte Bauplattform befindet, welche über das Achsensystem bewegt werden kann. Auf der Prozesskammer wird der Druckkopf montiert, welcher von der Anlage mit Strom, Halbzeug und Schutzgas zur Tropfenerzeugung versorgt wird. Die Verbindung von Druckkopf und Prozesskammer erfolgt über die Adapterplatte des Druckkopfs. Dadurch können Druckköpfe einfach gewechselt werden. Im rechten oberen Bereich der Anlage sind die Ventile und weitere Pneumatikbauteile zu erkennen.



Bauplattform

Abbildung 4-1: MJT Prüfstand am utg inklusive beheizter Bauplattform und Druckkopf. Die MJT Anlage ist durch die in Tabelle 4-1 aufgeführten technischen Daten charakterisiert.

Tabelle 4-1: Technische Daten der MJT Anlage am Lehrstuhl utg.

Eigenschaft	Wert
Nutzbare Bauplattformgröße	50 mm x 50 mm
Tropfenerzeugung	pneumatisch
Tropfengröße	Ø 0,8 – 1,2 mm
Druckfrequenz	max. 30 Hz
Tropfentemperatur	max. 1200 °C
Bauplattformtemperatur	max. 1000 °C
Baumaterialien	Aluminiumwerkstoffe, Salze, Kupferwerkstoffe

Die Erzeugung von Tropfen erfolgt mittels eines pneumatischen Druckstoßes, der auf die Schmelze, welche sich im Tiegel des Druckkopfs befindet, wirkt. Abbildung 4-2 zeigt schematisch die Funktionsweise der Bauteilherstellung mit pneumatischem Tropfenerzeuger.



Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des MJT Prüfstands nach Ploetz et al. (2023).

Der drahtförmige Ausgangswerkstoff wird von oben in den zylindrischen Tiegel des Druckkopfs eingeführt. Durch zwei Heizelemente wird der Tiegel auf die Verarbeitungstemperatur aufgeheizt. Der zugeführte Draht schmilzt im Tiegel auf und wird dort in einer definierten Menge bevorratet. An der Unterseite ist der Tiegel durch eine Düse verschlossen. Im Ruhezustand fließt infolge der Oberflächenspannung des flüssigen Metalls keine Schmelze durch die Bohrung der Düse. Über ein Magnetventil kann ein pneumatischer Druckstoß von oben auf die Schmelze aufgebracht werden. Die Höhe und die Dauer des pneumatischen Stoßes kann dabei eingestellt werden. In Abhängigkeit der gewählten Parameter wird eine definierte Menge an Schmelze in Form eines Tropfens ausgegeben. Die Tropfenerzeugung erfolgt dabei nach dem DoD Prinzip. Die ausgegebenen Tropfen werden auf der beheizten Bauplattform, welche sich unterhalb des statischen Druckkopfs in der Prozesskammer befindet, abgelegt. Auf der Bauplattform erstarren die Tropfen und erzeugen sukzessive das herzustellende Bauteil. Durch die Bewegung der Bauplattform können komplexe Geometrien erzeugt werden. Während des Druckprozesses ist die Prozesskammer mit Stickstoff geflutet, um die Oxidation des Bauwerkstoffs und der Druckkopfkomponenten zu reduzieren. Die Steuerung der Tropfenerzeugung, der Temperaturen von Tiegel und Bauplattform sowie die Bewegung der Bauplattform erfolgen mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS).

### 4.2 Digitalmikroskop Keyence VHX-2000

Zur Bewertung der Bauteilform und –oberfläche werden die Bauteile unter Verwendung des Digitalmikroskops Keyence VHX-2000 der Firma Keyence, Osaka, Japan optisch erfasst. Durch die hohe Auflösung und Tiefenschärfe können insbesondere die Tropfenform und die Übergänge zwischen den einzelnen Tropfen untersucht werden. Das verwendete Objektiv VH-Z20R ermöglicht Aufnahmen in einem Vergrößerungsbereich von 20:1 bis 200:1. (KEYENCE CORPORATION 2012)

### 4.3 Auflichtmikroskop Axioplan 2

Die Bestimmung und Bewertung des Werkstoffgefüges der hergestellten Bauteile erfolgt anhand von Schliffbildern. Das Gefüge wird mittels des Kamerasystems AxioCam MRc5 erfasst, welches Teil des Auflichtmikroskops Axioplan 2 der Firma Carl Zeiss MicroImaging Gmbh, Göttingen, Deutschland ist. Mit dem Mikroskop können Bilder mit einer Vergrößerung von 25:1 bis 2500:1 aufgenommen werden. Die maximale Anzahl an Pixeln beträgt 2584 x 1936. (CARL ZEISS MICROSCOPY GmbH 2006)

### 4.4 Universalprüfmaschine Typ 1484 / DUPS-M

Um die mechanischen Kennwerte der gedruckten Prüfkörper zu erfassen, werden Rundzugproben mittels der Universalprüfmaschine vom Typ 1484 / DUPS-M der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland, getestet. Die auftretenden Dehnungen werden unter Verwendung eines Extensometers vom Typ Makro aufgenommen. Die verwendete Kraftmesstechnik des Prüfraums ist auf eine maximale Kraft von 20 kN begrenzt. Im Messbereich von 40-20000 N erfüllt die Messtechnik die Genauigkeitsanforderungen der Klasse 0,5 nach DIN EN ISO 7500-1. (ZWICK GmbH 2015)

### 4.5 Rasterelektronenmikroskop JSM-7500F

Die im Zugversuch entstandenen Bruchflächen werden mit dem Rasterelektronenmikroskop JSM-7500F der Firma JEOL (Germany) GmbH, Freising, Deutschland aufgenommen. In Abhängigkeit der gewählten Spannung können Bilder mit einer Auflösung von bis zu 1,0 nm aufgenommen werden. (JEOL (Germany) GmbH)

# 5 Versuchswerkstoffe

Im folgenden Kapitel werden die für die Versuchsdurchführung verwendeten drahtförmigen Ausgangswerkstoffe vorgestellt. Die Untersuchung der Verarbeitung von Kupferwerkstoffen mittels MJT wird mit technisch reinem Kupfer Cu-ETP und der Kupfer-Zinn-Bronze CuSn8 untersucht.

### 5.1 Technisch reines Kupfer Cu-ETP

Der Werkstoff Cu-ETP liegt als Draht mit einem Durchmesser von 1,35 mm vor. Tabelle 5-1 zeigt die Mittelwerte der chemischen Zusammensetzung. Der Werkstoff besteht vorrangig aus Kupfer. Zudem können geringe Mengen Bismut, Sauerstoff und Blei enthalten sein.

Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs Cu-ETP nach DIN CEN/TS 13388 (2015).

Element	Gew%
Kupfer (Cu)	≥ 99,9
Bismut (Bi)	≤ 0,0005
Sauerstoff (O)	≤ 0,040
Blei (Pb)	≤ 0,005

Bei dem Werkstoff Cu-ETP handelt es sich um einen sauerstoffhaltigen Kupferwerkstoff. Durch seine besonders hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit findet der Werkstoff vor allem in der Elektrotechnik und Elektronik Anwendung, wenn die mechanische Festigkeit des Werkstoffs eine untergeordnete Rolle spielt. Mögliche Anwendungen sind Platten zur Wärmeabfuhr, Transformatorspulen und Stanzteile der Elektroindustrie. Cu-ETP kristallisiert in einem kubisch-flächenzentriertem Gitter und besitzt weder para- noch ferromagnetische Eigenschaften. (Wieland-Werke AG 2021b)

In Tabelle 5-2 sind die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs aufgeführt.

Tabelle 5-2: Physikalische	Eigenschaften des	Kupferwerkstoffs	Cu-ETP nach	Wieland-Werke	AG (2021b)

	Wert	Einheit
Dichte	8,94	g/cm <sup>3</sup>
Elektrische Leitfähigkeit	58	MS/m
Spezifische Wärmekapazität	0,386	J/(g K)
Wärmeleitfähigkeit	390	W/(m K)
Wärmeausdehnungskoeffizient	17,7 x 10 <sup>-6</sup>	1/K
E-Modul	115	GPa
Zugfestigkeit	220 - 260	MPa
0,2 % - Dehngrenze	≤ 140	MPa
Vickers-Härte	40 - 70	HV
Bruchdehnung	≥ 33	%
Poisson-Zahl	0,34	

### 5.2 Kupfer-Zinn-Bronze CuSn8

In Tabelle 5-3 sind die Elemente des Drahts aus CuSn8 dargestellt. Der verwendete CuSn8 Draht besitzt einen Durchmesser von 2,0 mm. Im Wesentlichen besteht der Werkstoff aus Kupfer mit einem Anteil von ca. 7,5 – 8,5 % Zinn. Zudem sind geringere Mengen Phosphor zu finden.

Tabelle 5-3: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs CuSn8 nach DIN CEN/TS 13388 (2015)

Element	Gew%
Kupfer (Cu)	Rest
Zinn (Sn)	7,5 – 8,5
Phosphor (P)	0,01 - 0,4

Die Kupfer-Zinn-Bronze besitzt im Vergleich zu Cu-ETP eine deutlich geringere elektrische und thermische Leitfähigkeit. Durch das hinzulegierte Zinn besitzt der Werkstoff jedoch eine gesteigerte Festigkeit, eine bessere Korrosionsbeständigkeit und gute Gleiteigenschaften. Zudem ist CuSn8 verschleißfest, gut kalt umformbar und weist gute Federeigenschaften auf. Durch diese Eigenschaften wird dieser Werkstoff insbesondere für Federkontakte in elektrischen Bauteilen eingesetzt, wenn hohe Betätigungskräfte erforderlich sind. (Wieland-Werke AG 2021a)

Tabelle 5-4 zeigt die physikalischen Eigenschaften der Kupfer-Zinn-Bronze CuSn8.

Tabelle 5-4: Physikalische Eigenschaften des Kupferwerkstoffs Cu-ETP Wieland-Werke AG (2021a).

	Wert	Einheit
Dichte	8,80	g/cm3
Elektrische Leitfähigkeit	7,5	MS/m
Spezifische Wärmekapazität	0,377	J/(g K)
Wärmeleitfähigkeit	62	W/(m K)
Wärmeausdehnungskoeffizient	18,2 x 10 <sup>-6</sup>	1/K
E-Modul	110	GPa
Zugfestigkeit	370 - 450	MPa
0,2 <sup>°</sup> % - Dehngrenze	≤ 300	MPa
Vickers-Härte	90 - 120	HV
Bruchdehnung	≥ 50	%
Poisson-Zahl	0,34	

# 6 Teststand zur Verarbeitung von Kupferwerkstoffen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein System bestehend aus Druckkopf und beheizter Bauplattform für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen im MJT Prozess entwickelt. Beide Komponenten wurden in die am *utg* vorhandene MJT Anlage integriert und für die Herstellung von Bauteilen zur Untersuchung des MJT Prozesses verwendet. Zudem erfolgten die Auswahl eines Sauerstoffsensors und die Integration des Sensors in die MJT Anlage. Im Folgenden werden der Entwicklungsprozess und das gefertigte System vorgestellt.

### 6.1 Druckkopf

Zur Herstellung von Bauteilen im MJT Prozess ist die Erzeugung von Tropfen des Baumaterials notwendig. Die Tropfenerzeugung erfolgt auf der am *utg* vorhandenen MJT Anlage mit Hilfe eines pneumatisch aktuierten Druckkopfs nach dem DoD Prinzip.

Mit dem Druckkopf sollen Tropfen aus der Kupfer-Zinn-Bronze CuSn8 und aus Kupfer ETP erzeugt werden können. Um den Einfluss der Tropfentemperatur auf die Qualität der im MJT Prozess hergestellten Bauteile zu untersuchen, soll es möglich sein, Tropfen mit einer Temperatur von bis zu 1190 °C zu erzeugen. Da die Tropfenerzeugung unter anderen von dem Material der Düse abhängt, soll es möglich sein, mit dem Druckkopf Düsen aus verschiedenen Materialien zu untersuchen. Die Konstruktion muss daher eine geeignete Möglichkeit zum Wechsel der Düsen vorsehen. Ebenso sollen Tiegel aus verschiedenen Material untersucht werden. Die Wechselmöglichkeit des Tiegels ist daher ebenfalls bei der Konstruktion zu berücksichtigen.

Im Projekt wurden drei unterschiedliche Konzepte für Druckköpfe entwickelt und im Anschluss aufgebaut. Die entwickelten Druckköpfe werden im Folgenden vorgestellt. Für die Entwicklung werden die folgenden Anforderungen zusammengefasst:

- Erreichbare Schmelzetemperatur von mindestens 1190 °C
- Möglichkeit zur Temperaturmessung
- Möglichkeit zur Verwendung von Düsen aus verschiedenen Materialien
- Möglichkeit zur Verwendung von Tiegeln aus verschiedenen Materialien
- Integrationsmöglichkeit des Druckkopfs in die vorhandene MJT Anlage

### 6.1.1 Widerstandsbeheizter Druckkopf ohne Flutung

Der erste im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Druckkopf ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Abbildung 6-2 zeigt den Druckkopf nochmals als CAD-Darstellung im Schnitt, um die einzelnen verbauten Komponenten näher erläutern zu können.



Abbildung 6-1: Widerstandbeheizter Druckkopf ohne Flutung.


Abbildung 6-2: CAD Darstellung des Widerstandsbeheizten Druckkopfs im Schnitt. Die Anschlüsse der Heizelemente und die Leitungen für den Druckstoß sind zur besseren Übersicht nicht dargestellt.

Im Zentrum des Druckkopfs befindet sich der rot dargestellte Tiegel. Unterhalb des zylindrischen Tiegels befindet sich die Düse (gelb), über welche die Tropfen ausgegeben werden. Um eine Verbindung zwischen Tiegel und Düse herzustellen, werden diese zwischen dem Kopfteil und der Adapterplatte des Druckkopfs verklemmt. An der Oberseite des Tiegels bzw. an der Unterseite der Düse sind jeweils Bauteile aus Kalziumsilikat eingebracht, um die während des Druckprozesses heißen gegenüber den metallischen Komponenten thermisch zu isolieren. Die Vorspannung wird über zwei Federn, welche die Kopfplatte in Richtung der Adapterplatte drücken, erreicht. Durch dieses Klemmkonzept können Tiegel und Düse getauscht und unterschiedliche Materialkombinationen untersucht werden. Beheizt wird der Tiegel über zwei seitlich angebrachte Heizelemente. Die Heizelemente besitzen einen Siliziumkarbidheizleiter und können über die keramische Aufnahme am Kopfteil des Druckkopfs montiert werden. Durch die Kombination der kleinen Abmessungen und der maximal ertragbaren Oberflächentemperatur der Heizleiter von 1500 °C ist es möglich, bei einer kompakten Bauweise des Druckkopfs die Düse, den Tiegel und den Bauwerkstoff auf bis zu 1200 °C aufzuheizen. Die Temperatur an der Düse wird mit einem Thermoelement gemessen und kann durch die Anlagensteuerung geregelt werden. Mit dem entwickelten Druckkopf ist es dadurch möglich, sowohl Bronze als auch Reinkupfer aufzuschmelzen und die Schmelze auf einer eingestellten Temperatur zu halten. Um den Tiegel gegenüber der Umgebung thermisch zu isolieren, erfolgt eine Ummantelung des Druckkopfs mit Isolierwolle. Damit ein kontrollierter Druckstoß auf die Schmelze aufgebracht werden kann, sind am Kopfteil des Druckkopfs pneumatische Verbindungselemente angebracht. Über diese Elemente kann der Druckkopf mit dem Pneumatikboard der MJT Anlage verbunden werden.

### 6.1.2 Widerstandsbeheizter Druckkopf mit Flutung

Während der Durchführung der Versuche konnte ein erhöhter Verschleiß an den Tiegeln und Düsen aus Graphit infolge der Kombination aus der hohen Temperatur und dem im Umfeld der Komponenten vorhandenen Sauerstoffs festgestellt werden. Zudem traten Verschleißerscheinungen an den verwendeten Isolierkomponenten auf (vgl. 5.1.4 und 5.1.5). Um die Standzeit der Druckkopfkomponenten zu erhöhen, wurde der widerstandsbeheizte Druckkopf weiterentwickelt und eine Flutung des Bereichs um die Düse und den Tiegel integriert. Abbildung 6-3 zeigt den entwickelten Druckkopf mit Flutung.



Abbildung 6-3: Widerstandsbeheizter Druckkopf mit Flutung.

Neben den Leitungen für die Drahtzuführung und die Tropfenerzeugung wird im Kopfbereich eine Leitung für die Schutzgasflutung ergänzt. Um das zugeführte Schutzgas im Umfeld des Tiegels zu halten, wird der Druckkopf zudem mit einem Aluminiumrohr eingehaust. Eine schematische Darstellung des Druckkopfs und der enthaltenen Komponenten erfolgt im Schnitt in Abbildung 6-4.



#### Abbildung 6-4: Schnittdarstellung des widerstandsbeheizten Druckkopfs mit Flutung.

Der grundlegende Aufbau des Druckkopfs mit Flutung entspricht dem zuvor vorgestellten widerstandsbeheizten Druckkopf ohne Flutung. Tiegel und Düse werden wiederum über das Kopfteil und die Adapterplatte gegeneinander verklemmt, um diese auswechseln zu können. Auch das Heizkonzept und die Adapterplatte bleiben unverändert. Das Kopfteil des widerstandsbeheizten Druckkopfs mit Flutung wird im Vergleich zum Druckkopf ohne Flutung angepasst. Über dieses Bauteil gelangt der Stickstoff in die Umgebung des Tiegels und der Düse. Hierfür sind zusätzliche Anschlüsse für die Leitung der Schutzgasflutung am Kopfteil angebracht.

Der Stickstoff durchströmt das Kopfteil und gelangt über Bohrungen in den Innenraum des Druckkopfs. In der CAD Darstellung in Abbildung 6-5 sind die Kanäle, durch die das Gas strömt, bevor es in den Innenraum des Druckkopfs geleitet wird, dargestellt.



Abbildung 6-5: Kühlkanal im Kopfteil des Druckkopfs zur Kühlung der Heizelementanschlüsse und zum vorheizen des Stickstoffs. Während das Gas durch die im Kopfteil eingebrachten Kühlkanäle strömt, wird es vorgeheizt. Zudem erfolgt dadurch die Kühlung des Kopfteils, in dem die keramischen Aufnahmen der Heizelemente montiert sind. Dadurch kann der Druckkopf auch längere Zeit bei Temperaturen von 1200 °C betrieben werden. Während des Druckvorgangs wird der Druckkopf mit ca. zwei Litern pro Minute an Stickstoff geflutet. Dadurch kann die Oxidation des Tiegels und der Düse deutlich reduziert werden (vlg. Kapitel 8.1.2). Zudem kann durch die verbesserte Isolierung die Zeit für den Aufheizvorgang des Druckkopfs reduziert werden.

## 6.1.3 Induktiv beheizter Druckkopf mit Flutung

Neben widerstandsbeheizten Druckköpfen wird ein induktiv beheizter Druckkopf aufgebaut. Anders als bei den beiden zuvor vorgestellten Druckköpfen erfolgt hier die Beheizung des Tiegels nicht über zwei Widerstandsheizelemente, sondern über eine induktive Heizung, bestehend aus Frequenzumrichter und Induktor. Die induktive Heizung wurde von Mitgliedern des PA ausgelegt und zur Verfügung gestellt. In Abbildung 6-6 ist der induktivbeheizte Druckkopf dargestellt. Eine Darstellung des Druckkopfs im Schnitt anhand einer CAD-Zeichnung befindet sich in Abbildung 6-7.



Abbildung 6-6: Induktiv beheizter Druckkopf.



Abbildung 6-7: Schnittdarstellung des induktiv beheizten Druckkopfs.

Während des Druckprozesses wird der Bereich um den Tiegel mit Stickstoff geflutet. Im Vergleich zum widerstandsbeheizten Druckkopf erfolgt hier die Flutung des Bereichs um den Tiegel direkt über die Prozesskammer. Um das zu ermöglichen, ist die Unterseite des Druckkopfs offen. Zudem kann dadurch der Abstand zwischen Düse und Substrat reduziert werden, wodurch eine fehlerhafte Flugrichtung der Tropfen einen geringeren Einfluss hat. Bei dem induktiv beheizten Druckkopf werden Tiegel und Düse als ein Bauteil ausgeführt. Dadurch wird das System einfacher zu montieren und der Montageprozess kann die Tropfenerzeugung in Folge eines sich ändernden pneumatischen Systems weniger stark beeinflussen (vgl. Kapitel 8.2.2).

# 6.1.4 Isoliermaterial

Um die Energie und die Zeit zum Aufheizen des Druckkopfs gering zu halten, werden bei allen drei entwickelten Druckköpfen Bauteile zur thermischen Isolierung verwendet. Zudem sind die Isolierkomponenten essenziell, um eine Schädigung der MJT Anlage bzw. einzelner Komponenten des Druckkopfs wie der Pneumatikleitungen oder der keramischen Anschlüsse der Widerstandsheizelemente infolge der thermischen Strahlung zu vermeiden. Teilweise liegen die Isolierbauteile im Kraftfluss zur Verklemmung von Tiegel und Düse und dienen als tragende Strukturelemente des Druckkopfs. Wesentliche Bauteile zur thermischen Isolation sind beispielsweise die Bauteile zur Isolation des Tiegels und der Düse gegenüber der Kopf- und der Adapterplatte des Druckkopfs. Da bei der Verarbeitung Schmelzetemperaturen bis 1190 °C erreicht werden sollen, müssen die Bauteile zur thermischen Isolierung eine entsprechende Temperaturbeständigkeit aufweisen. Zudem müssen die Bauteile ausreichend beständig bezüglich eines Temperaturschocks sein, der während des Aufheiz- und Abkühlvorgangs auftreten kann.

Für die Bauteile zur thermischen Isolation werden folgende Anforderungen zusammengefasst:

- Temperaturbeständigkeit bis mindestens 1190 °C
- Temperaturschockbeständigkeit von 200 K pro Minute
- Chemische Beständigkeit im Kontakt zu Düse und Tiegel
- Ausreichende Festigkeit, da Bauteile teilweise als Strukturelemente dienen

Bei den widerstandsbeheizten Druckköpfen wird zur thermischen Isolation eine Kombination aus Bauteilen aus Kalziumsilikat und Isolationswolle verwendet. Die Isolationswolle zeichnet sich durch die einfache Fertigung von Bauteilen sowie eine gute thermische Isolationswirkung aus. Aufgrund der Beschaffenheit der Isolationswolle kann diese jedoch nicht für Bauteile eingesetzt werden, welche mechanisch belastet sind. Deshalb werden Bauteile, die im Kraftfluss zum Klemmen von Tiegel und Düse liegen, aus Kalziumsilikat hergestellt. Durch die Kombination der beiden Isolationsmaterialien kann ein kostengünstiges Konzept zur thermischen Isolation der Druckköpfe umgesetzt werden.

Aufgrund der hohen Temperaturen kann bei einzelnen Bauteilen aus Kalziumsilikat Verschleiß festgestellt werden. Insbesondere bei längerer Nutzung der Kalziumsilikatbauteile können Risse bei den Bauteilen festgestellt werden, welche sich in direktem Kontakt mit Tiegel und Düse des Druckkopfs befinden. In Abbildung 6-8 ist ein Kalziumsilikatbauteil mit Riss dargestellt.



Abbildung 6-8: Aufgrund von Rissen zerstörtes Bauteil aus Kalziumsilikat.

Da mit der MJT Anlage die Tropfenerzeugung durch einen pneumatischen Druckstoß erfolgt, können Risse zu Undichtigkeit im pneumatischen System führen, wodurch keine stabile Tropfenerzeugung mehr möglich ist. Zudem kann es durch den Bruch von Isolierbauteilen, welche andere Komponenten wie den Tiegel aufnehmen, zum Auslaufen von Schmelze kommen. Um das zu vermeiden, wird für den Druckkopf mit induktiver Heizung, bei dem der Tiegel direkt von den Isolationskomponenten getragen wird, das Kalziumsilikatbauteil teilweise durch Siliziumnitrid ersetzt. Die Kopfplatte aus Kalziumsilikat und Siliziumnitrid des induktiv beheizten Druckkopfs ist in Abbildung 6-9 dargestellt. Durch die Einlage aus Siliziumnitrid wird die maximale, auf das Kalziumsilikat einwirkende Temperatur reduziert, wodurch die Anfälligkeit für Risse gesenkt wird. Die Anpassung der Kopfplatte des induktiv beheizten Druckkopfs erfolgte unter Zusammenarbeit mit einem Partner des PbA. Durch die Anpassung kann die Entstehung von Rissen in der Kopfplatte verhindert werden.



Abbildung 6-9: Angepasste Kopfplatte des induktivbeheizten Druckkopfs aus Siliziumnitrid und Kalziumsilikat.

## 6.2 Bauplattform

Die Bauplattform stellt neben dem Druckkopf zur Tropfenerzeugung eine der wesentlichen **Bauteilen** Komponenten für die Herstellung von im MJT Prozess dar. Um einen qualitativ hochwertigen Materialverbund zwischen dem Substrat und den neu abgelegten Tropfen herstellen zu können, muss das Substrat auf einer definierten Temperatur gehalten werden. Abhängig vom verwendeten Bauwerkstoff liegt die benötigte Temperatur etwa 50 °C bis 200 °C unterhalb der Schmelz- bzw. Solidustemperatur des Werkstoffs. Im Antrag wurden Untersuchungen des Einflusses der Substrattemperatur bei 800 °C und 900 °C beschrieben. Während der Durchführung der Versuche konnte festgestellt werden, dass die benötigte Substrattemperatur für die Verarbeitung von Kupfer ETP oberhalb von 900 °C liegt, weshalb die Bauplattform eine Substrattemperatur von mindestens 1000 °C zur Verfügung stellen muss.

Durch die Bewegung der Bauplattform erfolgt die gezielte Positionierung der Schmelzetropfen, um die Geometrie einer Bauteilschicht herstellen zu können. Aufgrund der wirkenden Trägheitskräfte muss es mit der Bauplattform möglich sein, die Substratplatte und das sich im Herstellungsprozess befindliche Bauteil zu fixieren. Ein Verrutschen der Substratplatte bzw. des bereits gedruckten Bauteils würde zu einer fehlerhaften Positionierung der Tropfen auf der Bauplattform und somit zum Ausschuss des Bauteils führen. Um das fertige Bauteil nach dem Herstellungsprozess entnehmen zu können, um es zu untersuchen oder es einem Nachbearbeitungsprozess zuführen zu können, muss zudem eine Möglichkeit des Wechsels der Substratplatte vorgesehen werden.

Vor dem eigentlichen Beginn der Herstellung des zu druckenden Bauteils ist es notwendig, die Düse initial zu benetzen und mögliche Verunreinigungen im Bereich der Düsenöffnungsbohrung zu beseitigen. Um das zu ermöglichen, werden vor Herstellungsbeginn einige Tropfen außerhalb der zu erstellenden Bauteilgeometrie ausgegeben. Um für diesen Vorgang keinen Platz auf der Substratplatte zur Verfügung stellen zu müssen, wodurch die Bauteilgröße bzw. die Anzahl an Bauteilen, welche innerhalb eines Druckzyklus herstellbar sind verringert werden würde, soll die Bauplattform über einen gesonderten Bereich für diesen Vorgang verfügen.

Im Projekt werden zwei Konzepte für die Bauplattform entwickelt, gefertigt und getestet. Der Unterschied zwischen den beiden Bauplattformen besteht im Wesentlichen in der Art der verwendeten Heizelemente. Beide Konzepte ermöglichen die Beheizung des Substrats unter Verwendung von Widerstandsheizelementen. Abbildung 6-10 stellt die beiden Konzepte gegenüber. Auf der linken Seite ist die Bauplattform dargestellt, welche mittels zylindrischer Heizelemente betrieben wird. Die schematische Darstellung auf der rechten Seite zeigt die Bauplattform mit flächigem Heizelement.



zylindrische Heizelemente

flächiges Heizelement

Abbildung 6-10: Schematische Darstellung der entwickelten und gefertigten Bauplattformen.

Im Folgenden werden die beiden entwickelten Bauplattformen vorgestellt und bewertet. Ausgangspunkt für die Entwicklung der Bauplattformen sind die nachfolgend zusammengefassten Anforderungen:

- Erreichbare Substrattemperatur von 1000 °C
- Homogene Temperaturverteilung
- Möglichkeit zur Temperaturmessung
- Positionierung der Substratplatte und des herzustellenden Bauteils
- Vorsehen einer Wechselmöglichkeit der Substratplatte
- Für den Herstellungsprozess verwendbare Fläche von mindestens 60 mm x 60 mm
- Vorsehen einer Möglichkeit zur initialen Benetzung der Düse
- Integrationsmöglichkeit der Bauplattform in die vorhandene MJT Anlage

### 6.2.1 Konzept zylindrische Heizelemente

Die erste im Rahmen des Projekts hergestellte Bauplattform ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Bei diesem Bauplattformkonzept erfolgt die Beheizung durch drei zylindrische Hochtemperatur-Heizelemente. Die Heizelemente wurden über einen Industriepartner, der Mitglied im PbA ist, bezogen. Die maximale Einsatztemperatur beträgt 1000 °C.





Basis dieser Bauplattform ist ein rechteckiger Block, in den drei Bohrungen eingebracht sind. In diese Bohrungen werden die zylindrischen Heizelemente eingeführt. Der Block wird aus Graphit ausgeführt, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu gewährleisten. Da sich die Bauplattform innerhalb der Prozesskammer befindet, welche während des Druckvorgangs mit Stickstoff geflutet ist, kann ein Abbrennen des Graphitblocks weitestgehend verhindert werden. Auf dem beheizten Graphitblock können Substratplatten aus unterschiedlichen Materialien platziert werden. Der Graphitblock wird durch ein U-förmiges Blech eingehaust. Zur thermischen Isolation sind zwischen der Blecheinhausung und dem Graphitblock Platten aus Kalziumsilikat eingebracht. Um eine initiale Benetzung der Düse zu Beginn des Druckprozesses zu ermöglichen bzw. Tropfen außerhalb der bedruckbaren Fläche der Bauplattform ausgeben zu können, wird ein Auffangbehälter vorgesehen. Dieser ist mit Sand gefüllt, wodurch ausgegebenes Material leicht entfernt werden kann.

Abbildung 6-12 zeigt die entwickelte Bauplattform mit zylindrischen Heizelementen im aufgeheizten Zustand.



Abbildung 6-12: Bauplattform mit zylindrischen Heizelementen im aufgeheizten Zustand.

In der dargestellten Abbildung wird eine vernickelte Stahlplatte als Substratplatte verwendet. Mit dem entwickelten System können Bauplattformtemperaturen von 760 °C erreicht werden. Die Temperaturmessung erfolgt über zwei Thermoelemente. Zur Temperaturmessung werden die Thermoelemente in zwei Bohrungen, welche in den Graphitblock eingebracht sind, eingeführt. Durch die verhältnismäßig hohe Wärmeleitfähigkeit des Graphitblocks zeigt die Bauplattform eine gleichmäßige Verteilung der Temperatur. Bei der Bewertung des Konzepts kann festgestellt werden, dass die für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen benötigten Temperaturen von über 900 °C nicht erreicht werden. Als Folge dessen wird ein weiteres Bauplattformkonzept mit einem flächigen Heizelement entwickelt und aufgebaut.

### 6.2.2 Konzept flächiges Heizelement

Abbildung 6-13 zeigt eine CAD-Darstellung der entwickelten Bauplattform mit flächigem Heizelement. Die Basis dieser Bauplattform stellt ein rechteckiges keramisches Heizelement dar. Dieses Heizelement besteht aus Heizdrähten, welche mit Siliziumnitrid ummantelt sind. Die maximale erreichbare Einsatztemperatur des Heizelements beträgt 1000 °C.



Abbildung 6-13: CAD Darstellung der entwickelten Bauplattform mit flächigem Heizelement.

Um die Temperaturabgabe an die Umgebung zu reduzieren, wird das Heizelement eingehaust. Das erfolgt durch ein rechteckiges Abschirmblech. Da die Temperatur der Anschlüsse des Heizelements mit 500 °C begrenzt ist, wird ein Kühler aus Kupfer verbaut. Über den Kupferkühler wird ausreichend Temperatur abgeführt, um das Heizelement dauerhaft bei 1000 °C betreiben zu können. Auf dem Heizelement können Substratplatten aus verschiedenen Materialien platziert werden. Um die Temperatur des Substrats messen zu können, wird ein Mantelthermoelement von unten durch das keramische Heizelement geführt. Hierfür ist im Heizelement eine entsprechende Bohrung eingebracht. Die Messstelle des Mantelthermoelements liegt dadurch direkt an der Unterseite der Substratplatte, um eine möglichst genaue Temperaturmessung zu ermöglichen. Um auch bei diesem Bauplattformkonzept eine initiale Benetzung der Düse zu Beginn des Druckprozesses zu ermöglichen, wird ein mit Sand gefüllter Auffangbehälter vorgesehen.

In Abbildung 6-14 ist die entwickelte Bauplattform mit keramischem Heizelement dargestellt. Die Abbildung zeigt die Plattform im aufgeheizten Zustand bei einer Temperatur von 850 °C. Als Substrat wurde eine vernickelte Stahlplatte verwendet.



Abbildung 6-14: Bauplattform mit keramischem Heizelement im aufgeheizten Zustand.

Während der Versuchsdurchführung kann gezeigt werden, dass mit dieser Bauplattform das Substrat zuverlässig auf Temperaturen über 1000 °C gehalten werden kann. Verschleißerscheinungen konnten bei den bisherigen Versuchen nicht festgestellt werden.

### **6.3 Sauerstoffsensor**

Der in der Prozesskammer während des Druckvorgangs verbleibende Restsauerstoffgehalt hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Oxidation des Kupferwerkstoffs während des Druckprozesses und damit auf die Qualität der herzustellenden Bauteile. Zudem führt vorhandener Restsauerstoff zum Abbrennen einzelner Komponenten des Druckkopfs wie der Graphitdüse. Als Folge dessen wird die Prozesskammer mit Stickstoff geflutet. Um den vorhandenen Restsauerstoffgehalt messen zu können, erfolgt die Integration eines Sauerstoffsensors in der Prozesskammer. Der Sauerstoffsensor wird mit der Steuerung der MJT Anlage verknüpft. Durch die Anpassung des Volumenstroms an Stickstoff, der der Prozesskammer zugeführt wird, kann der Restsauerstoffgehalt geregelt werden.

# 7 Versuchsplanung und -durchführung

Das folgende Kapitel erläutert die Planung und Durchführung der im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche. Die Durchführung der Versuche dient der Beantwortung der in Kapitel 3.2 aufgestellten Forschungshypothesen.

# 7.1 Material für Düse und Tiegel

Beim Material Jetting wird jede Bauteilschicht aus einzelnen Tropfen aufgebaut. Die Erzeugung von Tropfen erfolgt auf der MJT Anlage mittels eines pneumatischen Druckstoßes. Schmelze wird im Tiegel bevorratet und über eine Düse in Form von Tropfen ausgegeben. Für den Aufbau eines funktionsfähigen Systems sind, die Eigenschaften von Tiegel und Düse wesentlich. Beide Komponenten müssen bei ausreichend chemischer Stabilität und Temperaturbeständigkeit Benetzungseigenschaften aufweisen, um stabil Schmelzetropfen erzeugen zu können. Um geeignete Materialien für die Düse und den Tiegel des Druckkopfs zu identifizieren, wurde unter Mitwirken der Mitglieder des PbA Werkstoffe ausgewählt und im Anschluss Düsen und Tiegel gefertigt, welche mit den entwickelten Druckköpfen experimentell untersucht werden.

# 7.1.1 Düsenmaterial

Die Tropfenerzeugung hängt dabei maßgeblich von den Benetzungseigenschaften des verwendeten Düsenmaterials, dem Durchmesser der Düsenbohrung, der Beschaffenheit der Kante der Düsenbohrung und den eingestellten Prozessparametern ab. Zur Ermittlung eines geeigneten Materials werden die sechs in Abbildung 7-1 dargestellten Düsen untersucht. Die Abbildung zeigt die jeweiligen Düsen vor der Versuchsdurchführung, d.h. im Neuzustand.



Abbildung 7-1: Untersuchte Düsen aus verschiedenen Werkstoffen.

Bei der Fertigung der Düsen wird auf einen möglichst scharfen Übergang von der Mantelfläche der Bohrung zur Düsenunterseite geachtet. Für jede Düse wird die Tropfenerzeugung mit Bronze (CuSn8) und mit Reinkupfer (Cu-ETP) untersucht. Zur Erprobung der Düsen werden diese in den Druckkopf eingebaut und der Druckkopf aufgeheizt. Nach Erreichen der Verarbeitungstemperatur wird der Tiegel mit einer definierten Menge des Baumaterials gefüllt. Im Anschluss erfolgt der

Versuch der Ausgabe von Tropfen bei unterschiedlichen Ventilöffnungszeiten und Druckhöhen. Nach dem Druckversuch wird der Druckkopf demontiert und die Düse optisch untersucht.

Um die Düsen auch für die Herstellung von größeren Bauteilen verwenden zu können, muss es möglich sein, mit der Düse gleichmäßige Tropfen über einen ausreichend langen Zeitraum zu erzeugen. Die erzeugten Tropfen sollen dabei ihre Form, Größe und Geschwindigkeit über die Einsatzzeit der Düse möglichst nicht verändern. Aufgrund dessen ist es nötig, dass die Eigenschaften der Düse über die Zeit möglichst konstant bleiben. Um eine Düse für mehrere Bauteile verwenden zu können, soll zudem eine Reinigung der Düse im Anschluss an den Druckvorgang möglich sein. Diese wirtschaftliche Betrachtung ist insbesondere für die teureren keramischen Düsen notwendig. Als Folge dieser Anforderungen werden die Düsen bezüglich der Eignung zur Erzeugung von Tropfen und im Hinblick auf eine mögliche Mehrfachverwendung bewertet.

### **7.1.2 Tiegelmaterial**

Für die Herstellung der Bauteile muss im Druckkopf das drahtförmige Halbzeug aufgeschmolzen und eine definierte Menge an Schmelze bevorratet werden können. Das Aufschmelzen und Bevorraten des Bauwerkstoffs erfolgt bei allen eingesetzten Druckköpfen in einem zylindrischen Tiegel. Neben der Beständigkeit der Düse muss auch der Tiegel ausreichend chemisch und thermisch beständig sein, um ihn dauerhaft im Druckkopf verwenden zu können. Es werden drei verschiedene Materialien ausgewählt, aus denen Tiegel gefertigt werden. Die Tiegel werden wie auch die Düsen in den Druckkopf eingebaut und getestet. Eine Auswahl der Materialien wurde in Zusammenarbeit mit dem PbA vorgenommen. Abbildung 7-2 zeigt die drei untersuchten Tiegelwerkstoffe.



Abbildung 7-2: Untersuchte Tiegel aus verschiedenen Werkstoffen.

Die Tiegel werden anhand derselben Kriterien wie die Düsen bewertet. Eine weitere Anforderung, die an zwei der drei Tiegel gestellt wird, ist die Verwendung des Tiegels im induktiv beheizten Druckkopf. Hierfür muss es möglich sein, dass der Tiegelwerkstoff induktiv aufgeheizt werden kann. Die Verwendung im induktiv beheizten Druckkopf soll für die Tiegel aus Graphit und elektrisch leitfähigem Siliziumnitrid möglich sein.

# 7.2 Tropfenerzeugung

Zur Herstellung von Bauteilen im MJT Prozess ist die stabile Erzeugung von gleichmäßigen Tropfen notwendig. Die vorgestellten Druckköpfe arbeiten alle nach dem Drop-on-Demand Prinzip. Dabei wird für die Tropfenerzeugung ein pneumatischer Druckstoß verwendet, der auf die Metallschmelze wirkt. Für jeden vom Ventil erzeugten Druckstoß soll genau ein Kupfertropfen über die Düsenöffnungsbohrung ausgegeben werden. Die erzeugten Tropfen sollen dabei senkrecht zur Düsenunterseite austreten. Werden für einen Druckstoß keine oder mehrere Tropfen ausgegeben, entstehen Fehlstellen in der abgelegten Schicht. Durch den schichtweisen Aufbauprozess setzen sich diese Fehler fort und können zum Ausschuss des Bauteils führen. Ebenfalls können unterschiedliche Tropfengrößen oder Tropfen, deren Flugbahn von der senkrecht zur Düsenunterseite vorgegebenen Flugbahn abweichen, zu Fehlstellen im Bauteil führen. Als Folge dessen ist die Beherrschung eines stabilen Tropfenerzeugungsprozesses die Grundlage zur Herstellung von Bauteilen mittels eines pneumatisch aktuierten Druckkopfs.

Um den Einfluss der Ventilöffnungszeit und der Druckhöhe zu untersuchen, werden Tropfen bei unterschiedlichen Kombinationen der beiden Parameter erzeugt und bewertet. Die Untersuchung erfolgt mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans. Dabei wird die Ventilöffnungszeit in 500 µs Schritten im Bereich von 500 µs bis 6000 µs variiert. Die Druckhöhe wird zwischen 200 mbar und 4000 mbar in Schritten von 100 mbar untersucht. Ausgegebene Tropfen werden während der Flugphase mittels einer High-Speed-Kamera aufgenommen. Abbildung 7-3 zeigt schematisch den Versuchsstand. Für die Durchführung der Versuche wird eine Graphitdüse mit einem Durchmesser der Düsenöffnungsbohrung von 500 µm verwendet.



#### Abbildung 7-3: Schematische Darstellung des Versuchsstands zur Bewertung der Tropfenerzeugung.

Durch die Aufnahmen kann bewertet werden, wie viele Tropfen pro Druckstoß aus der Düsenöffnung ausgegeben werden. Ist die Anregung zu stark, werden zwei oder mehrere Tropfen pro Druckstoß ausgegeben. Sind die Parameter zu gering gewählt, reicht die Energie des Druckstoßes nicht aus, um Schmelze durch die Düsenöffnung auszugeben, d.h. es werden keine Tropfen erzeugt. Beide Vorgänge führen zu Fehlern in der erzeugten Schicht. Ziel der Untersuchungen ist die Identifikation geeigneter Parameterkonfigurationen für eine stabile Tropfenerzeugung, d.h. die Ausgabe eines Tropfens pro erzeugten Druckstoß.

In einem zweiten Schritt wird der Einfluss der Ventilöffnungszeit auf die Tropfengröße untersucht. Hierfür werden für ausgewählte Parameterkonfigurationen, bei denen eine stabile Tropfenerzeugung möglich ist, zehn Tropfen auf die Bauplattform ausgegeben. Die sich dabei ergebenden säulenförmigen Bauteile werden im Anschluss von der Bauplattform gelöst und gewogen. Anhand des Gewichts kann der Durchmesser der Tropfen berechnet werden. Die Variation der Ventilöffnungszeit erfolgt im Bereich von 3000 µs bis 5500 µs in 500 µs Schritten. Die Druckhöhe wird für die Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Ventilöffnungszeit auf die Tropfengröße zu 800 mbar gewählt. Für jede untersuchte Ventilöffnungszeit werden drei säulenförmige Bauteile hergestellt und gewogen.

## 7.3 Prozessuntersuchung

Neben einer stabilen Tropfenerzeugung haben die verwendeten Prozessparameter bei der Herstellung einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Bauteile. Im Folgenden werden das Vorgehen und die verwendeten Methoden bei der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die Bauteilqualität vorgestellt.

## 7.3.1 Einfluss der Bauplattform- und Tropfentemperatur

Aus vorangegangenen Arbeiten mit Aluminium ist bekannt, dass die Qualität der Tropfenanbindung, das Werkstoffgefüge, die relative Bauteildichte und die mechanischen Eigenschaften wesentlich von den während der Tropfenablage vorherrschenden Temperaturen abhängen (vgl. Kapitel 2.1.4). Zwei Parameter, die die Temperatur während der Tropfenablage beeinflussen, sind die Bauplattformtemperatur und die Temperatur der Schmelzetropfen. Um den Einfluss bei der Verarbeitung von Kupferwerkstoffen mittels MJT zu untersuchen, werden Bauteile bei jeweils drei variierten Bauplattform- und Tropfentemperaturen hergestellt und im Anschluss charakterisiert. Im Folgenden wird das Vorgehen und die für die Charakterisierung verwendeten Methoden vorgestellt. Als Baumaterial für die Untersuchungen wird die zuvor vorgestellte Kupfer-Zinn-Bronze CuSn8 verwendet.

Für die Untersuchungen werden quaderförmige Proben mit einer Grundfläche von ca. 41 mm × 6,5 mm hergestellt. Die Höhe der Quader variiert je nach den verwendeten Prozessparametern zwischen 5,5 mm und 7,6 mm. Jeder Quader besteht aus sieben Schichten mit jeweils 200 Tropfen. Um eine Schicht zu erzeugen, werden fünf parallele Linien mit je 40 Tropfen gedruckt. Der Abstand zwischen den Linien beträgt 1,1 mm. Innerhalb einer Linie bewegt sich die Bauplattform zwischen der Aufbringung jedes Tropfens um einen Abstand von 1 mm. Die Linien einer Schicht sind so angeordnet, dass die Tropfen jeweils um einen halben Tropfendurchmesser versetzt angeordnet sind. In Abbildung 7-4 sind die Geometrie eines Quaders und die Druckstrategie schematisch dargestellt.



#### Abbildung 7-4: Probengeometrie und Druckstrategie.

Die Abbildung zeigt oben die Prinzipskizze der Seitenansicht eines Quaders, der auf die Substratplatte gedruckt wird. Als Substratplatte wird eine vernickelte Stahlplatte verwendet. Die untere Zeile zeigt die Draufsicht des Quaders und die durch den Pfeil dargestellte Bewegung, die die Bauplattform währen der Bauteilherstellung durchführt.

Abbildung 7-5 zeigt den Ablauf der Probenvorbereitung und die zur Charakterisierung der Bauteile verwendeten Untersuchungsmethoden.



Abbildung 7-5: Vorgehen und verwendete Untersuchungsmethoden.

In einem ersten Schritt werden die quaderförmigen Probekörper im MJT-Verfahren auf dem zuvor vorgestellten MJT-Prüfstand hergestellt. Zur Herstellung der Probekörper werden die in Tabelle 7-1 aufgeführten Prozessparameter verwendet.

Tabelle 7-1: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Tropfen- und Bauplattformtemperatur.

Parameter	Symbol	Wert
Tropfentemperatur	$T_{Tropfen}$	1090 °C, 1140 °C, 1190 °C
Bauplattformtemperatur	T <sub>Plattform</sub>	650 °C, 750 °C, 850 °C
Tropfendurchmesser	<b>d</b> Tropfen	1,1 mm
Druckfrequenz	f	15 Hz
Restsauerstoffgehalt	<b>C</b> O2	< 50 ppm

Die Tropfen- und Bauplattformtemperaturen werden jeweils auf drei Stufen mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans untersucht. Für jede Parameterkonfiguration werden vier Bauteile Tropfentemperatur wird heraestellt und charakterisiert. Die auf  $T_{\text{Tropfen}} = 1090 \,^{\circ}\text{C},$  $T_{\text{Tropfen}} = 1140 \text{ °C}$  und  $T_{\text{Tropfen}} = 1190 \text{ °C}$  eingestellt. Die niedrigste untersuchte Tropfentemperatur liegt damit 50 °C über der Liquidustemperatur der Kupfer-Zinn-Bronze. Die beiden weiteren höheren Temperaturen werden untersucht, um die vom Tropfen eingebrachte Wärmeenergie zu erhöhen. Die zu untersuchenden Bauplattformtemperaturen werden zu T<sub>Plattform</sub> = 650 °C, T<sub>Plattform</sub> = 750 °C und T<sub>Plattform</sub> = 850 °C gewählt. Die im Substrat erreichten Temperaturen sind etwa 70 K niedriger als die Temperaturen, die in der Bauplattform eingestellt werden. Die maximal gewählte Substrattemperatur muss unterhalb der Solidustemperatur der Kupfer-Zinn-Bronze liegen, damit das bereits hergestellte Bauteil nicht wieder schmilzt. Daher wird die maximale Temperatur der Bauplattform auf  $T_{Plattform} = 850$  °C eingestellt. Um eine schnellere Erstarrung des Tropfens zu untersuchen, werden die beiden niedrigeren Temperaturen gewählt. Während eines Druckvorgangs werden zwei Bauteile gedruckt, die mittig auf der Bauplattform platziert sind. Dadurch wird der Einfluss des Temperaturgradienten innerhalb der Bauplattform minimiert. Die erzeugten Tropfen haben einen Durchmesser von 1,1 mm und werden mit einer Frequenz von 15 Hz auf der Bauplattform abgelegt. Während des Druckprozesses beträgt der Restsauerstoffgehalt in der Prozesskammer weniger als 50 ppm. Nach dem Druckvorgang wird in einem ersten Schritt die Oberfläche der Bauteile optisch untersucht. Im Anschluss erfolgt die Vorbereitung der Proben für die weitere Charakterisierung. In diesem Schritt werden die Enden der Quader abgeschnitten. Abbildung 7-6 veranschaulicht diesen Vorgang.



Abbildung 7-6: Vorgehen bei der Probenpräparation.

Die Enden werden in Epoxidharz eingebettet, geschliffen und poliert. Die ungeätzten geschliffenen Proben werden zur Bestimmung der relativen Bauteildichte verwendet. Um das Gefüge der Bauteile zu untersuchen, wird die polierte Oberfläche angeätzt. Aus dem Mittelstück des gedruckten Quaders werden Rundzugproben hergestellt. Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften erfolgt durch Zugversuche. Die in Folge des Zugversuchs entstandenen Bruchflächen werden im Anschluss mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der Durchführung der einzelnen Charakterisierungsmethoden vorgestellt.

### Optische Charakterisierung der Bauteiloberfläche

Mithilfe der optischen Mikroskopie wird die Oberfläche der bei verschiedenen Parametern hergestellten Bauteile untersucht. Anhand dieser Untersuchungen können mögliche geometrische Abweichungen von der quaderförmigen Sollgeometrie festgestellt werden. Darüber hinaus werden die Bauteile hinsichtlich möglicher offener Porosität bewertet. Für jede Parameterkonfiguration werden alle Oberflächen der vier hergestellten Bauteile mit dem Digitalmikroskop fotografiert. Um die Bauteile vergleichen zu können, wird im weiteren für jede ein Parameterkonfiguration Bild eines charakteristischen Bauteils verwendet. Als Vergleichsansicht wird jeweils die Vorderansicht der quaderförmigen Proben gewählt. Die Bilder werden auch zur Bestimmung der Höhe des Bauteils verwendet. Die Messung erfolgt jeweils in Mitte des Bauteils. Für die Bestimmung der Bauteilhöhe werden für jede der Parameterkonfiguration die vier gefertigten Bauteile verwendet.

### Bestimmung der relativen Bauteildichte

Da bisher keine standardisierte Methode zur Bestimmung der relativen Dichte von Bauteilen, die mittels MJT hergestellt werden, existiert, erfolgt die Bestimmung auf Basis der Methode nach der VDI 3405-2, die sich auf additiv gefertigte Metallbauteile, die mittels Laserstrahlschmelzen im Pulverbett hergestellt werden, bezieht. Die relative Bauteildichte kann an den ungeätzten

Schliffbildern mittels Bildanalyse ermittelt werden. Die Eignung der dieser Methode wurde bereits von Himmel (2020) für Aluminiumbauteile, die im MJT Verfahren hergestellt wurden, nachgewiesen. Für jede Parameterkonfiguration werden die beiden Enden der vier Bauteile verwendet, sodass sich eine Gesamtzahl von acht Proben pro Konfiguration ergibt. Der Vergleich der relativen Bauteildichte erfolgt anhand der berechneten Mittelwerte. Da die relative Bauteildichte stark von der gewählten Position der entnommenen Probe abhängt, wird zusätzlich eine Dichtebestimmung nach dem archimedischen Prinzip durchgeführt. Diese Methode wird auch in der VDI 3405-2 empfohlen. Hierfür werden die hergestellten Rundzugproben verwendet. Die Tendenz der Ergebnisse ist bei beiden Prüfverfahren identisch, weshalb im Folgenden die Werte, die durch die optische Untersuchung der Schliffbilder ermittelt wurden, verwendet werden.

#### Untersuchung des Werkstoffgefüges

Das Werkstoffgefüge und die Tropfenanbindung werden anhand der eingebetteten Enden der Proben, die zuvor zur Bestimmung der relativen Bauteildichte verwendet werden, untersucht. Zu diesem Zweck wird die polierte Probenoberfläche mit Eisenchlorid für 15 s geätzt. Anschließend wird die Probe mit dem Auflichtmikroskop Axioplan 2 aufgenommen. Zum Vergleich der bei unterschiedlichen Parametern hergestellten Bauteile wird für jede Parameterkonfiguration wieder ein charakteristisches Bauteil ausgewählt. Die Korngröße wird ebenfalls mit dem Auflichtmikroskop nach dem Verfahren nach ASTM E 112 - 13 bestimmt. Für die Bestimmung der durchschnittlichen Korngröße wird eine Komponente pro Parameterkonfiguration ausgewählt. Pro Schliff werden drei Messungen durchgeführt.

#### Mechanische Charakterisierung

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der gedruckten Bauteile werden quasistatische Zugversuche mit einer Dehnrate von 2,5 ×  $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> durchgeführt. Hierfür werden Rundzugproben mit einem Durchmesser von 3 mm und einer parallelen Länge von 18 mm verwendet. Für jede Parameterkonfiguration werden vier Proben getestet. Während des Zugversuchs werden die Kraft-Weg-Kurven aufgezeichnet, aus denen die Zugfestigkeit und die Gleichmaßdehnung für jede Probe bestimmt werden. Der Vergleich der bei unterschiedlichen Parametern hergestellten Proben erfolgt anhand der arithmetischen Mittelwerte der ermittelten Kennwerte.

### Untersuchung der Bruchflächen

Nach dem Zugversuch werden die entstandenen Bruchflächen mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Auch hier werden charakteristische Bauteile für die einzelnen Parameterkonfigurationen ausgewählt und die Bruchflächen verglichen.

### 7.3.2 Einfluss der Druckfrequenz

Eine weitere Stellgröße, welche die eingebrachte thermische Energie pro Zeit beeinflusst, ist die Frequenz der Tropfenablage. Hohe Druckfrequenzen führen zu mehr eingebrachter Energie pro Zeit und damit zu lokal höheren Substrattemperaturen. Überschreitet die Substrattemperatur den Schmelzpunkt bzw. die Solidustemperatur des Bauwerkstoffs kommt es zum erneuten Aufschmelzen des bereits abgelegten Materials. Das kann zur Zerstörung des Bauteils führen. Um den Einfluss der Druckfrequenz zu untersuchen, werden säulenförmige Bauteile aus technisch reinem Kupfer Cu-ETP bei unterschiedlichen Frequenzen und Bauplattformtemperaturen hergestellt. Die Säulen bestehen aus zehn übereinander abgelegten Tropfen. Die variierten Druckfrequenzen und Bauplattformtemperaturen sind in Tabelle 7-2 aufgeführt.

Tabelle 7-2: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Druckfrequenz.

Parameter	Symbol	Wert
Druckfrequenz	f	10 Hz, 20 Hz, 30 Hz
Bauplattformtemperatur	<b>T</b> Plattform	750 °C, 850 °C, 950 °C, 1050 °C

Es werden drei verschiedene Druckfrequenzen und vier Bauplattformtemperaturen mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans untersucht. Dadurch ergeben sich insgesamt 12 Parameterkonfigurationen. Die Charakterisierung der Bauteile erfolgt anhand von Lichtbildaufnahmen und mittels des Vergleichs der Bauteilhöhen.

# 8 Ergebnisse

# 8.1 Material für Düse und Tiegel

Die Ergebnisse der Identifikation geeigneter Materialien für die Düse und den Tiegel des Druckkopfs zur Verarbeitung von Kupferwerkstoffen werden in folgendem Kapitel dargestellt.

# 8.1.1 Düsenmaterial

In Tabelle 8-1 sind die Düsen aus den sechs untersuchten Werkstoffen dargestellt. Die Bewertung erfolgt anhand der optischen Gegenüberstellung der Düsen im Neuzustand, nach dem Tropfenerzeugungsversuch und nach der Reinigung der Düse, um diese erneut im Druckkopf verwenden zu können.

Tabelle 8-1: Untersuchte Düsen im Neuzustand, nach der Versuchsdurchführung und nach der Reinigung.

Werkstoff	Neuzustand	Nach Versuch	Nach Reinigung
Magnesium stabilisiertes Zirkonoxid	•	•	Entfällt, da keine stabile Tropfen- erzeugung möglich ist.
Elektrisch leitfähiges Siliziumnitrid		. 2007	Entfällt, da keine stabile Tropfen- erzeugung möglich ist.
Macor®	•		Entfällt, da Düse deutliche Veränderungen aufweist.
Standard Siliziumnitrid	•		*
Bornitrid			



Mit der Düse aus Magnesium stabilisiertem Zirkonoxid können auch für hohe Drücke und Ventilöffnungszeiten keine Tropfen ausgegeben werden. Das nach dem Versuch im Tiegel verbleibende erstarrte Baumaterial lässt sich nach der Demontage des Druckkopfs nicht von der Düse lösen. Die Ursache hierfür ist auf eine Benetzung des Düsenmaterials durch die Reinkupferschmelze zurückzuführen. Das untersuchte Material eignet sich aufgrund der nicht möglichen Tropfenerzeugung daher nicht als Düsenwerkstoff für die Verarbeitung von Reinkupfer.

Zu Beginn der Versuchsreihe können mit der Düse aus elektrisch leitfähigem Siliziumnitrid gleichmäßige Kupfertropfen erzeugt werden. Mit fortschreitender Einsatzdauer wird die Tropfenerzeugung zunehmend instabiler und es wird nicht mehr bei jedem Druckstoß ein Tropfen ausgegeben. Zudem unterscheiden sich die ausgegebenen Tropfen pro Druckstoß in Form und Anzahl voneinander. Im Anschluss an den Druckversuch weist die Düse eine deutliche Änderung in Farbe und Oberflächenstruktur auf. Zudem sind im Bereich, in dem das Düsenmaterial mit der Kupferschmelze in Kontakt gekommen ist, dunkle Ablagerungen zu erkennen. Die Ablagerungen führen zu einem Zuwachsen der Düsenbohrungsöffnung, worauf die zunehmende Instabilität der Aufgrund Tropfenerzeugung zurückzuführen ist. der zeitlichen Veränderung der Tropfenerzeugung ist das Material ungeeignet.

Mit der Düse aus Macor® können über die gesamte Dauer des Versuchs Tropfen ausgegeben werden. Dabei sind keine wesentlichen Änderungen in der Tropfenform und -anzahl pro Druckstoß festzustellen. Im Anschluss an den Versuch können die im Tiegel verbleibenden Kupferreste leicht von der Düse entfernt werden. An der Düse ist jedoch als Folge der hohen Temperatur eine deutliche plastische Verformung festzustellen. Die nicht vorhersagbare Änderung der Geometrie der Düsenöffnungsbohrung über die Zeit kann zu einer Veränderung der Tropfenerzeugung führen. Als Folge dessen ist Macor®, aufgrund der zu hohen Temperaturen ungeeignet.

Mit der Düse aus Standard Siliziumnitrid ist über den gesamten Versuchszeitraum eine stabile Tropfenerzeugung bei gleichbleibenden Parametern möglich. Bei dieser Düse kann die gesamte Kupferschmelze aus dem Tiegel ausgegeben werden. Die Düse aus Standard Siliziumnitrid weist nach dem Versuch eine farbliche Veränderung in dem Bereich auf, indem der Werkstoff mit der Kupferschmelze in Kontakt gekommen ist. Zudem sind vereinzelt Kupferrückstände vorhanden. Diese Rückstände können in einem ersten Schritt leicht mechanisch entfernt werden. Im Anschluss werden verbleibende Rückstände chemisch gelöst. Dazu wird die Düse in eine Lösung aus verdünnter Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid gelegt, bis das Kupfer vollständig entfernt ist. Nach der Reinigung weist die Düse eine glatte Oberfläche auf, wobei die Verfärbungen teilweise erhalten bleiben. In einem weiteren Versuch kann mit der wiederverwendeten Düse erneut gleichmäßige Tropfen erzeugt werden.

Auch mit der Düse aus Graphit können über den gesamten Versuchszeitraum Tropfen erzeugt werden. Zu Ende der Versuche kann die gesamte vorhandene Schmelze ausgegeben und der Tiegel entleert werden. An der Graphitdüse sind nach dem Versuch keine größeren

Kupferanhaftungen festzustellen. Eine Reinigung für einen erneuten Einsatz der Düse ist daher nicht notwendig. Infolge der hohen Temperatur und des vorhandenen Restsauerstoffs sind an einigen Stellen der Düse Oxidationserscheinungen festzustellen. Bei längerem Betrieb nimmt der Verschleiß an der Düse zu. Das Graphit brennt ab, was sich mit zunehmendem Einsatz nachteilig auf die Tropfenerzeugung auswirkt. Zur Reduktion der Oxidation der Düse und des Tiegels wird deshalb eine Flutung des Druckkopfs mit Stickstoff vorgesehen (vgl. Kapitel 6.1.2). Dadurch kann der Düsenverschleiß deutlich reduziert werden. Abbildung 8-1 veranschaulicht den Vorteil der Flutung des Druckkopfs.



Abbildung 8-1: Graphitdüsen links im Neuzustand, mittig nach 6 Stunden Einsatzzeit ohne Flutung und rechts nach 20 Stunden Einsatzzeit mit Flutung des Druckkopfs.

Die Düse aus hexagonalem Bornitrid zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Düse aus Graphit. Über den gesamten Versuchszeitraum können stabil Tropfen ausgegeben werden. Der Tiegel kann vollständig geleert werden und nach der Versuchsdurchführung sind anhaftende Kupferrückstände leicht von der Düse zu entfernen. Dadurch kann die Düse mehrfach verwendet werden. Wie auch bei der Düse aus Graphit ist eine sauerstoffreduzierte Atmosphäre nötig, um ein abbrennend des Werkstoffs zu reduzieren.

## **8.1.2 Tiegelmaterial**

In Abbildung 8-2 ist der Tiegel aus Magnesium stabilisiertem Zirkonoxid vor und nach der Versuchsdurchführung dargestellt.



Abbildung 8-2: Tiegel aus Magnesium stabilisiertem Zirkonoxid vor und nach der Versuchsdurchführung.

Seite 58 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21553N / 1

Der Tiegel aus Magnesium stabilisiertem Zirkonoxid kann auf die maximale Verarbeitungstemperatur von 1190 °C aufgeheizt werden. Im Anschluss wird der drahtförmige Kupferwerkstoff von oben in den Tiegel eingeführt und kann aufgeschmolzen werden. Durch die Bevorratung einer ausreichenden Menge an Schmelze können stabil Tropfen erzeugt werden. Nach dem Abkühlen wird der Druckkopf demontiert und der Tiegel entnommen. Dabei können Risse festgestellt werden. Die Ursache für die Risse ist auf den Temperaturschock infolge der hohen Heizrate der Heizelemente zurückzuführen. Eine erneute Verwendung des Tiegels wird aufgrund dieser Risse nicht vorgenommen. Daher wird der Werkstoff als nicht geeignet für den Tiegel charakterisiert.

Als weiterer Werkstoff für den Tiegel wird elektrisch leitfähiges Siliziumnitrid untersucht. Dieser Werkstoff enthält Zusätze, damit das eigentlich nichtleitende Siliziumnitrid elektrisch leitfähig wird. Dadurch kann dieser Tiegel auch induktiv aufgeheizt werden. Abbildung 8-3 zeigt die Tiegel vor und nach der Versuchsdurchführung.



10 mm

Abbildung 8-3: Tiegel aus elektrisch leitfähigem Siliziumnitrid vor und nach der Versuchsdurchführung.

Tiegel aus elektrisch leitfähigem Siliziumnitrid kann über Der Strahlung mittels Widerstandsheizelemente und induktiv auf die maximale Verarbeitungstemperatur von 1190 °C aufgeheizt werden. Mit dem Tiegel können Kupferwerkstoffe aufgeschmolzen und da der Werkstoff durch die Schmelze nicht benetzt wird, kann der Tiegel nach dem Versuch vollständig geleert und einfach gereinigt werden. Wird der Tiegel ohne Stickstoffflutung, d.h. in sauerstoffhaltiger Atmosphäre betrieben, können an der Oberfläche Oxidationserscheinungen beobachtet werden. Die sich bildende weiße Schicht kann durch Schleifen entfernt werden. Durch die Flutung des Bereichs um den Tiegel mit Stickstoff wird die Oxidation reduziert. Im Rahmen der Versuchsdurchführung konnte auch bei längerem bzw. wiederholtem Aufheizen des Tiegels kein wesentlicher Verschleiß festgestellt werden, der sich nachteilig auf die Tropfenerzeugung auswirkt.

Wie auch bei der Düse wird Graphit als potentieller Werkstoff für den Tiegel untersucht. Der Graphittiegel kann induktiv und über Strahlung auf die Verarbeitungstemperatur aufgeheizt werden. Der Bauwerkstoff kann aufgeschmolzen und Tropfen können ausgegeben werden. Nach der Versuchsdurchführung kann der Tiegel entleert werden. Eine Reinigung entfällt. Wird der Graphittiegel in sauerstoffhaltiger Atmosphäre betrieben, ist eine starke Oxidation festzustellen.

Die Oxidation kann zu Undichtigkeit und damit zur Unbrauchbarkeit des Tiegels führen, da kein Druckstoß mehr auf die Schmelze aufgebracht werden kann. Zudem besteht die Gefahr des unkontrollierten Ausfließens von Schmelze, wodurch Komponenten des Druckkopfs oder der MJT Anlage beschädigt werden können. Abbildung 8-4 zeigt einen Graphittiegel im Neuzustand und einen Tiegel, der in Folge der Oxidation im oberen Bereich ein Loch aufweist.



Abbildung 8-4: Tiegel aus Graphit vor und nach der Versuchsdurchführung mit und ohne Flutung des Druckkopfs.

Durch die Flutung des Druckkopfs mit Stickstoff kann der Graphittiegel deutlich länger betrieben werden, da das Abbrennen reduziert wird. Geringe Mengen an vorhandenen Restsauerstoff führen jedoch auch beim gefluteten Druckkopf zu Oxidation des Tiegels, weshalb dieser in regelmäßigen Abständen gewechselt werden muss.

### 8.1.3 Erkenntnisse Düsen- und Tiegelmaterial

Durch die Untersuchung verschiedener Werkstoffe konnten Materialien für Düse und Tiegel identifiziert werden, welche sich für die Erzeugung von Schmelzetropfen aus Kupfer bzw. Kupfer-Zinn-Bronze eignen. Als Werkstoffe für die Düse konnten Graphit, hexagonales Bornitrid und Standard Siliziumnitrid identifiziert werden. Im Rahmen der untersuchten Werkstoffe stellen Graphit und elektrisch leitfähiges Siliziumnitrid geeignete Werkstoffe für den Tiegel dar. Beide Werkstoffe können sowohl über Strahlung mittels Widerstandsheizelemente oder induktiv beheizt werden. Zur Reduktion der Oxidation ist insbesondere bei der Verwendung von Graphit eine sauerstoffreduzierte Atmosphäre nötig. Die weiteren Untersuchungen werden vorrangig mit Düsen und Tiegeln aus Graphit durchgeführt. Langzeitversuche mit anderen Werkstoffen wurden während der Projektbearbeitung nicht durchgeführt.

# 8.2 Tropfenerzeugung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Tropfenerzeugung vorgestellt. Zu Beginn werden der Einfluss der Ventilöffnungszeit und die Druckhöhe auf die Tropfenerzeugung betrachtet. Diese beiden Parameter stellen die wesentlichen Stellgrößen des Druckstoßes dar, durch deren Anpassung die Tropfenerzeugung während des Druckvorgangs beeinflusst werden kann. Im zweiten Teil des Kapitels erfolgt die Beschreibung weiterer während der Versuchsdurchführung identifizierter Einflussgrößen, welche zu Beginn des Druckvorgangs eingestellt und dann konstant gehalten werden müssen.

### 8.2.1 Einfluss von Ventilöffnungszeit und Druckhöhe

Abbildung 8-5 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung zur stabilen Tropfenerzeugung. In der Matrixdarstellung sind die Ventilöffnungszeit im Bereich von 500 µs bis 6000 µs und die Druckhöhe im Bereich von 100 mbar bis 3500 mbar dargestellt. Die einzelnen Kästchen zeigen jeweils eine Kombination der beiden Parameter. Die dunkelblau eingefärbten Kästchen zeigen die Parameterkombinationen, bei denen ein Tropfen pro erzeugten Druckstoß ausgegeben wird. Hellblaue Kästchen stellen die Kombinationen dar, bei denen zwei oder mehrere Tropfen ausgegeben werden. Die Parameterkonfigurationen, bei den die Anregung durch den Druckstoß nicht ausreicht um Tropfen auszugeben, sind grau dargestellt.





Mit zunehmender Ventilöffnungszeit ist eine Abnahme der Druckhöhe nötig, um eine stabile Tropfenerzeugung zu ermöglichen. Zudem ist festzustellen, dass mit steigender Ventilöffnungszeit das Intervall, in dem die Druckhöhe variiert werden kann, tendenziell kleiner wird. Anhand der Abbildung kann die Abhängigkeit von Ventilöffnungszeit und Druckhöhe festgestellt werden.

Bei Drücken von ca. 800 mbar bis 900 mbar kann die Ventilöffnungszeit zwischen 3000 µs und 6000 µs variiert werden, wobei die Tropfenerzeugung stabil bleibt. Um den Einfluss der Ventilöffnungszeit auf die Tropfengröße zu untersuchen, wird diese deshalb in diesem Intervall

variiert. Abbildung 8-6 zeigt den Zusammenhang von Ventilöffnungszeit und Tropfendurchmesser. Die Ermittlung des Durchmessers erfolgt anhand des Gewichts von zehn ausgegebenen Tropfen. Der Mittelwert des Tropfendurchmessers ist durch die Vierecke dargestellt. Zudem sind für jede der untersuchten Ventilöffnungszeiten die maximalen und minimalen Werte der Tropfendurchmesser abgebildet.



Abbildung 8-6: Berechneter Tropfendurchmesser in Abhängigkeit der Ventilöffnungszeit.

Mit steigender Ventilöffnungszeit kann eine Zunahme der Tropfengröße festgestellt werden. Bei der geringsten untersuchten Öffnungszeit von 3000  $\mu$ s beträgt der mittlere Tropfendurchmesser  $d_{\text{Tropfen}} = 0,99$  mm. Durch die Erhöhung der Ventilöffnungszeit auf 5000  $\mu$ s kann der Durchmesser der Tropfen auf  $d_{\text{Tropfen}} = 1,08$  mm vergrößert werden. Die Untersuchungen zeigen, dass durch eine Anpassung der Ventilöffnungszeit die Tropfengröße innerhalb eines begrenzten Bereichs beeinflusst werden kann.

### 8.2.2 Weitere Einflussgrößen auf die Tropfenerzeugung

Neben der beschriebenen Ventilöffnungszeit und Druckhöhe wird der Prozess der Tropfenerzeugung von weiteren Größen beeinflusst. Diese sollen im Weiteren kurz vorgestellt werden. Die quantitative Bewertung des Einflusses dieser Größen bedarf jedoch weiterer Untersuchungen und konnte im Rahmen der Projektbearbeitung nicht vorgenommen werden. Zur Durchführung der Versuche werden diese Größen auf Basis von Erfahrungswissen eingestellt und konstant gehalten.

### Pneumatisches System (Leitungssystem, Durchmesser der Tiegelbohrung)

Mit der vorhandenen MJT Anlage erfolgt die Tropfenerzeugung mittels eines pneumatischen Druckstoßes, daher hat das pneumatische System einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität der Tropfenerzeugung. Das pneumatische System umfasst alle Bauteile, durch die der Stickstoff während der Tropfenerzeugung fließt. Dazu gehören alle Leitungen, der obere Teil des Tiegels, der nicht mit Schmelze gefüllt ist und die Drossel zum schnellen Abbau des aufgebrachten Überdrucks. Der initial vom Magnetventil erzeugte Druckstoß durchströmt das Leitungssystem, um zum Druckkopf zu gelangen. Dabei wird der initiale Druckstoß gedämpft. Bei den Versuchen kann festgestellt werden, dass durch die Reduktion des Volumens des pneumatischen Systems die Stabilität der Tropfenerzeugung verbessert werden kann. Durch die Reduktion des Volumens

wird weniger Gas komprimiert und der initial vom Ventil erzeugte Druckstoß wird weniger stark verändert. Einen wesentlichen Beitrag zum Volumen des pneumatischen Systems stellt auch der obere Teil des Tiegels dar, der nicht mit Schmelze gefüllt ist. Für die Durchführung der Versuche wird deshalb ein Tiegel mit einem Innendurchmesser von 8 mm gewählt. Die Schläuche für das Leitungssystem haben einen Innendurchmesser von 4 mm und es wird versucht, den Abstand zwischen Ventil und Druckkopf möglichst kurz zu halten, damit die Schlauchlänge und damit das Volumen möglichst klein werden. Der aufgebrachte Druckstoß bewirkt die Ausgabe eines Tropfens aus der Düsenöffnungsbohrung und muss im Anschluss möglichst schnell wieder abgebaut werden, damit keine weitere Schmelze über die Düsenöffnungsbohrung ausgegeben wird. Im oberen Bereich des Druckkopfs ist deshalb eine Entlüftungsbohrung vorgesehen, um den Druckstoß wieder abzubauen. Der Durchmesser der Bohrung hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität der Tropfenerzeugung. Für die Durchführung der Versuche wird ein Durchmesser von 1,0 mm für die Entlüftungsbohrung vorgesehen.

### Druckfrequenz

Wie bereits beschrieben muss der aufgebrachte Druckstoß über die Düsenöffnungsbohrung wieder abgebaut werden. Ist der Druckstoß noch nicht vollständig abgebaut, d.h. das System wieder im Ausgangszustand, bevor der nächste Druckstoß durch das Magnetventil erzeugt wird, kann das zu einer unregelmäßigen Ausgabe von Tropfen führen. Bei den Versuchen kann festgestellt werden, dass mit dem vorhandenen System eine stabile Tropfenerzeugung bis 30 Hz möglich ist. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der maximalen Frequenz liegt in der Anpassung des pneumatischen Systems. Insbesondere durch die Anpassung des Durchmessers der Entlüftungsbohrung.

### Durchmesser Düsenöffnungsbohrung

Eine weitere Größe, die insbesondere Einfluss auf die Größe der ausgegebenen Tropfen hat, ist der Durchmesser der Düsenöffnungsbohrung. Größere Düsenbohrungsöffnungsdurchmesser führen dabei tendenziell zu Tropfen mit größeren Durchmessern. Wird der Durchmesser der Öffnungsbohrung zu groß gewählt, kann das zum Auslaufen der Schmelze führen. In Abhängigkeit des gewählten Durchmessers müssen die Parameter zur Tropfenerzeugung angepasst werden. Die Wahl des richtigen Düsenöffnungsbohrungsdurchmessers hängt maßgeblich von dem gewünschten Tropfendurchmesser, dem Werkstoff der Düse, dem Bauwerkstoff und weiteren Einflussgrößen wie der Temperatur der Schmelze und dem Tiegelfüllstand ab.

### Tiegelfüllstand

Der Füllstand des Tiegels beeinflusst zum einen das Volumen des pneumatischen Systems. Die Gesamtgröße des Tiegels wird durch die Konstruktion und dabei insbesondere durch die Abmessungen der Heizelemente vorgegeben. Aufgrund der Abmessungen der Siliziumkarbidheizleiter werden in den widerstandsbeheizten Druckköpfen Tiegel mit einer Länge von 67 mm verwendet. Abhängig vom Bauwerkstoff ist der Tiegel zwischen 20 mm und 30 mm gefüllt. Der restliche Teil des Tiegels ist mit Gas gefüllt, wobei dabei das Ziel verfolgt wird, ein möglichst geringes Gasvolumen zu generieren. Da im Ruhezustand keine Schmelze aus der Düsenöffnungsbohrung tropfen soll, ist die Höhe des Schmelzespiegels im Tiegel begrenzt. Zu hohe Füllstände führen in Folge des hydrostatischen Drucks in der Schmelze zum Auslaufen. Bei der Versuchsdurchführung kann festgestellt werden, dass bei höheren Tiegelfüllständen die Druckhöhe zur stabilen Erzeugung reduziert werden muss. Hohe Drücke und hohe

Tiegelfüllstände führen zur Ausgabe von mehr als einem Tropfen pro Druckstoß. Um gleichbleibende Ventilöffnungszeiten und Druckhöhen bei der Herstellung von Bauteilen verwenden zu können, wird der Füllstand des Tiegels konstant gehalten. Durch das Zuführen von Draht von oben in den Tiegel wird die Menge an ausgegebenem Material kompensiert.

#### Bauwerkstoff und Verarbeitungstemperatur

Die Legierungszusammensetzung des Bauwerkstoffs und dessen Verarbeitungstemperatur haben einen Einfluss auf die Oberflächenspannung und damit einen Einfluss auf die Parameter der Tropfenerzeugung. Mit steigender Temperatur sinkt der Wert der Oberflächenspannung ab. Als Folge werden niedrigere Drücke und Ventilöffnungszeiten zur Erzeugung von Tropfen benötigt. Ebenso sinkt die Oberflächenspannung von Kupferschmelze durch die Zugabe von Zinn. Bei der Verarbeitung von Kupfer-Zinn-Bronze werden daher tendenziell niedrigerer Ventilöffnungszeiten und Druckhöhen benötigt als bei der Verarbeitung von reinem Kupfer. Bei der Verarbeitung von Kupfer-Zinn-Bronze muss deshalb der Tiegelfüllstand abgesenkt werden, da bei zu hohen Füllständen ohne das Einwirken eines Druckstoßes Schmelze durch die Düsenöffnungsbohrung fließt.

#### Düsenmaterial und Beschaffenheit der Düsenkante

Ebenso wie unterschiedliche Legierungen die Parameter einer stabilen Tropfenerzeugung beeinflussen hat das Material der Düse und die Beschaffenheit der Kante der Düsenöffnungsbohrung einen Einfluss auf die Tropfenerzeugung. In Abbildung 8-7 sind die Parameterkombinationen aus Ventilöffnungszeit und Druckhöhe für eine stabile Tropfenerzeugung bei der Verarbeitung von Kupfer dargestellt. Die dunkelblauen Felder zeigen die passenden Parameterkonfigurationen für eine Graphitdüse mit Düsenbohrungsdurchmesser 500 µm. Die hellblauen Felder die Kombinationen für eine Düse aus Standard Siliziumnitrid mit gleichem Durchmesser.



Abbildung 8-7: Stabile Tropfenerzeugung: Vergleich einer Düse aus Graphit und Standard Siliziumnitrid.

Bei der Düse aus Standard Siliziumnitrid verschiebt sich das Prozessfenster der stabilen Tropfenerzeugung hin zu kleineren Druckhöhen. Zudem wird das Intervall, in dem die Druckhöhe bei gleichbleibender Ventilöffnungszeit variiert werden kann, tendenziell kleiner. Die Ursache hierfür ist auf die unterschiedlichen Benetzungseigenschaften der Kupferschmelze gegenüber Graphit bzw. Siliziumnitrid zurückzuführen.

Während der Versuchsdurchführung kann zudem festgestellt werden, dass die Beschaffenheit der Kante an der Austrittsöffnung der Düsenbohrung die Tropfenerzeugung beeinflussen kann. Bei zu geringer Flutung der Prozesskammer kann es durch den vorhandenen Restsauerstoff zum Abbrennen der Graphitdüse im Bereich der Düsenöffnungsbohrung kommen. Durch die Oxidation verrundet sich die Kante der Düse. Dadurch wird der Durchmesser der Düsenöffnungsbohrung lokal größer, was sich in einer veränderten Tropfenerzeugung wiederspiegelt. Da das Abbrennen oftmals nicht gleichmäßig erfolgt, kann es zur Erzeugung von Tropfen kommen, deren Flugbahn von der eigentlich gewollten, senkrecht zur Bauplattform liegenden Flugbahn abweicht. Die fehlerhafte Platzierung der Tropfen auf der Bauplattform kann zu Fehlstellen bzw. Materialanhäufungen im Bauteil führen. Einen ähnlichen Effekt wie das Abrennen der Düsen können fertigungsbedingte Ausbrüche der Düsenkante hervorrufen.

Um einen Einfluss der Beschaffenheit der Kante der Düsenöffnungsbohrung zu vermeiden, werden die Düsen vor der Versuchsdurchführung mittels des Digitalmikroskops Keyence VHX-2000 optisch untersucht. Durch eine ausreichende Flutung des Druckkopfs und der Prozesskammer kann zudem ein Abbrennen der Düsen und damit eine Veränderung der Kante der Düsenöffnungsbohrung weitestgehend verhindert werden.

## 8.2.3 Erkenntnisse der Tropfenerzeugung

Die stabile Erzeugung gleichbleibender Tropfen ist wesentlich bei der Herstellung von Bauteilen mittels Material Jetting. Da die Tropfenerzeugung von einer Vielzahl von Parametern abhängt, die sich teilweise gegenseitig beeinflussen, ist eine die Einstellung von Tropfengröße und Geschwindigkeit rein über die Variation von Druckhöhe und Ventilöffnungszeit nur eingeschränkt möglich. Zur Durchführung der Versuche werden möglichst viele Größen auf Basis von Erfahrungswissen festgelegt und konstant gehalten. Dabei wird der Fokus auf eine stabile Tropfenerzeugung gelegt, d.h. das pro Druckstoß ein Tropfen erzeugt wird, wobei der Tropfendurchmesser 1,0 mm betragen soll. Die Tropfengröße kann durch die Ventilöffnungszeit angepasst werden, wobei die Ventilöffnungszeit nur innerhalb eines eingeschränkten Bereichs unabhängig von der Druckhöhe gewählt werden kann. Diese Abhängigkeit ist tendenziell auf das verwendete pneumatische System, welches den Druckstoß erzeugt, zurückzuführen und daher anlagenspezifisch. Um einen quantitativen Zusammenhang zu erarbeiten, sind weitere Versuche nötig, welche den im Forschungsvorhaben veranschlagten zeitlichen Rahmen überschreiten würden.

## **8.3 Prozessuntersuchung**

In folgendem Kapitel werden die Ergebnisse der Prozessuntersuchung vorgestellt. Dabei erfolgt zu Beginn die Vorstellung der Ergebnisse der Untersuchungen des Einflusses der thermischen Prozessgrößen Tropfen- und Bauplattformtemperatur auf die Bauteilqualität. Im Anschluss wird auf die Ergebnisse der Untersuchungen zur Druckfrequenz eingegangen.

### 8.3.1 Einfluss der Bauplattform- und Tropfentemperatur

Der Einfluss der Tropfen- und Bauplattformtemperatur wird anhand der Charakterisierungsmethoden aus Kapitel 7.3.1 vorgestellt.

#### Optische Charakterisierung der Bauteiloberfläche

Abbildung 8-8 zeigt die Seitenansicht von neun Bauteilen, die bei den unterschiedlichen Tropfenund Bauplattformtemperaturen hergestellt werden. Innerhalb einer Zeile der Matrix sind die Bauteile dargestellt, welche bei gleicher Tropfentemperatur gedruckt werden. Innerhalb einer Zeile steigt die Plattformtemperatur von links nach rechts. Innerhalb einer Spalte erhöht sich die Tropfentemperatur von oben nach unten, während die Plattformtemperatur konstant bleibt.



Abbildung 8-8: Optische Untersuchung der Bauteiloberfläche nach Ploetz et al. (2023).

Die quaderförmige Geometrie ist für alle untersuchten Bauplattform- und Tropfentemperaturen erkennbar. Die Bauteillängen und –breiten unterscheiden sich nicht wesentlich für die verschiedenen Parameterkonfigurationen und entsprechen der vorgegebenen Geometrie. In der Bauteilhöhe ist eine Abweichung zu erkennen. Die Werte der Bauteilhöhe sind in Abbildung 8-9 dargestellt.



Abbildung 8-9: Ermittelte Bauteilhöhen in Abhängigkeit der untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (2023). In dieser Abbildung sind die drei untersuchten Bauplattformtemperaturen auf der Abszisse aufgetragen. Für jede untersuchte Bauplattformtemperatur sind die entsprechenden Mittelwerte der Bauteilhöhe der bei den drei untersuchten Tropfentemperaturen erzeugten Bauteile aufgetragen. Die entsprechenden Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung auf der Grundlage von vier Proben (n = 4). Mit zunehmender Temperatur der Bauplattform ist eine Abnahme der Bauteilhöhe zu beobachten. Eine Tendenz hinsichtlich des Einflusses der Tropfentemperatur ist nicht zu erkennen. Die geringste Bauteilhöhe wird für die Probe erreicht, die bei einer Tropfentemperatur  $T_{\text{Tropfen}} = 1190 \text{ °C}$  und einer Bauplattformtemperatur  $T_{\text{Plattform}} = 850 \text{ °C}$  hergestellt wird.

Darüber hinaus ist eine Abnahme der Anzahl der sichtbaren Poren auf der Bauteiloberfläche mit zunehmender Bauplattform- und Tropfentemperatur zu beobachten. Abbildung 8-10 zeigt auf der linken Seite die Oberfläche eines Bauteils, das bei  $T_{\text{Tropfen}} = 1090$  °C und  $T_{\text{Plattform}} = 650$  °C hergestellt wird. Die rechte Seite zeigt die Oberfläche eines Bauteils, das bei  $T_{\text{Tropfen}} = 1190$  °C und  $T_{\text{Plattform}} = 1090$  °C und  $T_{\text{Plattform}} = 1090$  °C und  $T_{\text{Plattform}} = 1190$  °C und  $T_{\text{Plattform}} = 850$  °C gefertigt wird. Beide Bilder zeigen die Draufsicht der Quader.



offene Porosität



Die Oberfläche des Bauteils auf der linken Seite der Abbildung zeigt Bereiche mit offener Porosität über die gesamte Oberfläche. Wird die Temperatur der Bauplattform erhöht, wird die Oberfläche gleichmäßiger und es sind weniger oberflächennahe Poren sichtbar. Die Oberfläche des Bauteils auf der rechten Seite der Abbildung weist keine sichtbaren Poren mehr auf.

### Bestimmung der relativen Bauteildichte

Neben der Bewertung der visuell sichtbaren Poren auf der Bauteiloberfläche soll auch die Porosität des gesamten Bauteils bewertet werden. Abbildung 8-11 vergleicht die relativen Bauteildichten anhand der Schliffbilder der bei verschiedenen Tropfen- und Bauplattformtemperaturen hergestellten Bauteile.



Abbildung 8-11: Ermittelte relative Bauteildichte in Abhängigkeit der untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (2023). Bei konstanter Tropfentemperatur ist ein Anstieg der relativen Bauteildichte mit steigender Temperatur der Bauplattform zu beobachten. Eine Zunahme der relativen Bauteildichte ist auch mit steigender Tropfentemperatur bei gleichbleibender Bauplattformtemperatur festzustellen. Die niedrigste relative Bauteildichte wird bei der Kombination aus der niedrigsten untersuchten Tropfentemperatur  $T_{Tropfen} = 1090$  °C und der niedrigsten Plattformtemperatur  $T_{Plattform} = 650$  °C erreicht und beträgt 94,1%. Diese Parameterkonfiguration hat auch den höchsten Wert für die Standardabweichung, was auf eine größere Streuung des Prozesses im Vergleich zu den anderen Parameterkonfigurationen hinweist. Die höchsten relativen Bauteildichten werden für die Bauteile erreicht, die bei einer Bauplattformtemperatur von  $T_{Plattform} = 850$  °C hergestellt werden. Die höchste relative Bauteildichte wird dabei bei der Parameterkombination  $T_{Tropfen} = 1140$  °C und  $T_{Plattform} = 850$  °C erzielt und beträgt 98,8%. Die Standardabweichung der relativen Bauteildichte ist am geringsten für die Proben, die bei einer Bauplattformtemperatur  $T_{Plattform} = 850$  °C gedruckt werden. Außerdem weichen bei dieser Bauplattformtemperatur die erreichten relativen Bauteildichte

#### Untersuchung des Werkstoffgefüges

Neben der Bauteildichte werden die Schliffbilder auch zur Analyse des Werkstoffgefüges und der Tropfenanbindung herangezogen. Zu diesem Zweck werden die eingebetteten Proben wie beschrieben geätzt. Abbildung 8-12 zeigt die neun geätzten Schliffbilder der Quader für die untersuchten Tropfen- und Bauplattformtemperaturen.



Abbildung 8-12: Werkstoffgefüge der bei variierten Temperaturen hergestellten Bauteile nach Ploetz et al. (2023). Mit zunehmender Tropfen- und Bauplattformtemperatur ist, wie bereits beschrieben, eine Abnahme der Poren im Bauteil zu beobachten. Darüber hinaus ist tendenziell eine Zunahme der

Korngröße feststellbar. Zum Vergleich der Korngröße wird die Korngrößenzahl *G* nach ASTM E 112 - 13 verwendet. Die Ergebnisse der Korngrößenbestimmung sind in Abbildung 8-13 dargestellt.



Abbildung 8-13: Korngrößennummer G in Abhängigkeit der untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (2023).

Auch auf das Werkstoffgefüge hat die Temperatur der Bauplattform einen stärkeren Einfluss als die Tropfentemperatur. Die bei niedrigeren Temperaturen hergestellten Bauteile weisen kleinere Korngrößen und teilweise Bereiche mit Gussgefüge auf. Insbesondere bei der Parameterkonfiguration  $T_{Plattform} = 650 \text{ °C}$  und  $T_{Tropfen} = 1090 \text{ °C}$  weist das Bauteil fast über den gesamten Querschnitt ein Gussgefüge auf. Mit steigender Temperatur sind nur noch wenige Bereiche mit Gussgefüge zu erkennen. Diese beschränken sich meist auf die oberste Schicht des Bauteils. Darüber hinaus ist bei niedrigeren Temperaturen der Bauplattform die Form der einzelnen Tropfen zu erkennen. Es gibt Bereiche, in denen trotz Kontakt keine Materialverbindung zwischen den Tropfen stattgefunden hat. Außerdem sind im Bereich der Grenzfläche zwischen zwei Tropfen oftmals Mikrolunker zu beobachten. Die bei höheren Temperaturen hergestellten Bauteile weisen fast über den gesamten Querschnitt ein rekristallisiertes Gefüge auf. Mit steigender Temperatur der Bauplattform ist eine Abnahme der Korngrößenzahl G und damit eine Zunahme der Korngröße zu beobachten. Bei den höheren Temperaturen sind die Grenzen zwischen den einzelnen Tropfen zumeist nicht mehr zu erkennen. Das Kornwachstum erfolgt hier über die Tropfengrenze hinweg, was in Form von Epitaxie beobachtet werden kann. Epitaxie findet auch bei niedrigeren Tropfen- und Bauplattformtemperaturen statt, allerdings weniger häufig. Abbildung 8-14 zeigt Epitaxie im Gussgefüge und in rekristallisierten Bereichen.



Abbildung 8-14: Vergleich von Gussgefüge und rekristallisiertem Gefüge nach Ploetz et al. (2023).

### Mechanische Charakterisierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung der gedruckten Probekörper, die mittels einachsiger Zugversuche durchgeführt werden, dargestellt. In Abbildung 8-15 sind die Ergebnisse des einachsigen Zugversuchs gegenübergestellt. Für jede Parameterkonfiguration werden vier Proben untersucht.



Abbildung 8-15: Ermittelte Zugfestigkeit in Abhängigkeit der untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (2023).

Sowohl eine Erhöhung der Bauplattformtemperatur als auch eine Erhöhung der Tropfentemperatur führen zu einem Anstieg der ermittelten Zugfestigkeiten. Die niedrigste Zugfestigkeit ergibt sich mit einem Wert von 103 MPa für die Parameterkonfiguration Tropfentemperatur  $T_{\text{Tropfen}}$  = 1090 °C und Bauplattformtemperatur  $T_{\text{Plattform}}$  = 650 °C. Durch die Erhöhung der Bauplattformtemperatur auf T<sub>Plattform</sub> = 850 °C, bei der niedrigsten gewählten Tropfentemperatur von  $T_{\text{Tropfen}} = 1090 \text{ °C}$ , wird die Zugfestigkeit auf 291 MPa erhöht. Die höchste bei Bauteilfestigkeit wird der höchsten untersuchten Temperaturkombination von Tropfentemperatur T<sub>Tropfen</sub> = 1190 °C und Bauplattformtemperatur T<sub>Plattform</sub> = 850 °C erreicht. Die Festigkeit bei dieser Parameterkonfiguration beträgt 330 MPa und ist damit etwa dreimal so hoch wie bei der niedrigsten Temperaturkombination.

Abbildung 8-16 zeigt die im Zugversuch ermittelten Gleichmaßdehnungen A<sub>g</sub>.



Abbildung 8-16: Ermittelte Gleichmaßdehnung in Abhängigkeit der untersuchten Parameter nach Ploetz et al. (2023). Analog zu den Werten der Zugfestigkeit ist ein Anstieg der erreichten Gleichmaßdehnungen mit zunehmender Tropfen- und Bauplattformtemperatur zu beobachten. Die erreichten Werte reichen von  $A_g = 0,5\%$  für die Parameterkombination Tropfentemperatur  $T_{\text{Tropfen}} = 1090$  °C und Bauplattformtemperatur  $T_{\text{Plattform}} = 650$  °C bis zu  $A_g = 54,0\%$  bei der gewählten Tropfentemperatur  $T_{\text{Tropfen}} = 1190 \text{ °C}$  und der Temperatur der Bauplattform  $T_{\text{Plattform}} = 850 \text{ °C}$ . Der stärkere Einfluss der Bauplattformtemperatur auf die mechanischen Eigenschaften zeigt sich deutlich anhand der Werte der Gleichmaßdehnung. Bei der höchsten gewählten Tropfentemperatur  $T_{\text{Tropfen}} = 1190 \text{ °C}$ und der Bauplattformtemperatur  $T_{\text{Plattform}} = 650 \text{ °C}$  liegt der Wert der Gleichmaßdehnung bei 9,4%. Eine Erhöhung der Bauplattformtemperatur auf  $T_{\text{Plattform}} = 850 \text{ °C}$  unter Verwendung der niedrigsten Tropfentemperatur  $T_{\text{Tropfen}} = 1090 \text{ °C}$  führt dagegen zu einem Anstieg der Gleichmaßdehnung auf 33,2%.

#### Untersuchung der Bruchflächen

Abbildung 8-17 zeigt die REM Aufnahmen der Bruchflächen von drei Proben, die bei unterschiedlichen Bauplattformtemperaturen hergestellt werden. Für die Herstellung der Bauteile wird die Tropfentemperatur auf  $T_{\text{Tropfen}} = 1190$  °C eingestellt. Die Temperatur der Bauplattform wird in den drei dargestellten Stufen variiert.



Abbildung 8-17: REM Aufnahme der Bruchflächen in Abhängigkeit der Bauplattformtemperatur nach Ploetz et al. (2023). Mit steigender Temperatur der Bauplattform weist die Bruchfläche eine zunehmend homogenere Struktur auf. Die Bruchfläche des links abgebildeten Bauteils, das bei einer Temperatur der Bauplattform von  $T_{Plattform} = 650$  °C hergestellt wird, zeigt Bereiche, in denen die neu abgelegten Tropfen nicht mit dem bereits abgelegten Substrat verschmolzen sind. In diesen Bereichen sind die glatten, welligen Oberflächen der Tropfen zu sehen. Nur in vereinzelten Bereichen, meist an der Oberseite der Tropfen, bilden die neu abgelegten Tropfen eine Verbindung mit dem Substrat. Diese Bereiche nehmen mit steigender Bauplattformtemperatur zu. Die Bruchfläche des rechts abgebildeten Bauteils, das bei einer Bauplattformtemperatur von  $T_{Plattform} = 850$  °C hergestellt wird, zeigt eine bienenwabenartige Bruchfläche nahezu über den gesamten Querschnitt. In diesen Bereichen ist eine kohäsive Bindung der Tropfen festzustellen.

Abbildung 8-18 zeigt die Bruchflächen der Bauteile, die bei konstanter Bauplattformtemperatur  $T_{\text{Plattform}} = 850 \text{ °C}$  bei den drei variierten Tropfentemperaturen hergestellt werden.



Abbildung 8-18: REM Aufnahme der Bruchflächen in Abhängigkeit der Tropfentemperatur nach Ploetz et al. (2023). Bei dieser Bauplattformtemperatur ist nur ein geringer Einfluss der Tropfentemperatur auf die Ausprägung der Tropfenanbindung zu erkennen. Bei allen Proben ist fast über die gesamte Bruchfläche eine wabenartige Struktur zu erkennen. Insbesondere bei den Tropfentemperaturen  $T_{\text{Tropfen}} = 1090$  °C und  $T_{\text{Tropfen}} = 1140$  °C gibt es noch Bereiche, in denen die glatte Tropfenoberfläche beobachtet werden kann. Aufgrund der besseren Anbindung der Tropfen zieht sich die Rundzugprobe stärker zusammen, bevor es zum Bruch der Probe kommt. Infolgedessen wird eine Verringerung des Querschnitts beobachtet. Die gewellte Oberfläche am Rand des Probenquerschnitts ist auf die spanende Nachbearbeitung zurückzuführen.

### 8.3.2 Einfluss der Druckfrequenz

Abbildung 8-19 zeigt exemplarisch bei Druckfrequenzen von 10 Hz, 20 Hz und 30 Hz hergestellte säulenförmige Bauteile aus Cu-ETP bei einer Bauplattformtemperatur von  $T_{Plattform} = 950$  °C. Die Bauteile der anderen untersuchten Bauplattformtemperaturen weisen eine ähnliche Tendenz auf.



Abbildung 8-19: Bei unterschiedlichen Druckfrequenzen hergestellte säulenförmige Bauteile.

Zur Bewertung des Einflusses der Druckfrequenz wird die Höhe der Bauteile ermittelt. Abbildung 8-22 zeigt jeweils die gemittelten Höhen der Bauteile für die untersuchten Bauplattformtemperaturen und Druckfrequenzen. Zudem sind die maximal und minimal erreichten Bauteilhöhen der vier gemessenen Bauteile dargestellt.


Abbildung 8-20: Gegenüberstellung der Höhe von säulenförmigen Bauteilen für variierte Druckfrequenzen und Bauplattformtemperaturen.

Mit steigender Bauplattformtemperatur ist eine Abnahme der Bauteilhöhe festzustellen. Durch die höheren Substrattemperaturen schmilzt die säulenförmige Struktur wieder auf und es bildet sich ein großer Tropfen an der Spitze der Säule (vgl. Abbildung 8-19Abbildung 8-20). Dadurch weisen die Bauteile mit zunehmender Bauplattformtemperatur eine geringere Höhe auf. Der Einfluss der Bauplattformtemperatur konnte bereits anhand der Untersuchungen in Kapitel 8.3.1 festgestellt werden. Eine Abnahme der Bauteilhöhe kann auch mit steigender Druckfrequenz beobachtet werden. Durch die höhere Frequenz wird mehr Energie pro Zeit in das Bauteil eingebracht. Dadurch erhöht sich lokal die Substrattemperatur. Reicht die Zeit zwischen der Ablage der einzelnen Tropfen nicht aus, um ausreichend Wärme über das Substrat abzuführen, wird lokal der Schmelzpunkt des Werkstoffs überschritten und gedruckte Bauteilbereiche schmelzen erneut auf.

#### 8.3.3 Erkenntnisse der Prozessuntersuchung

Die durchgeführten Prozessuntersuchungen zeigen, dass die thermischen Verhältnisse während der Tropfenablage die Tropfenanbindung und damit die Bauteilqualität wesentlich beeinflussen. Die Bauplattformtemperatur zeigt dabei einen dominanteren Einfluss auf die Qualität der Tropfenanbindung und die mechanischen Eigenschaften der Bauteile im Vergleich zur Tropfentemperatur. Die Untersuchungen zur Druckfrequenz zeigen, dass eine zu hoch gewählte Frequenz zum erneuten Aufschmelzen und damit zum Kollabieren der bereits gedruckten Geometrie führen kann. Anhand der Versuche konnten die in Kapitel 3.2 aufgestellten Forschungshypothesen bestätigt werden. Zudem konnten geeignete Parameter für die Herstellung von Bauteilen aus Kupfer und Kupfer-Zinn-Bronze mittels MJT identifiziert werden. Abbildung 8-21 zeigt einige im Rahmen des Projekts hergestellte Bauteile.



Abbildung 8-21: Mittels MJT hergestellte Bauteile aus Kupfer und Kupfer-Zinn-Bronze.

### **8.4 Slicer Software**

Um eine vereinfachte Generierung der G-Code-Befehle zur Steuerung der MJT-Anlage zu erhalten, wird ein anlagenspezifischer Slicer entwickelt. Die Erstellung der G-Code-Befehle erfolgt in einem ersten Schritt unter Verwendung der Open-Source Slicer Software Ultimaker Cura der Firma Ultimaker. Die Slicer Software Ultimaker Cura ist für Fused-Deposition-Modeling (FDM) Anwendungen konzipiert und kann daher nicht direkt für das Slicing von Bauteilen für den MJT Prozess verwendet werden. Zur Weiterverarbeitung der Daten aus Ultimaker Cura wurde daher ein auf der Software Matlab beruhendes Programm entwickelt.

In Abbildung 8-22 ist der Generierungsprozess der G-Code-Befehle graphisch dargestellt.



Abbildung 8-22: Ablauf bei der Erstellung des anlagenspezifischen G-Codes auf Basis von CAD-Daten.

Ausgehend von einer stl. Datei, welche mittels unterschiedlicher CAD-Software erzeugt werden kann, erfolgt die Generierung der geometrischen Daten des zu druckenden Bauteils in der Slicer Software Ultimaker Cura. Die ausgegebene txt. Datei enthält den G-Code, der die linearen Fahrbewegungen während der Tropfenablage beschreibt. Zudem enthält die txt. Datei spezifische G-Code-Befehle für den FDM Prozess, welche während der Weiterverarbeitung der Datei in Matlab entfernt werden. Um während der Ablage der Tropfen eine konstante Geschwindigkeit der Bauplattform zu erhalten, wird dem eigentlichen Fahrweg ein Verzögerungsanteil hinzugefügt. Zudem werden Code Beschleunigungsund im anlagenspezifische Ventilöffnungszeit, Parameter wie die die Druckhöhe, die Zuführgeschwindigkeit des drahtförmigen Halbzeugs und die Geschwindigkeit der Fahrbewegungen hinzugefügt. Zur Reduktion der Aufbauzeit können die Geschwindigkeiten bei der Tropfenablage und bei einer Fahrbewegung ohne Tropfenablage unabhängig voneinander vorgegeben werden. Unter Verwendung des entwickelten anlagenspezifischen Slicers können einfache Geometrien ausgehend von einer CAD-Datei in einen für die Anlage lesbaren Code überführt werden.

#### **8.5 Prozesssimulation**

Um den Prozess virtuell abzubilden, wird eine numerische Simulation des MJT Prozesses aufgebaut. Wie bereits in Kapitel 7.3 zur Prozessuntersuchung beschrieben, haben die thermischen Verhältnisse während der Tropfenablage einen wesentlichen Einfluss auf die Bauteilqualität. Mit der aufgebauten Simulation können die im Bauteil während der Herstellung vorherrschenden Temperaturen abgebildet werden. Abbildung 8-23 zeigt exemplarisch die mit dem aufgebauten Simulationsmodell ermittelte Temperaturverteilung in einem Bauteil während des Druckprozesses. Tropfen werden bei einer Temperatur von  $T_{\text{Tropfen}} = 1190 \text{ °C}$  initialisiert. Die Temperatur der Bauplattform beträgt  $T_{\text{Plattform}} = 850 \text{ °C}.$ 





Das im Rahmen des Forschungsvorhabens verwendete Simulationsmodell basiert im Wesentlichen auf dem von Himmel et al. (2018) beschriebenen Modell zur Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen. Tropfen werden dabei durch Quader angenähert. Unter Verwendung einer Subroutine werden die Quader zu einem definierten Zeitpunkt initialisiert und dem bereits gedruckten Bauteil hinzugefügt.

Mittels des Simulationsmodells soll eine Abschätzung der Bauteilqualität auf Basis der Temperaturverteilung im Bauteil durchgeführt werden können. Um diese Aussagen treffen zu muss das Simulationsmodell validiert werden. Im können. Antrag wurden Validierungsmessungen unter Verwendung eines Pyrometers vorgesehen, welche bereits bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen verwendet wurden. Zur Messung der Temperatur des Tropfens während der Erstarrung und des Abkühlens muss die Oberfläche des Tropfens durch die Glasscheibe der Prozesskammer beobachtet werden. Während der Versuchsdurchführung konnten mittels Pyrometer keine Messungen in ausreichender Qualität erzielt werden. Die Ursache hierfür ist die Hintergrundstrahlung durch die glühende Bauplattform und die an der Unterseite des Druckkopfs angebrachte glühende Düse sowie Reflexionen, welche durch die Glasscheibe der Prozesskammer verursacht werden. Eine Messung ohne angebrachte Glasscheibe, wie es bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen durchgeführt wurde, ist hier nicht möglich, da durch die höheren Temperaturen die Düse des Druckkopfs abbrennt.

Als alternativer Ansatz wird versucht, eine Temperaturmessung des Tropfens taktil über ein Thermoelement durchzuführen. Hierfür wird die Messstelle eines Thermoelements knapp über der Bauplattform positioniert. Im Anschluss wird ein Tropfen aus der Düse des Druckkopfs ausgegebenen und versucht die Messstelle zu treffen. Abbildung 8-24 zeig die Versuchsdurchführung.



Abbildung 8-24: Versuch zur Messung der Temperatur eines Tropfens während der Erstarrung mittels Thermoelement. Die wesentliche Schwierigkeit besteht hierbei im satten Treffen der Messstelle des Thermoelements mit dem ausgegebenden Tropfen. Werden Tropfen leicht versetzt zur Messstelle abgelegt, treten Messfehler auf. Während der Versuchsdurchführung konnte ein sattes Treffen des Tropfens bisher nicht erreicht werden. Zur Messung der Temperaturen während der Erstarrung und Abkühlung des Tropfens sind weitere Ansätze und Versuche nötig, im welche Rahmen des Projektumfangs nicht durchgeführt werden konnten.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

#### Resümee

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde zu Beginn ein geeignetes System bestehend aus Druckkopf und beheizter Bauplattform für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen entwickelt. Dabei erfolgte die Auswahl von Heizelementen und geeigneter Materialien für den Tiegel und die Düse des Druckkopfs. Als geeignete Werkstoffe für den Tiegel konnten Graphit und elektrisch leitfähiges Siliziumnitrid identifiziert werden. Mögliche Werkstoffe für die Düse sind Graphit, Standard Siliziumnitrid und Bornitrid. Werden Bauteile aus Graphit verwendet, muss aufgrund der hohen Einsatztemperaturen eine sauerstoffreduzierte Atmosphäre im Umfeld der Komponenten erzeugt werden. Der entwickelte Druckkopf und die Bauplattform wurden zusammen mit einem Sauerstoffsensor in die am utg vorhandene MJT Anlage integriert. Im Anschluss wurden mit dem System Untersuchungen zur Tropfenerzeugung durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Dauer der Ventilöffnungszeit einen Einfluss auf die Tropfengröße hat. Größere Ventilöffnungszeiten führen dabei zu einer Zunahme der Tropfengröße. Während der Versuchsdurchführung hat sich gezeigt, dass die Ventilöffnungszeit und die Druckhöhe eine gegenseitige Abhängigkeit aufweisen. Unzureichend gewählte Parameterkombinationen führen zu einer instabilen Tropfenerzeugung, weshalb eine Einstellung der Tropfengeschwindigkeit über die Druckhöhe nicht unabhängig möglich ist. Mögliche unerwünschte Effekte sind dabei die Ausgabe von keinem oder mehreren Tropfen pro erzeugten Druckstoß. Dadurch können Fehler innerhalb einer Schicht verursacht werden, welche zum Ausschuss des Bauteils führen können. Während der Versuchsdurchführung konnte zudem festgestellt werden, dass Tropfenerzeugung von weiteren Parametern wie dem Tiegelfüllstand und dem pneumatischen System beeinflusst wird. Im Rahmen der Prozessuntersuchungen wurde insbesondere der Einfluss der thermischen Prozessgrößen auf die Bauteilqualität fokussiert. Es wurden quaderförmige Probekörper bei variierten Tropfen- und Bauplattformtemperaturen hergestellt. Im Anschluss erfolgte eine optische und mechanische Charakterisierung der Bauteile. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Temperatur der Bauplattform die Tropfenanbindung und das Werkstoffgefüge und damit die relative Bauteildichte, die Bauteiloberfläche und die mechanischen Kennwerte beeinflusst. Es konnten Bauteile mit einer maximalen Zugfestigkeit von 330 MPa und einer Gleichmaßdehnung von 54 % hergestellt werden. Im Vergleich zur Bauplattformtemperatur zeigte die Variation der Tropfentemperatur einen geringen Einfluss. Neben der Tropfen- und der Bauplattformtemperatur beeinflusst die Druckfrequenz die Tropfenanbindung. Hohe Frequenzen führen zum erneuten Aufschmelzen des bereits abgelegten Substrats. Dadurch kann auch bei niedrigeren Bauplattformtemperaturen ein Materialverbund hergestellt werden. Wird die Druckfrequenz zu hoch gewählt, kann durch das erneute Aufschmelzen die bereits gedruckte Geometrie jedoch auch zerstört werden. Zur vereinfachten Generierung von G-Code-Befehlen zur Steuerung der MJT-Anlage wurde ein anlagenspezifischer Slicer entwickelt. Ausgehen von einem CAD-Modell kann damit ein für die Anlage verständlicher G-Code erzeugt werden, wodurch die Zeit von der Konstruktion bis zum fertigen Bauteil reduziert werden kann. Um die thermischen Verhältnisse während der Bauteilherstellung zu untersuchen, wurde eine numerische Simulation des MJT Prozesses mit Kupferwerkstoffen aufgebaut. Das Modell verwendet dabei Quader zur Annäherung der Geometrie der einzelnen Tropfen. Zur Validierung des Modells sind weitere Untersuchungen nötig. Im Rahmen des Projekts wurde die prinzipielle Verarbeitbarkeit von Kupferwerkstoffen mittels MJT nachgewiesen.

#### Ausblick

Ein wesentliches Potential, das der MJT Prozess bietet, ist die Herstellung von Multimaterialbauteilen. Durch die Herstellung eines Bauteils Tropfen für Tropfen (Voxel für Voxel) bietet der MJT Prozess die Möglichkeit innerhalb einer Schicht das Material von Tropfen zu Tropfen zu ändern. Dadurch könnten innerhalb eines Bauteils filigrane Strukturen aus verschiedenen Werkstoffen kostengünstig hergestellt werden. Bei der Herstellung von Bauteilen mittels MJT wird die Tropfenanbindung und damit die Bauteilqualität wesentlich von der Temperatur der Bauplattform beeinflusst. Bei der Herstellung von Multimaterialbauteilen ist die maximale Bauplattformtemperatur jedoch durch den Schmelzpunkt bzw. die Solidustemperatur des niedrig schmelzenden Werkstoffs begrenzt. Besonders wenn Werkstoffe mit deutlich unterschiedlichen Schmelzpunkten verarbeitet werden sollen, kann das zu einer schlechten Tropfenanbindung führen. Die im Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse können hierbei genutzt werden.

# 10 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse insbesondere für KMU

Der MJT Prozess stellt eine potentielle Alternative zu derzeit etablierten additiven Verfahren, welche zumeist Laserquellen und pulverförmige Halbzeuge benötigen, dar. Durch die Verwendung vergleichsweise günstiger Anlagenkomponenten, einem kostengünstigen und leicht zu handhabenden Halbzeug (Draht) und hohen erreichbaren Aufbauraten bietet der MJT Prozess das Potential zur schnellen und kostengünstigen Herstellung von endkonturnahen Bauteilen. Derzeit sind bereits Anlagen zur Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen kommerziell verfügbar. Anlagen zur Verarbeitung von Werkstoffen mit höherem Schmelzpunkt sind gegenwärtig noch nicht zu erwerben. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse können den Entwicklungsprozess von Anlagen zur Verarbeitung von Kupferwerkstoffen mittels MJT unterstützen, um damit die Technologie schneller nutzbar zu machen.

Die gewonnenen Erkenntnisse können dabei zum einen von Anlagenherstellern und der Zulieferindustrie bei der Entwicklung von industriellen MJT Anlagen zur Verarbeitung von Kupferwerkstoffen genutzt werden. Insbesondere kleinere und mittlere Unternehmen aus dem Bereich der Zulieferindustrie können dabei durch die Nutzung der Ergebnisse potentiell Wettbewerbsvorteile entstehen.

Sind entsprechende Anlagen vorhanden, können die im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse Anlagenbetreiber bei der Herstellung von Bauteilen unterstützen. Insbesondere beim Bau von Prototypen, bei Kleinserien oder im Bereich der Reparatur und Instandsetzung kann der MJT Prozess genutzt werden. Die gewonnenen Ergebnisse können KMUs aus diversen Branchen wie der Gießerei- oder Elektroindustrie unterstützen, die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.

### Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und

### aktualisierten Transferkonzepts

Während der Projektbearbeitung konnten zwei wesentliche Herausforderungen identifiziert werden, welche weitere Entwicklungsaufwendungen benötigen, um den Prozess im industriellen Maßstab nutzen zu können.

Zum einen ist eine Verbesserung der Qualität der Bauteiloberfläche nötig, um die Bauteile für industrielle Anwendungen verwenden zu können. Das kann zum einen durch die Verwendung von kleineren Tropfen ermöglicht werden. Die derzeit vorhandenen industriellen Anlagen zur Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen nutzen kleinere Tropfen bei deutlich höheren Druckfrequenzen zur Herstellung von Bauteilen. Durch die kleineren Tropfen kann die Qualität der Bauteiloberfläche verbessert werden.

Ein weiterer Aspekt, der während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens aufgetreten ist, beschäftigt sich mit der Herstellung von Bauteilen mit komplexer Geometrie. Im Forschungsvorhabens konnten mittels MJT nur Bauteile mit vergleichsweise geringer Komplexität hergestellt werden. Überhänge und Hohlräume sind nur eingeschränkt herstellbar. Um Bauteile mit komplexer Geometrie fertigen zu können, muss deshalb ein geeignetes Konzept für Stützstrukturen entwickelt werden.

Der Transfer der im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse kann zum Lösungsprozess beitragen, um die Technologie schneller nutzbar zu machen. Der Ergebnistransfer erfolgt entsprechend der in Kapitel 12 aufgeführten Maßnahmen.

# 11 Verwendung der Zuwendungen

## Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die durchgeführten Tätigkeiten sind essenziell zur Entwicklung eines funktionsfähigen Systems, bestehend aus Druckkopf und beheizter Bauplattform zur Verarbeitung von Kupferwerkstoffen im Verfahren MJT. Zudem waren die durchgeführten Tätigkeiten notwendig, um den Verarbeitungsprozess zu erproben und Erkenntnisse bezüglich geeigneter Verarbeitungsstrategien zu identifizieren.

Die geleistete Arbeit entspricht im vollen Umfang den begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

#### Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

24 PM, 120.360,00 €

#### Übriges Fachpersonal (Einzelansatz A.2 des Finanzierungsplans)

15.978,60 €

Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)

57.510,00€

Ausgaben für die Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

keine

Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Keine

# **12 Plan zum Ergebnistransfer**

Während der Laufzeit des Projekts wurden vier Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses (PbA) abgehalten. Im Rahmen dieser regelmäßigen Sitzungen wurden die beteiligten Unternehmen über den aktuellen Stand des Forschungsprojekts informiert. Zudem wurde zusammen mit den Projektpartnern das weitere Vorgehen abgestimmt. Dabei konnten die Mitglieder des PbA aktiv an der Gestaltung der Projektziele mitwirken. Das erfolgte beispielsweise bei der Auswahl geeigneter Werkstoffe für den Tiegel, die Düse und die keramischen Isolierkomponenten für den Druckkopf, welche in Zusammenarbeit mit dem PbA festgelegt bzw. von den mitwirkenden Unternehmen gefertigt und zur Verfügung gestellt wurden.

Projektergebnisse wurden im Rahmen verschiedener Veranstaltungen wie der Hausmesse am *utg* oder der Copper Alloy 2022 einem breiten Publikum zur Verfügung vorgestellt. Des Weiteren erfolgte die Veröffentlichung von Ergebnissen im Rahmen von Beiträgen in Fachzeitschriften und Tagungsbändern. Auf der Homepage des Stifterverbands Metalle e.V. und des Lehrstuhl *utg* sind zudem Informationen zum Projekt veröffentlicht.

Ausgewählte Projektinhalte wurden in Vorlesungen und Praktika des Lehrstuhls *utg* integriert, um interessierten Studierenden die Potentiale und Grenzen des MJT Prozesses bei der Verarbeitung von Kupferwerkstoffen näher zu bringen.

In Tabelle 12-1 befindet sich ein Überblick der während der Projektlaufzeit durchgeführten Maßnahmen zum Transfer der Projektergebnisse.

Maßnahme A: Internetauftritt				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Bereitstellung zusammengefasster, schriftlicher Informationen zu den Zwischenständen	A1: Veröffentlichung der Problemstellung und der Zwischenergebnisse auf der Homepage des Lehrstuhls sowie auf der Homepage des Stifterverband Metalle e.V.	Die Informationen zu diesem Projekt können in kompakter Form auf der Homepage <u>www.utg.de</u> als PDF heruntergeladen werden. Auf der Homepage des Stifterverband Metalle e.V. stehen ebenfalls Informationen zur Verfügung.		
Maßnahme B: Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Vermittlung der Ergebnisse an Studierende durch Verzahnung von Forschung und Lehre sowie interessierte	B1: Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre Vorlesung "Gießereitechnik und Rapid Prototyping"	Sommersemester 2021, Sommersemester 2022, Sommersemester 2023		
Industrievertreter	B2: Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre Hochschulpraktikum "Gießereitechnik"	Sommersemester 2021, Wintersemester 2021/2022, Sommersemester 2022, Wintersemester 2022/2023 Sommersemester 2023		
	B3: Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre Vorlesung "Grundlagen der Entwicklung und Produktion"	Sommersemester 2021, Sommersemester 2022		

Tabelle 12-1: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Druckfrequenz

Maßnahme C: Projektbegleitender Ausschuss				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Fortlaufende Vorstellung	C1: Vorstellung der aktuellen	Februar 2021, Oktober 2021,		
der Forschungsergebnisse	Ergebnisse und Diskussion	Mai 2022, April 2023		
für die Mitglieder des PbA	des weiteren Vorgehens			
Maßnahme D: Weiterbildung/ Transfer in die Industrie über Fachveranstaltungen				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Information von Gästen des	D1: <i>utg</i> Hausmesse	Juli 2022		
utg				
Maßnahmen E: Veröffentlichungen				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Ergebnistransfer in die	E1: Präsentation eines	November 2021		
Wirtschaft	wissenschaftlichen Posters			
	im Rahmen des			
	Kupfersymposiums 2021			
	E2: Präsentation auf der	November 2022		
	Tagung "Copper Alloy 2022"			
	in Düsseldorf mit			
	Veröffentlichung im			
	Tagungsband			
	E3: Beitrag in der	März 2023		
	Fachzeitschrift: "Material			
	Science and Engineering: A"			

Nach dem Projektabschluss sind weitere Maßnahmen zur Ergebnistransfer geplant. Teilweise konnten diese bereits umgesetzt werden.

Die nach Projektabschluss bereits durchgeführten und die noch geplanten Transfermaßnahmen sind in Tabelle 12-2 dargestellt.

Tabelle 12-2: Verwendete Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Druckfrequenz

Maßnahme B: Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Vermittlung der Ergebnisse aus erster Hand an die Studierenden durch die enge Verzahnung von Forschung und Lehre am <i>utg</i>	B1: Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre Vorlesung: "Gießereitechnik und Rapid Prototyping"	Geplant: Sommersemester 2024		
	B2: Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre Hochschulpraktikum "Gießereitechnik"	Geplant: Wintersemester 2023/2024 Sommersemester 2024		
	B3: Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre Vorlesung "Einführung in die Produktionstechnik"	Geplant: Sommersemester 2024		
Maßnahme D: Weiterbildung/ Transfer in die Industrie über Fachveranstaltungen				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Information von Gästen des utg	D1: Aussteller auf der GIFA 2023	Juni 2023		
Information von Besuchern der GIFA 2023	D2: <i>utg</i> Hausmesse	Juli 2023		

Maßnahmen E: Veröffentlichungen				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Ergebnistransfer in die	E1: Präsentation auf dem	August 2023		
Wirtschaft	Symposium "Solid Freeform			
	Fabrication" in Texas (US)			
	mit Veröffentlichung im			
	Tagungsband			
	E2: Präsentation eines	Geplant: Nov. 2023		
	wissenschaftlichen Posters			
	im Rahmen des			
	Kupfersymposiums 2023			
Maßnahmen F: Transfer der Ergebnisse durch Forschungsvereinigung				
Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum		
Ergebnistransfer in die	F1: Veröffentlichung des	Festlegung durch		
Wirtschaft über den	Abschlussberichts	Stifterverband Metalle e.V.		
Stifterverband Metalle e.V.;				
Veröffentlichung des				
Abschlussberichts				

Ein Teil der aufgeführten Transfermaßnahmen nach Projektende konnte bereits umgesetzt werden. Im Rahmen der utg Hausmesse 2023 konnten interessierte Besucher Informationen bezüglich des MJT mit Kupferwerkstoffen erhalten. Auf der internationalen Gießerei Fachmesse 2023 (GIFA) wurden Projektergebnisse und mittels MJT hergestellte Kupferbauteile veröffentlicht. Ergebnisse des Projekts wurden zudem auf dem Symposium "Solid Freeform Fabrication 2023" in Austin, USA vorgestellt und im Tagungsband veröffentlicht. Aktuelle Projektergebnisse konnten in die Lehre aufgenommen und Studierenden im Rahmen von Vorlesungen und Praktika vorgestellt werden. Auch für die kommenden Semester ist die Aufnahme der erzielten Ergebnisse in ausgewählten Lehrveranstaltungen vorgesehen. Des Weiteren ist die Veröffentlichung der einer Präsentation eines wissenschaftlichen Posters Ergebnisse mittels auf dem Kupfersymposium 2023 geplant um das Fachpublikum für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen mittels MJT zu sensibilisieren. Ebenso soll die Veröffentlichung des Abschlussberichts zum weiteren Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft beitragen.

# **13 Förderhinweis**

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben "Additive Verarbeitung von Kupferwerkstoffen (Reinkupfer und Bronze) im Verfahren Material Jetting (MJT)" der Forschungsvereinigung Stifterverband Metall e.V. wurde unter der Fördernummer 21553 N über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

# **14 Literaturverzeichnis**

DIN EN ISO 17296-2 (2016), 2016: Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 2 Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe.

VDI 3405 (2014), 2014: Additive Fertigungsverfahren.

Ansell, Troy Y. (2021): Current Status of Liquid Metal Printing. In: *JMMP* 5 (2), S. 31. DOI: 10.3390/jmmp5020031.

Arnold, Bozena (2017): Kupferwerkstoffe. In: Bozena Arnold (Hg.): Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 175–185.

Bai, Yun; Williams, Christopher B. (2015): An exploration of binder jetting of copper. In: *RPJ* 21 (2), S. 177–185. DOI: 10.1108/RPJ-12-2014-0180.

Breuninger, Jannis (2013): Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Berlin, Heidelberg: Springer (SpringerLink Bücher).

CARL ZEISS MICROSCOPY GmbH (2006): AxioCam MRc 5. Digitale Freiräume. Jena.

Cummins, Gerard; Desmulliez, Marc P.Y. (2012): Inkjet printing of conductive materials: a review. In: *Circuit World* 38 (4), S. 193–213. DOI: 10.1108/03056121211280413.

Davis, Joseph R. (Hg.) (2001): Copper and copper alloys. ASM International. Materials Park, Ohio: ASM International (ASM specialty handbook).

Dehdari Ebrahimi, Navid; Ju, Y. Sungtaek (2018): Thermal conductivity of sintered copper samples prepared using 3D printing-compatible polymer composite filaments. In: *Additive Manufacturing* 24 (May), S. 479–485. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.025.

Deutsches Kupferinstitut (2003): BRONZE - unverzichtbarer Werkstoff der Moderne. Düsseldorf.

Deutsches Kupferinstitut (2004): Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Zinnbronzen): Informationsdruck i.25. Düsseldorf.

Deutsches Kupferinstitut (2023): Anwendungen. Online verfügbar unter https://kupfer.de/anwendungen/, zuletzt geprüft am 11.07.2023.

Dong, Bosheng; Pan, Zengxi; Shen, Chen; Ma, Yan; Li, Huijun (2017): Fabrication of Copper-Rich Cu-Al Alloy Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process. In: *Metall Mater Trans B* 48 (6), S. 3143–3151. DOI: 10.1007/s11663-017-1071-0.

Fang, M.; Chandra, S.; Park, C. B. (2009): Heat Transfer During Deposition of Molten Aluminum Alloy Droplets to Build Vertical Columns. In: *Journal of Heat Transfer* 131 (11), Artikel 112101, S. 62. DOI: 10.1115/1.3156782.

DIN 8580 (2022), Dezember 2022: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.

Freudenberger, Jens; Warlimont, Hans (2018): Copper and Copper Alloys. In: Hans Warlimont und Werner Martienssen (Hg.): Springer Handbook of Materials Data. Cham: Springer International Publishing (Springer Handbooks), S. 297–305.

Gebhardt, Andreas (2016): Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser; Ciando. Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok\_id/2203967.

Gibson, Ian (2021): Additive manufacturing technologies. Unter Mitarbeit von David Rosen, Brent Stucker und Mahyar Khorasani. 3rd edition. Cham: Springer. Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6455929.

GROB-WERKE GmbH & Co. KG (2022): Grob-Premiere auf der Formnext mit der GMP300. Online verfügbar unter https://www.additive-fertigung.com/bericht/lmp---liquid-metal-printing\_3384/grob-premiere-auf-der-formnext-mit-der-gmp300\_2022-11-13.

Gülcan, Orhan; Günaydın, Kadir; Tamer, Aykut (2021): The State of the Art of Material Jetting— A Critical Review. In: *Polymers* 13 (16), S. 2829. DOI: 10.3390/polym13162829.

Himmel, Benjamin (2020): Material Jetting of Aluminium. Analysis of a Novel Additive Manufacturing Process. 1. Auflage. München: TUM.University Press (Schriftenreihe Umformtechnik und Gießereiwesen, 21).

Himmel, Benjamin; Rumschoettel, Dominik; Volk, Wolfram (2019): Tensile properties of aluminium 4047A built in droplet-based metal printing. In: *RPJ* 25 (2), S. 427–432. DOI: 10.1108/RPJ-02-2018-0039.

Himmel, Benjamin; Rumschöttel, Dominik; Volk, Wolfram (2018): Thermal process simulation of droplet based metal printing with aluminium. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* 12 (3-4), S. 457–464. DOI: 10.1007/s11740-018-0819-y.

JEOL (Germany) GmbH: JSM-7500F Field Emission Scanning. Electron Microscope. Hg. v. JEOL (Germany) GmbH. Online verfügbar unter https://www.jeol.com/products/scientific/sem/JSM-7500F.php, zuletzt geprüft am 29.08.2023.

Jiang, Qi; Zhang, Peilei; Yu, Zhishui; Shi, Haichuan; Di Wu; Yan, Hua et al. (2021): A Review on Additive Manufacturing of Pure Copper. In: *Coatings* 11 (6), S. 740. DOI: 10.3390/coatings11060740.

KEYENCE CORPORATION (2012): Digitalmikroskop VHX-2000. Osaka.

DIN CEN/TS 13388 (2015): Kupfer und Kupferlegierungen.

Lee, Taik-Min; Kang, Tae Goo; Yang, Jeong-Soon; Jo, Jeongdai; Kim, Kwang-Young; Choi, Byung-Oh; Kim, Dong-Soo (2008): Drop-on-Demand Solder Droplet Jetting System for Fabricating Microstructure. In: *IEEE Trans. Electron. Packag. Manufact.* 31 (3), S. 202–210. DOI: 10.1109/TEPM.2008.926285.

Liu, Xiao; Wang, Haoren; Kaufmann, Kevin; Vecchio, Kenneth (2023): Directed energy deposition of pure copper using blue laser. In: *Journal of Manufacturing Processes* 85, S. 314–322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.11.064.

Maniruzzaman, Mohammed (Hg.) (2019): 3D and 4D Printing in biomedical applications. Process engineering and additive manufacturing. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527813704. Marscheider-Weidemann, Frank (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Auftragsstudie. Datenstand: Mai 2021; Aktualisierung im August 2021. Berlin: DERA (DERA Rohstoffinformationen, 50). Online verfügbar unter https://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\_Rohstoffinformationen/rohsto ffinformationen-50.pdf?\_\_blob=publicationFile&v=4.

Mohammadizadeh, Mahdi; Lu, Hao; Fidan, Ismail; Tantawi, Khalid; Gupta, Ankit; Hasanov, Seymur et al. (2020): Mechanical and Thermal Analyses of Metal-PLA Components Fabricated by Metal Material Extrusion. In: *Inventions* 5 (3), S. 44. DOI: 10.3390/inventions5030044.

Mohan, Denesh; Teong, Zee Khai; Bakir, Afifah Nabilah; Sajab, Mohd Shaiful; Kaco, Hatika (2020): Extending Cellulose-Based Polymers Application in Additive Manufacturing Technology: A Review of Recent Approaches. In: *Polymers* 12 (9), S. 1876. DOI: 10.3390/polym12091876.

Onuike, Bonny; Heer, Bryan; Bandyopadhyay, Amit (2018): Additive manufacturing of Inconel 718—Copper alloy bimetallic structure using laser engineered net shaping (LENS<sup>™</sup>). In: *Additive Manufacturing* 21 (May (5)), S. 133–140. DOI: 10.1016/j.addma.2018.02.007.

Orme, Melissa; Smith, Robert F. (2000): Enhanced Aluminum Properties by Means of Precise Droplet Deposition. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 122 (3), S. 484–493. DOI: 10.1115/1.1285914.

Ploetz, Maximilian; Kirchebner, Benedikt; Volk, Wolfram; Lechner, Philipp (2023): Influence of thermal process parameters on the properties of material jetted CuSn8 components. In: *Materials Science and Engineering: A* 871 (1), S. 144869. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144869.

Rayleigh (1878): On The Instability Of Jets. In: *Proceedings of the London Mathematical Society* s1-10 (1), S. 4–13. DOI: 10.1112/plms/s1-10.1.4.

Schulte, Fiona; Würtenberger, Jan; Steffan, Kay-Eric; Kirchner, Eckhard (2020): TRIZ als Schlüssel zu den Potentialen additiver Fertigungsverfahren. In: Roland Lachmayer, René Bastian Lippert und Stefan Kaierle (Hg.): Konstruktion für die Additive Fertigung 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Springer eBooks computer science and engineering).

Sicius, Hermann (2017): Kupfergruppe: Elemente der ersten Nebengruppe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Sinico, M.; Cogo, G.; Benettoni, M.; Calliari, I.; Pepato, A. (2019): Influence of Powder Particle Size Distribution on the Printability of Pure Copper for Selective Laser Melting. Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International.

Sriraman, M. R.; Babu, S. S.; Short, M. (2010): Bonding characteristics during very high power ultrasonic additive manufacturing of copper. In: *Scripta Materialia* 62 (8), S. 560–563. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.12.040.

Sukhotskiy, V.; Karampelas, I. H.; Garg, G.; Verma, A.; Tong, M.; Vader, S. et al. (2017): Magnetohydrodynamic Drop-on-Demand Liquid Metal 3D Printing. Unter Mitarbeit von The University of Texas at Austin.

Tropmann, A.; Lass, N.; Paust, N.; Metz, T.; Ziegler, C.; Zengerle, R.; Koltay, P. (2012): Pneumatic dispensing of nano- to picoliter droplets of liquid metal with the StarJet method for rapid prototyping of metal microstructures. In: *Microfluid Nanofluid* 12 (1-4), S. 75–84. DOI: 10.1007/s10404-011-0850-1.

Wieland-Werke AG (2021a): Wieland-B18. CuSn8 | C52100 | CW453K, 06.2021.

Wieland-Werke AG (2021b): Wieland-K32. Cu-ETP | C11000 | CW004A, 06.2021.

Wohlers, Terry; Campbell, Robert Ian; Diegel, Olaf; Huff, Ray; Kowen, Joseph (2019): Wohlers report 2019. 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates.

Yegyan Kumar, Ashwath; Wang, Jue; Bai, Yun; Huxtable, Scott T.; Williams, Christopher B. (2019): Impacts of process-induced porosity on material properties of copper made by binder jetting additive manufacturing. In: *Materials & Design* 182, S. 108001. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108001.

Zäh, Michael (Hg.) (2006): Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. München, Wien: Hanser (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446439573.

Zhong, Song-yi; Qi, Le-hua; Luo, Jun; Zuo, Han-song; Hou, Xiang-hui; Li, He-jun (2014): Effect of process parameters on copper droplet ejecting by pneumatic drop-on-demand technology. In: *Journal of Heat Transfer* 214 (12), S. 3089–3097. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.012.

Zuo, Hansong; Li, Hejun; Qi, Lehua; Zhong, Songyi (2016): Influence of Interfacial Bonding between Metal Droplets on Tensile Properties of 7075 Aluminum Billets by Additive Manufacturing Technique. In: *Journal of Materials Science & Technology* 32 (5), S. 485–488. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.03.004.

ZWICK GmbH (2015): Kalibrierschein, Kraft Nr.: 815577. Ulm.