

Integration von Sensoren in additiv gefertigte Metallbauteile

Maximilian Florian Binder

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy

Die Dissertation wurde am 04.10.2023 an der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 27.11.2023 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in Augsburg. Diese Zeit am Fraunhofer-Institut, wissenschaftlich betreut durch das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der TU München, war geprägt durch sehr lehrreiche Phasen sowie ein konstruktives und leistungsstarkes Umfeld, in welchem sowohl Freude am Arbeiten, als auch ein außerordentliches Maß an Motivation, Inspiration und Mut, neue Dinge zu erforschen, das Arbeiten sehr vielseitig und stets spannend gestaltet hat.

Mein Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, welcher mich während meiner Zeit am Institut durch das Promotionsverfahren geleitet hat, Prof. Dr.-Ing. Christian Seidel für den steten Austausch zu den Forschungsergebnissen im Projekt KINEMATAM, welches diese Arbeit maßgeblich geprägt hat, als auch Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth und Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und des Koreferats. Ich danke zudem Dr.-Ing. Matthias Schneck und Dr.-Ing. Christine Anstatt für die kritische Durchsicht der ausgefertigten Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen meinen Kollegen, insbesondere bei Matthias Schmitt, Max Horn und Fabian Herzer, für das gemeinschaftliche kritische Hinterfragen und Reflektieren von Ergebnissen und die gegenseitige Unterstützung während der Promotion bedanken. Dies gilt auch für die sportlichen Laufausflüge in der Mittagspause, welche das alltägliche Stressniveau nach unten und die Kreativität nach oben gelenkt haben. Mein weiterer Dank geht an alle Studierenden die vor allem praktische Arbeiten mit unterstützt haben, vor allem aber an Philipp Kindermann, Ludwig Kirchbichler, Raven Reisch, Cheechau Leong und Armin Rieser. Zudem gebührt mein Dank Kurt Hartmann, welcher durch seine Arbeiten in der Werkstatt die Bewältigung vieler konstruktiver Herausforderungen unermüdlich unterstützt hat.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Frau Alex, meiner Familie und meinen Freunden für ihre Unterstützung und das stetige Verständnis danken, welche die hohe zeitliche Einbindung der Ausarbeitung der Arbeit bedarf hat.

München, den 21.01.2024

Maximilian Binder

Geschlechtergerechter Sprachgebrauch

Geprägt durch öffentliche Diskussionen zu geschlechtergerechten Personenbezeichnungen, wird aktuell eine Vielzahl an Varianten des „Genderns“ im deutschen Sprachgebrauch genutzt: Doppelnennungen wie Kolleginnen und Kollegen, Nutzung von Schrägstrichen oder Klammern (Mitarbeiter/-innen oder Lehrer(innen)), Gendersterne (Student*innen) und andere Formen sind üblich. In dieser Arbeit sollen wissenschaftliche Ergebnisse im Vordergrund stehen und Sätze möglichst prägnant formuliert werden können. Um daher sperrige Formulierungen zu vermeiden, werden gleichermaßen sowohl feminine als auch maskuline Formen für die Bezeichnung von Personen verwendet. Die jeweilige Bezeichnung ist jedoch in allen Fällen geschlechtsübergreifend zu interpretieren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		i
Abkürzungsverzeichnis		v
Verzeichnis der Formelzeichen		ix
Definitionen		xiv
1 Einleitung		1
1.1 Motivation.....		1
1.2 Problemstellung und Handlungsbedarf		3
1.3 Zielsetzung.....		4
1.4 Aufbau der Arbeit		5
1.5 Methodische Vorgehensweise		7
2 Grundlagen		11
2.1 Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl		11
2.1.1 Verfahrensbeschreibung		11
2.1.2 Prozesskette		14
2.1.3 Prozessüberwachungsstrategien beim PBF-LB/M		14
2.1.4 Bauteilauslegung und Funktionsintegration		15
2.2 Elektrische Sensorsystemtechnik		16
2.2.1 Sensorarten.....		16
2.2.2 Elektrische Leiter und Isolatoren.....		25
2.3 Automatisierung der Produktion		26

3	Stand der Technik.....	28
3.1	Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen.....	28
3.1.1	Effektive Schichtstärke.....	28
3.1.2	Spritzerformation beim PBF-LB/M	29
3.1.3	Schutzgasströmung.....	31
3.1.4	Prozessunterbrechungen.....	31
3.2	Elektrische Elemente in additiv gefertigten Bauteilen.....	32
3.2.1	Einlegen von elektrischen und sensorischen Komponenten	33
3.2.2	Additive Fertigung von elektrischen Funktionsteilen	38
3.3	Werkstofftechnik Metall.....	38
3.4	Defizite des Stands der Technik.....	41
3.5	Fazit.....	44
4	Prozesskettenentwicklung und Sensorauswahl	45
4.1	Definition von Anforderungen und Rahmenbedingungen	45
4.2	Allgemeine Fertigungsprozesskette	47
4.3	Sensorauswahl	49
4.3.1	Ermittlung und Einordnung von Anforderungen an die Sensorik (PBF-LB/M-spezifisch).....	49
4.3.2	Auswahl bestehender Produkte	50
4.4	Sensorspezifische Prozesskette	52
4.5	Fazit.....	52
5	Manuelle Sensorintegration.....	55
5.1	Qualitative Analyse des Prozesses	55
5.2	Analyse der Prozessschritte und Lösungskonzepte.....	57

5.2.1	Pulverentfernung.....	57
5.2.2	Sensorpositionierung und -fixierung	64
5.2.3	Sensorsignalübertragung.....	66
5.2.4	Schutz vor Pulver und Temperatur	86
5.2.5	Verschluss der Kavität.....	93
5.2.6	Unterbrechungskompensation	94
5.3	Teilvalidierung durch Dehnungsmessstreifen-Integration	110
5.4	Fazit	114
6	Automatisierung der Sensorintegration	115
6.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen.....	116
6.2	Validierung durch Systemaufbau	118
6.2.1	Auswahl und Auslegung Endeffektor-System	119
6.2.2	Konfiguration der Kinematik.....	121
6.2.3	Steuerungssystem	125
6.3	Prozessvalidierung.....	127
6.3.1	Bestimmung der Positioniergenauigkeit.....	128
6.3.2	Automatisierter Integrationsablauf und zeitliche Evaluation	129
6.3.3	Umsetzung eines temperaturüberwachten Werkzeugdemonstrators	132
6.3.4	Prozessmonitoring und Qualitätssicherung	136
6.4	Fazit	139
7	Anwendung und Validierung	141
7.1	Realisierung von Anwendungsbeispielen.....	142
7.1.1	Ring mit integriertem RFID-Tag.....	142

7.1.2	Gaspedal mit integrierter Temperatur- und Kraftsensorik	144
7.1.3	Schwingungsüberwacher Strömungsrechen.....	145
7.1.4	Sensorüberwachtes Zahnrad.....	148
7.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	152
7.3	Fazit.....	159
8	Schlussbetrachtung.....	161
8.1	Zusammenfassung.....	161
8.2	Ausblick.....	163
9	Veröffentlichungsliste.....	167
10	Studienarbeiten.....	169
11	Literaturverzeichnis.....	171
12	Anhang.....	193

Abkürzungsverzeichnis

3-D	dreidimensional
A	AconityOne
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Bauteile
CAD	Computer-Aided Design
.cli	Common Layer Interface
CT	Computertomographie
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DL	Digital Level
DMS	Dehnungsmessstreifen
DoE	Design of Experiments
DS I/II	Descriptive Study I/II
DVI	Digital Visual Interface
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EK	Elektrische Kontaktierung
el.	elektrisch
EN	European Standards
ERP	Effective Radiated Power
ERP	Enterprise Resource Planning
FBG	Fibre-Bragg-Grating
GGW	Gleichgewicht
HF	High Frequency

HMI	Human Machine Interface
HT	Hochtemperatur
HV	Vickershärte
h	horizontal
IACS	International Annealed Copper Standard
ID	Innendurchmesser
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGCV	Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik
I/O	Input/Output
IQS	Integriertes Qualitätssicherungssystem
ISO	International Organization for Standardization
ITU	Internationale Fernmeldeunion
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
K1, K2	Kavität 1 und 2
K	Kinematik
KV	Kavitätsverschluss
LED	Light-Emitting Diode
LF	Low Frequency
MES	Machining Execution System
MIL STD	United States Military Standard
MMAM	Multi-Material Additive Manufacturing
MW	Mittelwert
nu	nicht unterbrochen

Off	keine Bauplattformheizung
OZ	Ordnungszustand
R	Remelting
RC	Research Clarification
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFID	Radio-Frequency Identification
RT	Raumtemperatur
PBF-EB/M	Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Elektronenstrahl
PBF-LB/M	Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl
P	(Bau-)Plattform
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PE	Pulverentfernung
PF	Position fixieren
PG	Positionierungsgrad
PM	Predictive Maintenance
PS	Prescriptive Study
PTC	Positive Temperature Coefficient
PZT	Blei-Zirkonium-Titanat
S	Sensor
SAW	Surface Acoustic Wave
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SdT	Stand der Technik

SE	Sensor einlegen
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
St.-Abw.	Standardabweichung
TCP	Tool Center Point
TP	Temperatur- und Pulverschutz
U	Unterbrechungsschicht
u	unterbrochen
UHF	Ultra High Frequency
UK	Unterbrechungskompensation
USB	Universal Serial Bus
v	vertikal
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VG	Verschmutzungsgrad
x, y, z	Raumrichtungen kartesisches Koordinatensystem

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_B	%	Bruchdehnung
A	mm^2	Fläche
A_g	%	Gleichmaßdehnung
$A_{\text{Kavität}}$	m^2	Kavitätsoberfläche
A_L	%	Lüdersdehnung
A_t	%	gesamte Dehnung
D	mm	Durchmesser des Leiters
DL	-	Digital Level (dimensionslose Zahl einer Thermografiemessung, welche von der Temperatur des beobachteten Körpers abhängt)
E_0	kV/cm	Durchschlagsfestigkeit
E_V	J/mm^3	Volumenenergiedichte
F_H	N	Horizontalkraft
F_V	N	Vertikalkraft
F_G	N	Saugkraft
H	$\text{dB}\mu\text{A}/\text{m}$	Magnetische Feldstärke
H_0	V/m	Amplitude des magnetischen Feldes
$K_{\text{AM-Bauteil}}$	€	Kosten AM-Bauteil
$K_{\text{AM-Sensorbauteil}}$	€	Gesamtkosten AM-Sensorbauteil
$K_{\text{Integration}}$	€	Sensorintegrationskosten
$K_{\text{Kinematik}}$	€	Kosten der Kinematik
K_{Maschine}	€	Maschinenkosten

Verzeichnis der Formelzeichen

K_{Personal}	€	Personalkosten
K_{Pulver}	€	Kosten Pulver
$K_{\text{Schutzgas}}$	€	Kosten des Schutzgases
K_{Sensor}	€	Kosten der Sensoren
L	m	Leiterlänge
\bar{O}_s	-	mittlere Orientierungsstreuung
P	W	Laserleistung
P_V	W/mm ³	durchschnittlicher Leistungsverlust
\bar{P}_s	-	Positionsstreuung
R	Ω	elektrischer Widerstand (ggf. Anfangswiderstand)
ΔR	Ω	Widerstandsänderung
R_0	Ω	Widerstand bei 0 °C
R_{20}	Ω/km	spezifischer Widerstand bei 20 °C und einer Leiterlänge von 1000 m
R_a	μm	Mittenrauwert
R_{eH}	N/mm ²	obere Streckgrenze
R_{eL}	N/mm ²	untere Streckgrenze
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
R_p	μm	mittlere Glättungstiefe
R_t	Ω	Widerstand bei der gemessenen Temperatur
R_z	μm	Rautiefe
S	-	Sicherheitsfaktor
T	°C	Temperatur
T_M	°C	Temperatur des Messobjekts/-mediums
T_{PBF}	°C	beim PBF-LB/M auftretende Temperaturen

T_s	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur des Sensors
ΔT_U	$^{\circ}\text{C}$	Temperaturänderung im Bauteil durch Prozessunterbrechung
U	V	Spannung
\bar{U}	-	mittlere Umkehrspanne

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung
f	Hz	Frequenz
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h	mm	Hatchabstand
h_b	mm	aktuelle Aufbauhöhe inklusive Bauplattformdicke
h_{Part}	mm	Höhe des Bauteils
$h_{\text{Plattform},n}$	mm	Position Bauplattformoberseite im Bauschacht
$h_{\text{ThSchicht}}$	μm	thermisch bedingte Höhenänderung pro Schicht
h_{ThSum}	μm	thermisch bedingte Höhenänderung insgesamt
k	-	Steigung / Messempfindlichkeit eines DMS / Verformungskoeffizient
k_{Dichte}	%	Dichtefaktor
k_t	-	Korrekturfaktor
l_A	mm	Anfangsmesslänge
l	mm	Länge des Leiters
Δl	mm	elastische Längenänderung
m	kg	Masse

Verzeichnis der Formelzeichen

m	-	Anzahl der Schichten nach Prozesswiederaufnahme
m_{Pulver}	g	Pulvermasse
n	-	Zähler natürlicher Zahlen, aktuelle Schichtnummer
p_{neg}	bar	Unterdruck
p_s	bar	Umgebungsdruck
SGGW	-	Schichtanzahl bis zur Wiederherstellung des thermischen Gleichgewichts
\bar{s}_j	-	mittlere Standardabweichung
t	μm	nominale / theoretische Pulverschichtdicke
t_z	s	Zeit
t_{50}, t_{63}, t_{90}	s	Zeitprozentkennwerte
t_{eff}	μm	Effektive Pulverschichtdicke
t_M	μm	resultierende Schichtdicke Vollmaterial
t_s	mm	Distanz durch das Metall
v	mm/s	Lasergeschwindigkeit
x, y, z	mm	Koordinaten
x_a	-	elektrische Zustandsgröße
x_e	-	nicht elektrische Zustandsgröße
$x_{\text{Hilfsvariable}}$	-	Hilfsvariable
x_j	-	Ort zur Messung der mittleren Positionsstreuung
y_K	-	y-Achse der Kinematik
z_{K1}	-	Erste z-Achse der Kinematik: Sauggreifer
z_{K2}	-	Zweite z-Achse der Kinematik: Absaugdüse

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	K^{-1}	Wärmeausdehnungskoeffizient
δ_E	mm	Eindringtiefe
δ	-	Toleranzwert
δ_{Bauteil}	%	Materialdichte des gefertigten Bauteils
δ_{Pulver}	%	Pulverschüttdichte
ε	%	Dehnung
η	-	Wirkungsgrad
λ	m	Wellenlänge
μ	$VsA^{-1}m^{-1}$	magnetische Permeabilität
μ_0	H/m	magnetische Feldkonstante
μ_r	H/m	materialabhängige relative Permeabilität
ρ	Ωm	spezifischer Widerstand
σ	S/m	elektrische Leitfähigkeit
σ_s	N/mm ²	mechanische Spannung

Definitionen

Begriff	Bedeutung
Automatisch (Selbsttätig)	Einen Prozess oder eine Einrichtung bezeichnend, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet (DIN IEC 60050-351). Automatisieren bezeichnet die einzusetzenden Mittel, um selbsttätige Funktionen in einem System zu ermöglichen.
Bauprozessunterbrechungen	Gemäß dem Fehlerkatalog VDI 3405 BLATT 2.8 (2021) ist eine Prozessunterbrechung das (ungeplante) Pausieren und Wiederaufnehmen des Bauprozesses. Dies kann mit Veränderungen der Schutzgasatmosphäre oder der Bauteiltemperatur verbunden sein. Ursachen für Bauprozessunterbrechungen können maschinen-, mitarbeiter- oder bauprozessbedingt sein.
Elektrische Komponenten	Gemäß IEC 60050 werden elektrische Bauelemente als wesentliche Bestandteile einer elektrischen Schaltung bezeichnet (bspw. Spule oder Widerstand). Die Bezeichnung elektrische Komponente (auch el. Bauteil genannt) steht in dieser Arbeit für Teile eines solchen el. Bauelements, aus welchem dieses zusammengesetzt ist (Draht, Spulenkörper, o. Ä.).
Konventionelle Fertigung	Alle Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580, die Additive Fertigung nicht eingeschlossen. Der Begriff „Konventionelle Fertigung“ soll der Abgrenzung zwischen „alten“ Verfahren und der Additiven Fertigung dienen.
Messgröße	Physikalische Größe, welche durch die Messung erfasst werden soll (DIN 1319-1 1995).
Montage	Montieren ist die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen und besteht im Wesentlichen aus Fügen, Handhaben, Kontrollieren und Justieren (in Anlehnung an VDI 2860).

Multi-Material Additive Manufacturing (MMAM)	Der Begriff Multi-Material Additive Manufacturing wird nach ISO TR 52912 verwendet, sobald im Prozess der Additiven Fertigung mehr als ein Material verarbeitet wird.
Pick&Place	Bezeichnet in dieser Arbeit das Aufnehmen und Ablegen von Sensoren in die anteilig additiv aufgebauten Bauteile. Der Vorgang kann manuell / händisch, aber auch durch einen Roboter durchgeführt werden. Neben Sensoren, könnten auch Komponenten wie Aktoren oder anderweitige Elemente eingelegt werden.
Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M)	Durch DIN EN ISO 52900 definierter Prozess der additiven Fertigung, in welchem Wärmeenergie gezielt Bereiche eines Pulverbetts schmilzt. Nach VDI 3405 im Deutschen auch als Laser-Strahlschmelzen bezeichnet.
Remelting	Begriff des PBF-LB/M: wiederholtes Belichten derselben Schicht ohne zwischenzeitliches Auftragen von Pulver.
RFID-Tag	RFID steht für Radio-Frequency Identification. Ein RFID-Tag, auch RFID-Transponder genannt, dient dem kontaktlosen Datenaustausch zwischen dem Tag und einem Schreib-/Lesegerät.
Sensor (Messgrößen-aufnehmer)	Teil eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung, der auf eine Messgröße unmittelbar anspricht (DIN 1319-1 1995). Ausnahme: im Rahmen dieser Arbeit werden passive RFID-Tags ebenso dem Begriff Sensor untergeordnet, obwohl diese keine Messgröße erfassen.
Smart Part	Bezeichnet in dieser Arbeit Strukturbauteile aus dem Maschinenbau, deren primäre Funktion es ist speziellen mechanischen Anforderungen zu entsprechen und deren Eigenschaften um elektrische Komponenten und Funktionen erweitert werden (vergleiche HOSSAIN (2017)).

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Fertigungstechnik steht im stetigen Wandel (BUGHIN ET AL. 2018) und unter hohem kundengetriebenen Druck: Der Bedarf nach einer kostengünstigen und flexiblen Produktherstellung wird zunehmend um die Forderung nach Individualisierung, Digitalisierung, Funktionsintegration und die automatisierte Herstellbarkeit von Bauteilen und Komponenten erweitert (SCHLAEPFER & RADOWITZ 2017). So versuchen aktuelle Forschungen und Entwicklungen diesen Ansprüchen zu begegnen und diese erfüllen zu können. Aufgrund der schnell zunehmenden Komplexität konzentriert sich die Industrie jedoch branchenabhängig auf ausgewählte Bereiche verstärkt, während andere weniger im Fokus stehen.

I) Bedarf der Automatisierung

In der Produktionstechnik besteht es ein hohes Interesse fertigungstechnische Abläufe zu automatisieren (HEINRICH ET AL. 2017). Dies hat eine Vielzahl an Gründen. Zum einen sind die Lohnkosten in Deutschland hoch und werden auch zukünftig steigen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2020). Damit der Produktionsstandort Deutschland gegenüber Schwellenländern mit geringeren Kosten konkurrenzfähig bleibt, ist ein zunehmender Automatisierungsgrad notwendig. Auch hohe Anforderungen an die Qualität und Reproduzierbarkeit gefertigter Komponenten lassen sich durch automatisierte Abläufe besser bewältigen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2021). Daher ist es das Ziel manuelle Montagevorgänge zunehmend zu verringern, welche mit einem hohen Personaleinsatz verbunden sind (LOTTER & WIENDAHL 2012). Im Umkehrschluss lässt sich daraus ableiten, dass eine aufwandsreduzierende und qualitätsorientierte Automatisierung von Fertigungsschritten erstrebenswert ist.

II) Bedarf an Prozess- und Bauteildaten

Als weiterer Trend in der Produktionstechnik steigt die Kundennachfrage nach digitalisierten Komponenten (ZIMMERMANN ET AL. 2021). Beispielsweise bedarf die Umsetzung einer vorausschauenden Wartung, besser bekannt unter dem englischen Begriff Predictive Maintenance (PM), stetiger Zustandsdaten des Bauteils (ZIMMERMANN ET AL. 2021, BINK & ZSCHECH 2018). Damit ist gut nachvollziehbar, dass die Sensorik und deren Integration in Komponenten die Wegbereiter für PM sind (DUSCHEK ET AL. 2017). Erkennen lässt sich der Bedarf auch an den stetig steigenden Umsätzen im Bereich der Sensorik, welche sich im Zeitraum zwischen

2009 und 2019 verdoppelt haben (AMA VERBAND FÜR SENSORIK UND MESSTECHNIK E.V. 2020). Insgesamt wird erwartet, dass in den nächsten Jahren Bauteile mit integrierter Sensorik von besonderem industriellen Interesse sein werden.

III) Bedarf an flexiblen Fertigungsverfahren

Zukünftig gilt es auch die Forderung nach flexiblen Fertigungsverfahren zu bedienen: die Anzahl an Produktanläufen ist stetig zunehmend (LOTTER & WIENDAHL 2012, SPATH 2013, WILDEMAN 2022) und die Individualisierung von Fabrikaten steht seit vielen Jahren im Fokus des Produktmarkts (REINHART & ZÄH 2003, SPALLEK & KRAUSE 2017, KRAUSE & GEBHARDT 2018). Zudem muss in diesem Kontext eine schnelle Umsetzbarkeit von Entwicklungsadaptionen gewährleistet werden, (SPATH 2013) sowie die Realisierbarkeit von steigenden Bauteilkomplexitäten (ZIMMERMANN ET AL. 2021). Die Additive Fertigung (AM) kann als innovatives Fertigungsverfahren den genannten Anforderungen gerecht werden. Da das Verfahren des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) industriell für die Verarbeitung von Metall am weitesten verbreitet ist (ROLAND BERGER GMBH 2013, MUNSCH ET AL. 2021), wird sich im Rahmen dieser Arbeit auf dieses Verfahren konzentriert.

Betrachtet man die genannten Entwicklungen in ihrer Kombination (vgl. Abbildung 1) ergibt sich für die Zielstellung der Arbeit die automatisierte Integration von Sensoren beim PBF-LB/M.

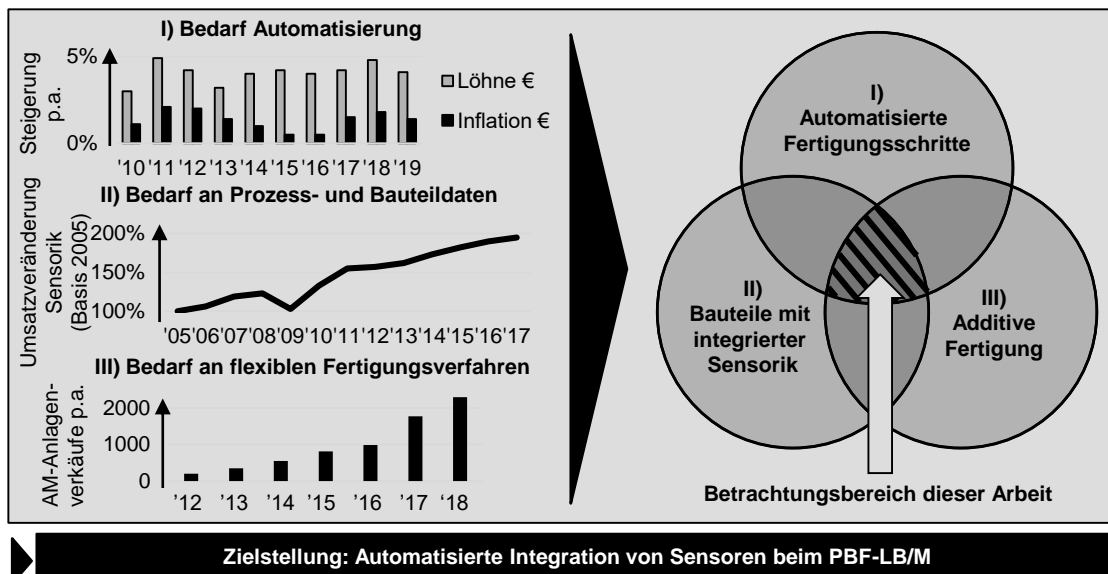


Abbildung 1: Aus den aktuellen Trends der Industrie abgeleitete Zielstellung für diese Arbeit, gekennzeichnet durch schraffierten Bereich (STATISTISCHES BUNDESAMT 2020, AMA VERBAND FÜR SENSORIK UND MESSTECHNIK E.V. 2020, WOHLERS ASSOCIATES 2019).

Zu dem Schluss, dass einerseits die Integration von Sensoren in metallische AM-Bauteile von hohem Interesse ist, sind bereits einige Forschungsgruppen wie STOFFREGEN (2015), TÖPPEL ET AL. (2018) oder STOLL ET AL. (2021) gekommen. Dass andererseits auch eine Automatisierung des Verfahrens Güte- und Kostenvorteile mit sich bringen wird, haben vorangehende Forschungsarbeiten aufgezeigt, konnten dies jedoch nicht umsetzen (SEHRT & WITT 2011, HOSSAIN 2017, STOLL 2020).

1.2 Problemstellung und Handlungsbedarf

Durch die Digitalisierung häufen sich die Bedarfe an sensorintegrierten Systemkomponenten (Smart Parts), jedoch sind die aktuell zur Verfügung stehenden Lösungsansätze unzureichend, um diese Nachfrage zufriedenstellend zu decken. So wird beispielsweise in Forschungsinitiativen wie dem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft Sensorintegrierende Maschinenelemente (DFG 2305) die Integration von Sensorsystemen in Maschinenbauteile fokussiert betrachtet. Das Forschungsprogramm wurde im November 2021 gestartet und fokussiert die Umsetzung prozessrelevanter Messaufgaben. So sollen zukünftig Schrauben, Lager und Zahnräder in ihrer Temperaturentwicklung und Vibration überwacht werden, um Schäden im Bauteil frühzeitig identifizieren zu können. Durch dieses Forschungsprogramm wird zwar der hohe Bedarf derartiger Systemlösungen dargelegt, jedoch auch schnell vor Augen geführt, dass im aktuellen Stand der Technik nur unzureichende Verfahren und Ansätze für die Umsetzung derartiger Zielbilder vorliegen.

Im Bereich der additiven Fertigung von Polymeren ist die Forschung bereits weiter fortgeschritten (GLASSCHROEDER 2018), sodass das Drucken und Integrieren von Leiterbahnen, Sensoren und Mikrocontrollern bereits durch erste Start-Ups im industriellen Umfeld angekommen ist (HEDGES 2014, NANO DIMENSION 2021). Die Verarbeitung von Metallen bietet für die Integration von elektrischen Komponenten größere Herausforderungen, welche bewältigt werden müssen:

- hohe Prozesstemperaturen von 660 °C (Schmelztemperatur Aluminium) bis 3.422 °C (Schmelztemperatur Wolfram) treten auf,
- es existieren noch keine Methoden zur Verarbeitung von elektrischen Isolatoren, welche im industriellen Maßstab umgesetzt werden könnten und
- der Prozess muss unter stetiger Anwesenheit einer Schutzgasatmosphäre durchgeführt werden.

Wird nun im Speziellen das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen betrachtet, gibt es jedoch erste Forschungsarbeiten, welche sich mit der Integration von Sensoren in metallische Komponenten beschäftigt haben. Die Ansätze verfolgen die Integration von faseroptischen Sensoren, Temperaturfühlern und RFID-Tags in metallische Bauteile aus Ti-, Fe- und Ni-basierenden Legierungen (vgl. Abschnitt 3.2). Die Arbeiten haben jedoch gemein, dass sie nicht materialübergreifend verwendet werden können und der Herstellungsprozess nicht gesamtheitlich betrachtet wird. Des Weiteren sind keine Forschungsaktivitäten bekannt, welche verschiedene Möglichkeiten von Sensorsignalübertragungsarten aufzeigen und Integrationsabläufe mittels einer automatisierten Handhabungseinheit durchführen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Erkenntnisse der Sensorintegration beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen nur vereinzelt vorliegen und bislang nicht holistisch betrachtet worden sind. Eine ganzheitliche Vorgehensweise und wesentliche Erkenntnisse zur Anforderungsdefinition, Prozesskonzeptionierung und -qualifizierung, sowie zur Automatisierung einer Sensorintegration beim PBF-LB/M sind nicht vorhanden (vgl. Abschnitt 3.5).

1.3 Zielsetzung

Die **Zielsetzung** dieser Forschungsarbeit ist daher die Entwicklung einer Methode zur Erarbeitung eines Sensorintegrationsprozesses beim PBF-LB/M. Dieser soll manuell, aber auch automatisiert durchgeführt werden können. Im Rahmen einer systematischen Zielerreichung werden im Verlauf der Arbeit drei forschungsleitende Fragen beantwortet, welche das wissenschaftliche Vorgehen begründen und aufeinander aufbauen:

- 1) Wie können anforderungsgerechte Fertigungsprozessschritte und eine Prozesskette definiert sowie geeignete Sensoren identifiziert werden?
- 2) Wie lassen sich durch manuelle Sensorintegration relevante Einflussgrößen auf den veränderten PBF-LB/M-Fertigungsprozess ermitteln, sowie sensor- und prozessgerechte Lösungskonzepte finden?
- 3) Wie kann ein Sensorintegrationsprozess automatisiert und in einen PBF-LB/M-Prozess implementiert sowie dessen Nutzen quantifiziert werden?

Das erarbeitete Vorgehen soll Grundlage und Entscheidungshilfe bieten, wie auf die Verwendung geeigneter Prozessschritte, anforderungsgerechter Komponenten und qualitätsgesicherter Herstellungsparameter geschlossen werden kann. Mit dem Ziel einer digitalen, robusten und reproduzierbaren Prozesskette werden über-

geordnete Schritte aufgezeigt sowie wie entwickelte Handhabungsabläufe automatisiert umgesetzt werden können. Zudem soll das vorgestellte Vorgehen unabhängig von der verwendeten Legierung für den PBF-LB/M-Prozess, dem ausgewählten Sensor und dem zugrundeliegenden Anwendungsfall nutzbar sein.

Durch die Integration von Sensoren während der additiven Fertigung mittels PBF-LB/M werden diverse **Vorteile und Mehrwerte** gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren erwartet und im Rahmen dieser Arbeit adressiert:

- Uneingeschränkte Zugänglichkeit: Sensorik kann durch den schichtweisen Aufbau an jeder Stelle im Bauteil integriert werden.
- Vollständige Kapselung: ein Sensor kann so integriert werden, dass er vollkommen von der Außenwelt abgeschirmt ist. Damit einhergehende Eigenschaften sind:
 - kein direkter Einfluss auf die äußere Geometrie des Bauteils
 - keine Sichtbarkeit von außen
 - Schutz vor Umwelteinflüssen (z. B. Schmierstoffen)
- Minimale Bauteilchwächung: nur für die Sensorintegration notwendige Bereiche müssen frei bleiben. Es bedarf keiner montagebedingten Unterteilung der Komponente in Unterbaugruppen. Durch den geringen Platzbedarf für die Integration ist eine hohe Funktionsdichte realisierbar.
- Geringer Nacharbeits-/Montageaufwand: Zeitliche, technische und personelle Aufwände können durch eine Sensorintegration während des Prozesses minimiert werden.
- Erhöhte Bauteilqualität: Verbesserung der Einlegepräzision und Wiederholgenauigkeit sowie der Prozess-Robustheit durch Automatisierung. Negative Effekte von Bauprozessunterbrechungen auf das Materialgefüge werden auf ein Minimum reduziert, indem die Schutzgasatmosphäre erhalten bleibt und die Unterbrechungszeit verkürzt wird.
- Geringere Kosten: Automatisierte Integration erlaubt kürzere Anlagenbelegungszeiten und die Minimierung von manuellen Arbeitsschritten und damit auch den Personaleinsatz.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Vorgehensweise und Struktur der Arbeit wird anhand der drei Leitfragen entwickelt. Die Arbeitsinhalte werden, wie in Abbildung 2 gezeigt, in den jeweiligen Kapiteln vorgestellt. In Kapitel 2 wird relevantes Hintergrundwissen zum pulver-

bettbasierten Schmelzen von Metallen, zu Sensorsystemen und zur Prozessautomatisierung dargelegt. Einschlägige Forschungsarbeiten aus den Bereichen PBF-LB/M, der Sensorintegration beim PBF-LB/M und relevante, nicht AM-spezifische Forschungsergebnisse werden in Kapitel 3 aufgezeigt und analysiert. Auf Basis von Kapitel 2 und 3 wird in Kapitel 4 ein Vorgehen zur Ermittlung einer allgemeingültigen und modularen Prozesskette zur Sensorauswahl und geeigneten Sensorintegration vorgestellt. In Kapitel 5 wird die aufgestellte Prozesskette durch manuelle Vorgänge umgesetzt. Es erfolgt die Erarbeitung von anforderungsgerechten Lösungskonzepten und deren Validierung. Kapitel 6 beschreibt die Automatisierung der Prozesskette zur Sensorintegration. Sowohl die Konzeptionierung wird beschrieben, als auch auf deren experimentelle Validierung auf Bauteil- und Automatisierungsebene eingegangen. Abschließend werden in Kapitel 7 Anwendungsbeispiele erläutert und deren Wirtschaftlichkeit evaluiert.

Aufbau der Arbeit



Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Arbeit.

Sofern nicht anders angegeben bilden die Geräte, Messmittel, Methoden und Sensoren aus Anhang A1 bis A5 für diese Arbeit stets die Basis für die Fertigung der Probekörper und deren Analyse. Besagte Details und Daten (inkl. Fertigungsparameter) sind dort hinterlegt, um einen besseren Lesefluss zu gewährleisten und inhaltliche Dopplungen in den Beschreibungen einzelner Versuche zu vermeiden. Zudem gilt standardmäßig die Konvention, dass beschriebene x-y-Ebenen im Aufbauprozess horizontale Ebenen beschreiben, während die z-Richtung stets die der Aufbaurichtung darstellt (vgl. auch DIN EN ISO/ASTM 52921). Im Rahmen dieser Arbeit werden zudem die handelsüblichen Werkstoffbezeichnungen verwendet, welche sich gemäß Anhang A4, Tabelle 34, ihrer Werkstoffnummer bzw. ihrer EN-Bezeichnung zuordnen lassen. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der übergeordneten Vorgehensweise und der Darstellung des gesamtheitlichen

methodischen Ablaufs und deren Ergebnisse. Daher werden nicht in jedem Teilabschnitt der Arbeit alle Untersuchungsdetails vorgestellt. So wird an vielen Stellen auf eigene Veröffentlichungen verwiesen, welche bei Bedarf die zusätzlichen Informationen liefern (vgl. auch die Veröffentlichungsliste in Kapitel 9).

1.5 Methodische Vorgehensweise

Das in dieser Arbeit vorgestellte methodische Vorgehen ist für Personen relevant und anwendbar, welche den Bedarf an sensorintegrierten Bauteilen haben. Für das Vorgehen vorausgesetzt wird hierbei, dass die Nutzerin der Methode bereits sichergestellt hat, dass das Bauteil in seinen Dimensionen und dem zu verarbeitenden Material mittels PBF-LB/M hergestellt werden kann. Darauf aufbauend kann ein Entscheidungsbaum aufgestellt werden (vergleiche Abbildung 3), durch welchen der Anwender der Methode prüfen kann, welche Gründe für eine Fertigung mittels PBF-LB/M sprechen könnten und in welchen Fällen sich besser für eine konventionelle Fertigung entschieden werden sollte. Entfällt die Entscheidung auf PBF-LB/M, ist das in dieser Arbeit gezeigte Vorgehen für den Anwender relevant und geeignet.

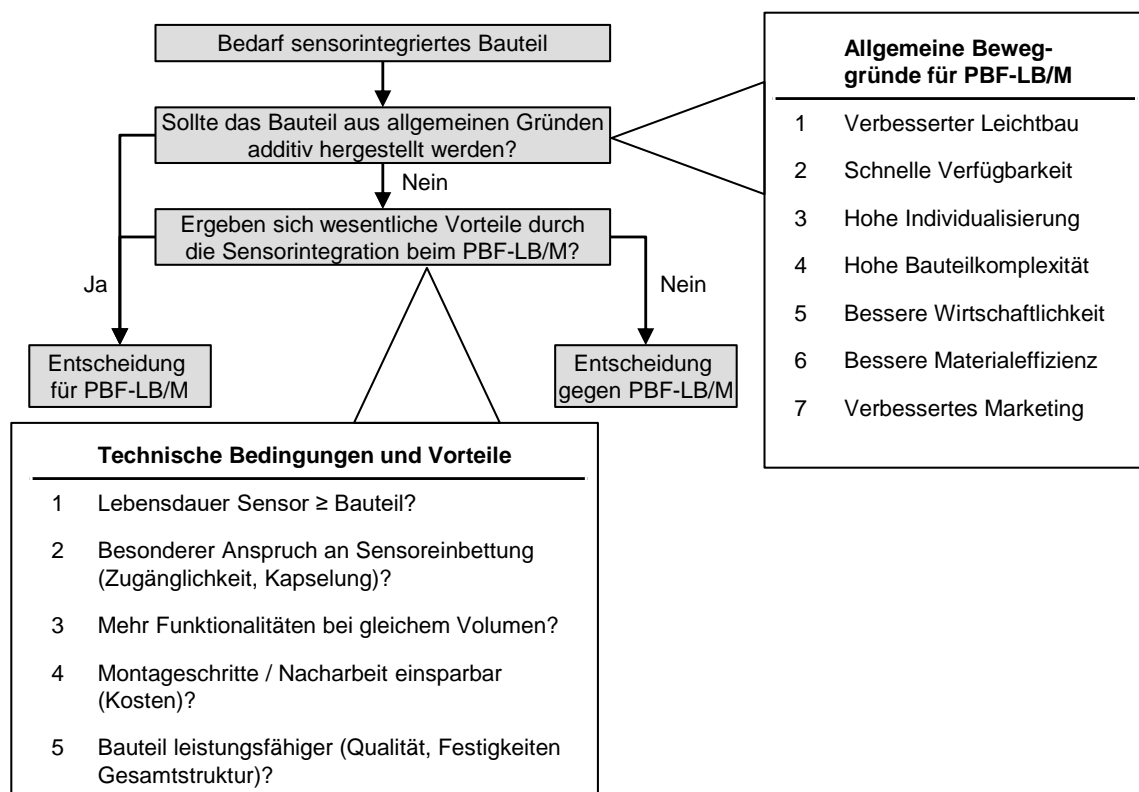


Abbildung 3: Grundlegendes Vorgehen zur Ermittlung von potenziell geeigneten Anwendungsfällen (allgemeine Beweggründe in Anlehnung an SCHNECK (2021)).

Das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen ist gemäß MUNSCH ET AL. (2021) weiterhin das additive Fertigungsverfahren, welches mit Abstand die höchsten Umsätze im Bereich der Anlagenverkäufe generiert (39 % gesamter AM-Markt, 84 % Metallmarkt). Laut WOHLERS ASSOCIATES (2021) entfallen bei den Materialverkäufen von Metallwerkstoffen über 88 % des Umsatzes in die Kategorie PBF, was über 35 % der Materialverkäufe in der gesamten AM-Branche (alle Materialien) ausmacht. Somit ist anzunehmen, dass das PBF-LB/M auch für die Integration von elektrischen Komponenten in AM-gefertigte Metallbauteile die größte industrielle Relevanz hat.

Der in dieser Arbeit gesetzte Fokus (siehe Abbildung 4) beginnt somit mit der Entscheidung für PBF-LB/M. Zu Beginn der Arbeit wurden geeignete Sensoren ausgewählt und eine sensorspezifische Prozesskette aufgestellt. Anschließend erfolgten Grundlagen- und Vorversuche zur Sicherstellung eines reibungslosen Prozessablaufs durch manuelle Sensorintegration. Die erarbeiteten Lösungsschritte können nun zudem automatisiert werden. Abhängig vom Bedarf konnten anschließend durch manuelle oder automatisierte Integration sensorüberwachte Bauteile hergestellt werden, die abschließend technisch und wirtschaftlich bewertet wurden.

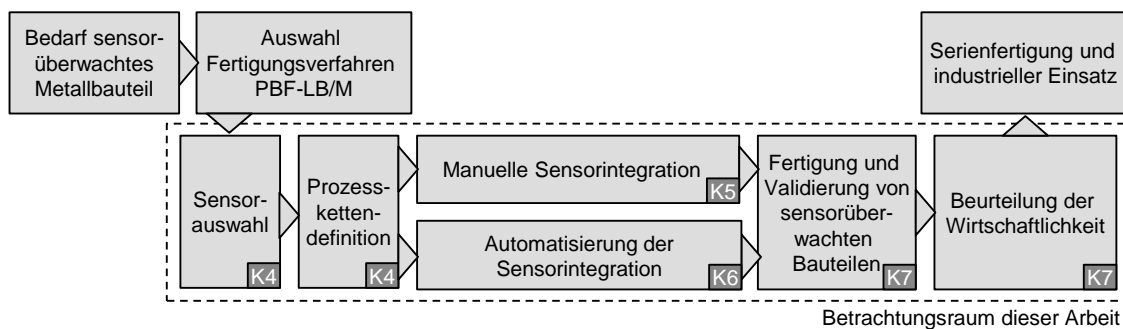


Abbildung 4: Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit (K = Kapitel).

Der Betrachtungsbereich und die Betrachtungsgrenzen der Arbeit können in 3 Hauptbereiche untergliedert werden: Fertigungsprozess, Automatisierung und Anwendungsfälle (vgl. Anhang A5, Abbildung 109). Die Grenzen des Betrachtungsraums dieser Arbeit schließen die Erarbeitung des Status quo und die Erforschung potentiell tauglicher technischer Lösungen, sowie die prototypische Umsetzung und Validierung von Beispielprodukten mit ein. Die Erarbeitung von Anwendungsfällen, von notwendigen nachgelagerten Prozessschritten oder von der Industrialisierung des Prozesses wird hingegen nicht betrachtet.

Der heuristische Bezugsrahmen dieser Arbeit umfasst vier Hauptbereiche: Fertigungstechnik (Additive Fertigung / PBF-LB/M), Mechatronik (Sensordaten, mechanische Belastung, elektrische Leiter), Werkstofftechnik (Gefüge- und Materialanalysen mit dem Fokus auf AlSi10Mg) und Automatisierungstechnik (Handhabung durch kinematisches System). Innerhalb dieses gesetzten Rahmens wird wissenschaftstheoretisch nach der Design Research Methodology (DRM) von BLESSING & CHAKRABARTI (2009) gearbeitet. Dies soll hervorheben inwieweit der Aufbau und die Inhalte der Arbeit einem üblichen wissenschaftlichen Vorgehen entsprechen. Des Weiteren soll damit die Art der wissenschaftlichen Untersuchungen erklärt werden. Gemäß BLESSING & CHAKRABARTI (2009) besteht der Aufbau einer wissenschaftlichen Arbeit aus den vier Stufen,

- der Klärung der Forschungsfrage (Research Clarification, RC),
- der Deskriptiven Untersuchung I (Descriptive Study I, DS I),
- der Präskriptiven Studie (Prescriptive Study, PS) und der
- Deskriptiven Untersuchung II (Descriptive Study II, DS II).

Die RC und die darauffolgende DS I sind Mindestbestandteil einer DRM und können mit den optionalen Stufen der PS und DS II einhergehen. Diese genannten Stufen sind auch in allen Bereichen dieser Arbeit verwendet. Im Folgenden wird die Einordnung konkretisiert:

Bei der Klärung der Forschungsfragen (**RC**) werden durch systematische Literaturanalyse die Ziele der Arbeit (vgl. Abschnitt 3.5) abgeleitet. Kapitel 2 und 3 liefern durch das Aufzeigen der notwendigen Grundlagen und die Literaturanalyse die nötigen Hintergrundinformationen zur Bearbeitung der einzelnen Forschungsfragen. Zudem zeigen die Kapitel den aktuellen Stand der Wissenschaft auf, an welchem diese Arbeit anknüpfen und aufbauen muss. Sie bilden den **ersten Teil der RC**.

Kapitel 4, 5 und 6 bestehen jeweils aus dem zweiten Teil der RC, sowie der DS I und der PS.

Zu Beginn jeden Kapitels wird eine tiefere Beschreibung des kapitelbezogenen Ziels formuliert (vgl. einleitende Abschnitte von Kapitel 4, 5 und 6). Der jeweilige einleitende Abschnitt des Kapitels bildet den **zweiten Teil der RC**, aufbauend auf dem Grundlagen- und Literaturteil (Kapitel 2 und 3).

Anschließend wird im Rahmen von empirischen Analysen von **DS I** das Verständnis der Herausforderungen (kapitelbezogen) fokussiert. Dies wird umgesetzt durch

die Beschreibung von Vorgehen und Prozessen und den dazugehörigen Anforderungen. Kapitelbezogen bildet die

- aufgestellte Fertigungsprozesskette (vgl. Abbildung 25) in Kapitel 4,
- der morphologische Kasten (vgl. Abbildung 31) in Kapitel 5 und
- die allgemeinen Fertigungsprozesskette zur automatisierten Sensorintegration (vgl. Abbildung 75) in Kapitel 6

den Kernbestandteil der jeweiligen DS I. Diese wird durch ergänzende Beschreibungen im jeweiligen Kapitel detailliert.

Alle anschließend in den Kapiteln gezeigten Versuchsergebnisse sind der **PS** zugeordnet. Durch detaillierte Versuchsbeschreibungen wird gezeigt wie zu verfahren ist um das jeweils adressierte Ziel erfolgreich erreichen zu können. Abhängig vom Komplexitätsgrad der Fragestellung werden Prozesse hierbei oberflächlicher (vgl. z. B. Abschnitt 5.2.1) oder tiefergehender beschrieben (vgl. z. B. Abschnitt 5.2.3).

In der **DS II** in Kapitel 7 wird anschließend der eigene Ansatz und der daraus entstehende Nutzen exemplarisch evaluiert. Durch die initiale Umsetzung verschiedener Anwendungsbeispiele wird dargelegt, wie die generierten Forschungsergebnisse einen industriellen und wirtschaftlichen Mehrwert bringen können.

Neben der vorgestellten übergeordneten DRM folgen einzelne Abschnitte und Unterabschnitte in Kapitel 5 und 6, einer untergeordneten DRM (vgl. z. B. Abschnitt 5.2.3) und bilden somit einen eigenen wissenschaftlich vollständigen Abschnitt.

2 Grundlagen

2.1 Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl

Die Additive Fertigung kann nach DIN 8580 (2020) dem Urformen zugeordnet werden (siehe Abbildung 5).

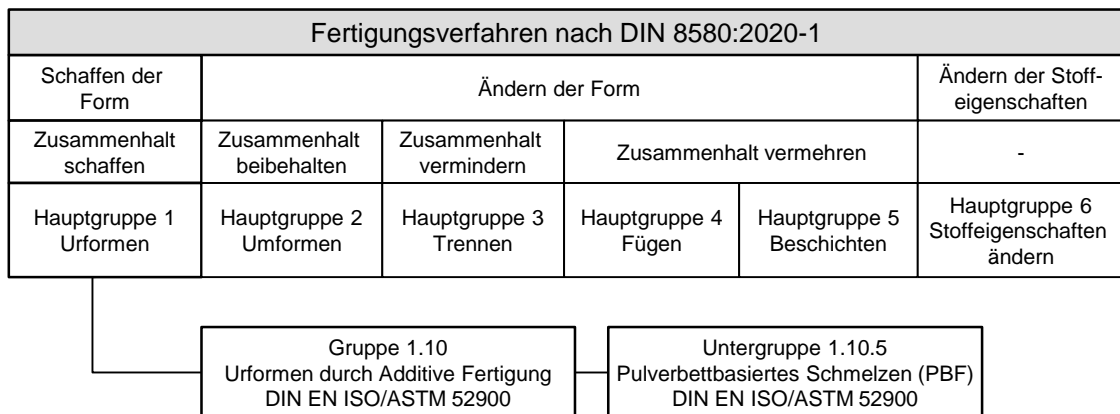


Abbildung 5: Einordnung des pulverbettbasierten Schmelzens nach DIN 8580 (2020).

Das pulverbettbasierte Schmelzen ist national und international durch die Norm DIN EN ISO/ASTM 52900 definiert. Diese Norm vertritt eine andere Bezeichnung als sie aus der VDI-Richtlinie 3405 mit dem Begriff Laser-Strahlschmelzen (kurz LBM) bekannt ist. In den Dokumenten der Norm wird das Verfahren des laserbasierten (LB – engl. Laser Beam) pulverbettbasierten Schmelzens (PBF – engl. Powder Bed Fusion) von Metallen (M – engl. Metal) folgendermaßen abgekürzt: PBF-LB/M. Wird im Speziellen über die Verarbeitung einer Legierung (bspw. AlSi10Mg) gesprochen, kann der Name der Legierung das M in der Abkürzung ersetzen: PBF-LB/AlSi10Mg.

2.1.1 Verfahrensbeschreibung

Das pulverbettbasierte Schmelzen hat in allen seinen Varianten gemein, dass es sich um einen sequentiellen Prozess handelt, in welchem aus einem Pulvervorrat Material schichtweise, z. B. durch ein Rakelsystem, auf einer Bauebene aufgetragen wird. Anschließend erfolgt im zweiten Schritt die lokale Einbringung von Energie mittels Laser in den zu verfestigenden Bereichen, bevor erneut eine dünne Pulverschicht aufgezogen wird (vgl. Abbildung 6). Dieses sich wiederholende

Vorgehen wird durchgeführt, bis die zu fertigenden Bauteile vollständig aufgebaut sind. (KRAUSS 2016) Um beim PBF-LB/M eine Oxidation der im Laserfokus entstehenden Metallschmelze zu verhindern, findet der Prozess unter Schutzgasatmosphäre (häufig Ar oder N₂) statt. Nach dem Prozess sind die gefertigten Bauteile fest mit der Bauplattform verschweißt und müssen in Nachbearbeitungsschritten von dieser getrennt werden.

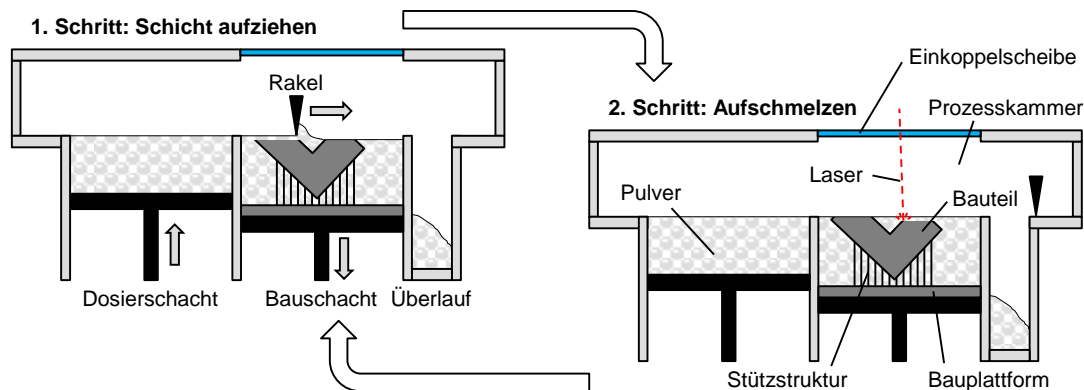


Abbildung 6: Verfahrensablauf des pulverbettbasierten Schmelzens mittels Laser in Anlehnung an KRAUSS (2016).

Zur Reduktion von Eigenspannungen und zur besseren Prozessierbarkeit der Metalle kann die Bauplattform vorgeheizt werden. Vorheiztemperaturen zwischen 80 und 200 °C sind üblich, spezielle Anlagentechnik lässt sogar das Vorwärmen auf über 800 °C zu, zum Beispiel zur besseren Verarbeitung von schwer schweißbaren Legierungen und Elementen. (MÜLLER ET AL. 2020, SCHMITT ET AL. 2020)

Abhängig von Prozessparametern wie der Laserleistung, der Lasergeschwindigkeit, dem Laserfokus, dem Hatchabstand oder auch der Schichtdicke lassen sich verschiedene Materialien in unterschiedlicher Aufbaurrate, Dichte und Auflösungsgenauigkeit fertigen (vgl. Abbildung 7) (KRAUSS 2016, OTT 2012). Des Weiteren gibt es über 100 weitere Einflussgrößen, welche in unterschiedlicher Stärke und Weise den Aufbauprozess beeinflussen (REHME 2010). Die im PBF-LB/M-Prozess eingetragene Laserenergie führt zur Ausbildung eines Schmelzbades im Pulverbett. Bei der Erzeugung des Schmelzbades kommt es auch zu einer teilweisen Verdampfung von Metall. Dieser Metaldampf erzeugt durch seine Expansion einen lokalen Überdruck, welcher den Auswurf von sogenannten Spritzern aus dem Schmelzbad hervorruft. Da der erzeugte Metaldampf zu Anteilen die eingetragene Laserenergie absorbieren kann und die Prozessspritzer, durch Ablagerung auf den aufgeschmolzenen Bauteilbereichen, zur Defektbildung im Bauteil führen können, gilt es diesen Einfluss möglichst zu vermeiden. Zur Reduktion dieses negativen Effekts strömt Schutzgas über den Baubereich und treibt dadurch den Metaldampf

(Schmauch) und die Spritzer in eine Absaugdüse, welche, mittels entsprechender Filtertechnik, die Metallpartikel aus dem Gasstrom entfernt.

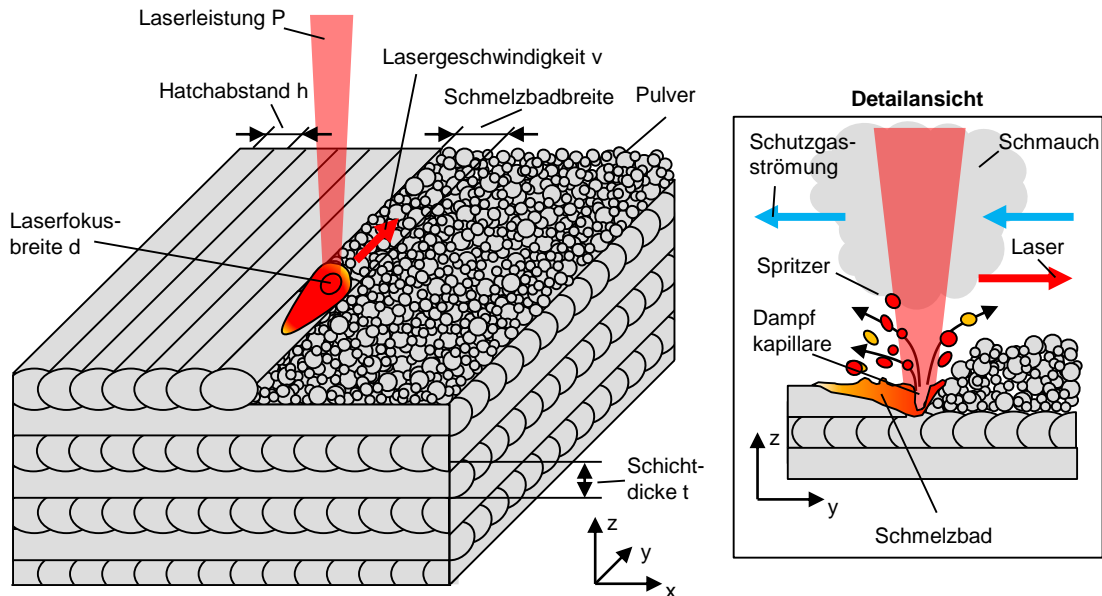


Abbildung 7: Prinzip und Parameter des pulverbettbasierten Schmelzens von Metall (in Anlehnung an SEHRT & WITT (2012) und GUNENTHIRAM ET AL. (2018)).

Nach MEINERS (1999) und SIMCHI (2006) kann aus den genannten Prozessparametern der spezifische Energieeintrag (Volumenenergiedichte E_V) beim PBF-LB/M als Gesamtenergieeintrag pro Volumenkörper wie folgt berechnet werden:

$$E_V = \frac{P}{t h v} \quad (2-1)$$

wobei P der Laserleistung, t der Schichtdicke, h dem Hatchabstand und v der Lasergeschwindigkeit entspricht.

Derzeit am Markt erhältliche Anlagen sind in der Lage Bauteilabmaße bis zu $1,5 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ zu erzeugen und haben geometrische Fertigungslimitierungen im Wanddickenbereich von 0,14 - 0,2 mm. Sie erreichen typischerweise eine Bauteilgenauigkeit von bis zu $\pm 50 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Geometrielänge von 100 mm, ermöglichen Oberflächenrauigkeiten von minimal $R_a = 5 \text{ }\mu\text{m}$ und fertigen mit material- und anlagenabhängige Aufbauraten zwischen 27 und $162 \text{ cm}^3/\text{h}$. Materialien wie Stähle, Nickelbasis-, Titan-, Kupfer- oder Aluminiumlegierungen gehören mittlerweile zum Standard an verarbeitbaren Metallen, ergänzt um viele weitere, sich teils noch in der Erforschung befindliche, Legierungen. (WOHLERS ASSOCIATES 2021)

2.1.2 Prozesskette

Die VDI Richtlinie 3405 teilt Prozessketten der additiven Fertigung in drei Stufen ein: den Pre-, In- und Post-Prozess (vgl. Abbildung 8). Im Falle des PBF-LB/M bedeutet dies, dass zu Beginn jedes Bauprozesses CAD-Daten vorbereitet und Hilfsgeometrien, wie Stützstrukturen, ausgelegt und definiert werden müssen. Anschließend werden aus den Volumendaten Flächendaten generiert (z. B. im .cli-Format) und gemeinsam mit den material- und anlagenspezifischen Prozessparametern auf die Fertigungsanlage übertragen. Hardwareseitig gilt es die Anlage zu rüsten, um dem Prozess ausreichend Pulvermaterial, eine Bauplattform, sowie die Versorgung mit Medien wie Schutzgas, Druckluft und Strom zur Verfügung zu stellen. Im Anschluss kann der In-Prozess, der eigentliche Bauteilfertigungsschritt, durchgeführt werden. Ist der Bauauftrag abgeschlossen, wird die Bauplattform gemeinsam mit den gefertigten Geometrien aus der Anlage entfernt. Abschließend erfolgt der Post-Prozess, in welchem durch Nacharbeitungsschritte, wie z. B. Wärmenachbehandlung oder Überfräsen, das Bauteil seine benötigten mechanischen und geometrischen Eigenschaften erhält. Über die besagten Schritte hinaus gilt es beim PBF-LB/M das prozessüberschüssige Pulver nach der Fertigung durch Siebvorgänge zu recyceln, um es dem nächsten Fertigungsprozess wieder zuführen zu können. Die Bauplattform wird zur Wiederverwendung überfräst.

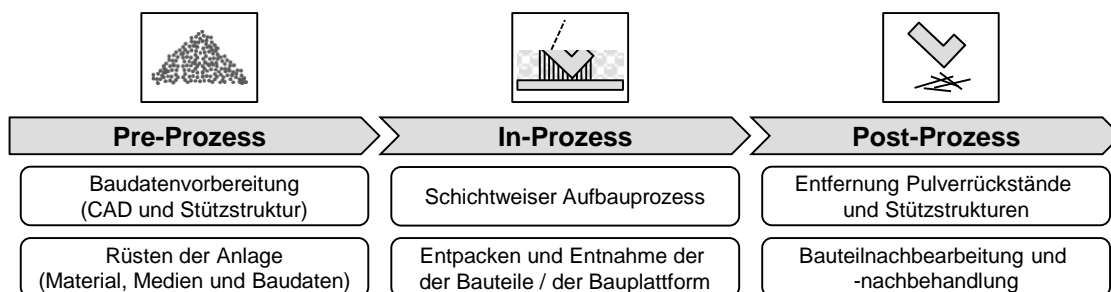


Abbildung 8: Prozesskette des PBF-LB/M in Anlehnung an VDI Richtlinie 3405.

2.1.3 Prozessüberwachungsstrategien beim PBF-LB/M

Wie in jeder Fertigungstechnologie ist es von Interesse ein hohes Maß der Bauteilgüte zu erzielen und sicherzustellen. In der additiven Fertigung sind die Methoden der Prozessüberwachung, insbesondere bei PBF-LB/M, stark in der Entwicklung vorangeschritten. Tabelle 1 zeigt aktuelle Technologien und damit detektierbare Defekte auf. Trotz deren prinzipiellen Verfügbarkeit sind die Technologien noch in der Entwicklung, sodass zum aktuellen Zeitpunkt in der Regel keine automati-

sierte Prozessüberwachung und Fehlerdetektion bei der additiven Fertigung stattfindet. Die Umsetzung dessen ist jedoch das aktuelle Ziel von Wissenschaftlerinnen und Entwicklern (vgl. HERZER ET AL. (2021)).

Tabelle 1: Übersicht nutzbarer in-situ Prozessüberwachungsmöglichkeiten beim PBF-LB/M (MCCANN ET AL. 2021).

Prinzip	detektierbare Defekte
Akustische Emissionsspektroskopie	Balling, Überhitzung, Porosität, Rissbildung
Infrarot Bildgebung	Überhitzung
Optische Bildgebung	Pulverbett-Unregelmäßigkeiten, Überhitzung
Optische Emissionsspektroskopie	Überhitzung, Porosität
Optische Kohärenz Tomographie	Porosität
Optische Tomographie	Balling, Oberflächenrauheit, Maßhaltigkeit, Pulverbett-unregelmäßigkeiten, Lack-of-Fusion-Defekte
Pyrometrie	Überhitzung
Röntgentomographie	Porosität
Ultraschallprüfung	Porosität

2.1.4 Bauteilauslegung und Funktionsintegration

Bei der Auslegung von Bauteilen und Produktion muss das jeweilige Herstellungsverfahren stets in das geometrische Design miteinbezogen werden, um eine gute Fertigbarkeit sicherstellen zu können. Dies gilt insbesondere für Additive Fertigungsverfahren und so werden durch VDI 3405 Blatt 3 und ISO/ASTM 52921-1 Konstruktionsempfehlungen ausgesprochen. Es wird vorgegeben, wie Bauteile beim PBF-LB/M im Bauraum orientiert, positioniert und angeordnet werden sollten. Empfehlungen über Grenz-Überhangswinkel, sowie die Verwendung von Stützstrukturen, aber auch für das Design von Kanalstrukturen und Beispiele für die Vermeidung von Materialansammlungen werden dort beschrieben.

Wichtige Argumente für die Verwendung von additiven Fertigungsverfahren sind die Umsetzbarkeit von Leichtbauanwendungen und die Integrierbarkeit neuer Funktionen (REINHART ET AL. 2010). Darüber hinaus sind die schnelle Umsetzbarkeit hoher Bauteilkomplexitäten, die leichte Individualisierbarkeit, aber auch eine erhöhte Kosteneffizienz bei der Herstellung wesentliche Vorteile der Technologie (VRANIĆ ET AL. 2017). Nach GLASSCHROEDER (2018) lässt sich der Begriff der Funktionsintegration in mechanische, thermodynamische und elektrische Funktionsintegration unterscheiden. Während eine mechanische Funktionsintegration eine gezielte Veränderung des Kraftflusses bewirkt (z. B. durch Topologieoptimie-

rung), sorgt die thermodynamische Funktionsintegration mithilfe der additiv gefertigten Komponente für eine gezielte Energieumwandlung. Die elektrische Funktionsintegration impliziert die Integration von elektrisch aktiven und passiven Komponenten, wie elektrischen Schaltungen.

2.2 Elektrische Sensorsystemtechnik

2.2.1 Sensorarten

Sensoren können einerseits hinsichtlich ihrer Messgrößen oder andererseits nach ihrem Messprinzip kategorisiert werden. Messgrößen können geometrischer, mechanischer oder thermischer Natur sein, des Weiteren werden auch strahlungstechnische, chemische und biologische Zustandsgrößen eingeschlossen. Das Mess- oder auch Wirkprinzip beschreibt durch welchen physikalischen Effekt die Messgröße erfasst wird. Hierbei kann zwischen resistiven Sensoren (widerstandsbauiert), reaktiven Sensoren (induktive und kapazitive Sensoren), spannungsgesteuerten sowie stromgesteuerten Sensoren, ladungsgesteuerten Sensoren aber auch oszillatorischen Sensoren unterschieden werden. (PARTHIER 2006)

In Abbildung 9 ist gezeigt wie sich eine beliebige zeitabhängige Zustandsgröße $x_e(t_z)$ durch einen Sensor in eine elektrische Zustandsgröße $x_a(t_z)$ umwandeln lässt. Dieser Prozess ist üblicherweise mit Störgrößen behaftet. Diese gilt es gering zu halten, damit der gemessene Ist-Wert bestmöglich dem eigentlichen Soll (physikalischer Ist-Wert) entspricht (geringe Messunsicherheit).

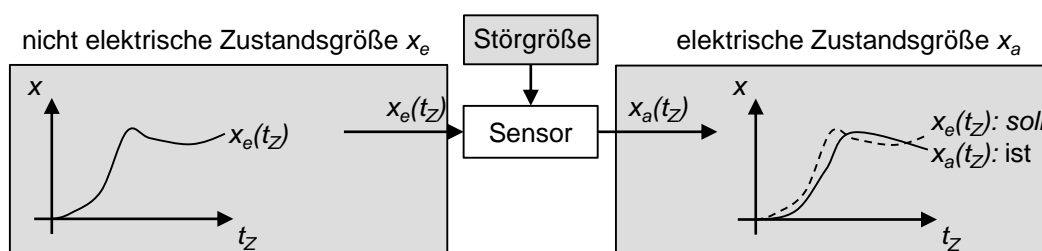


Abbildung 9: Funktion eines Sensors (Abbildung in Anlehnung an SCHIESSLE (2016)).

Es besteht ein umfangreicher Markt an Sensoren, welche sich rund 100 verschiedener physikalischer Effekte bedienen. Dadurch entsteht eine hohe Komplexität bei der Sensorauswahl. So scheiterten nach BERNSTEIN (2014) bereits viele Sensorprojekte aufgrund von unzureichenden Sensoreigenschaften hinsichtlich Umgebungsbedingungen (30 %), Sensorzuverlässigkeit (27 %) und Sensorkosten

(27 %). Eine klare Spezifikation der Sensoranforderungen ist daher entscheidend für eine erfolgreiche Sensoreinbindung. Wichtige Faktoren sind hierbei das Sensorumfeld, Funktionsanforderungen, operationelle Anforderungen, sowie Schnittstellen- und Sicherheitsanforderungen. (BERNSTEIN 2014) Das folgende Ishikawadiagramm (Abbildung 10) gibt Aufschluss über Themenbereiche, welche bei der Auswahl verstärkt beachtet werden müssen:

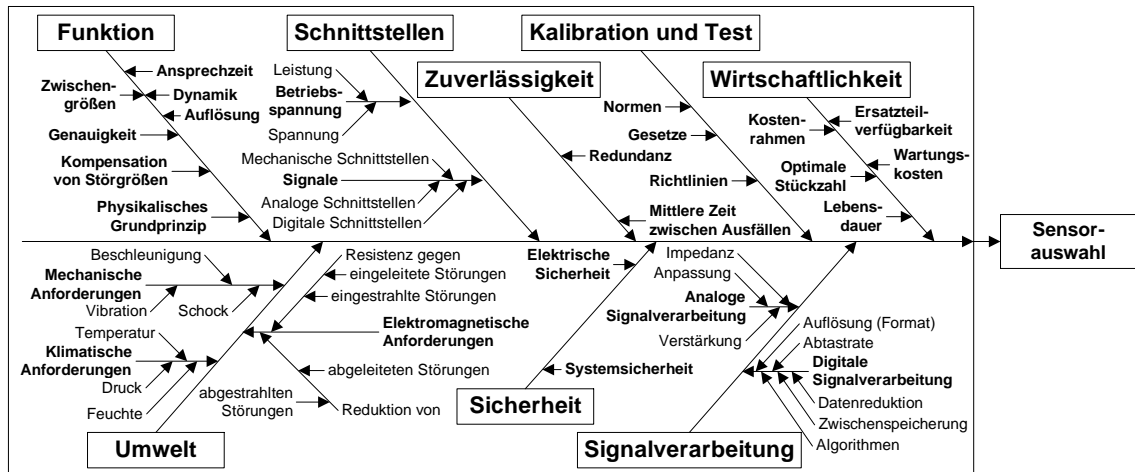


Abbildung 10: Zu beachtende Anforderungen bei der Sensorauswahl in Anlehnung an BERNSTEIN (2014) und HEINRICH ET AL. (2017).

Im Folgenden werden Temperatur-, RFID- und Kraftsensoren näher erläutert, da diese ab der Sensorauswahl in Unterabschnitt 4.3.2 von besonderem Interesse sind.

2.2.1.1 Temperatursensoren

Thermische Zustände können mithilfe zweier messtechnischer Prinzipien erfasst werden: Kontaktthermometer und Strahlungsthermometer (Pyrometer). Im Rahmen dieser Arbeit sind nur die industriell stärker verbreiteten Kontaktthermometer von Relevanz (HERING & SCHÖNFELDER 2018).

Der Temperatursensor steht bei der Kontaktthermometrie mit dem zu messenden Objekt in direktem Kontakt. Der Sensor kann durch Temperaturengleich schnell die Temperatur des Messobjekts annehmen, wobei folgende Vorgänge wirken (SCHIESSLE 2016):

1. Konvektion,
2. Wärmeleitung und
3. Wärmestrahlung.

Damit der Sensor mit geringer Ansprechzeit und hoher Präzision die am Messobjekt vorliegende Temperatur ermitteln kann, gilt es auf folgende Bedingungen zu achten (SCHIESSLE 2016):

- 1) Der Temperatursensor darf im Vergleich zum Messobjekt nur eine geringe Masse haben.
- 2) Ein guter Wärmeübergang zwischen Sensor und Messobjekt muss gewährleistet sein.
- 3) Ein Wärmeübergang zwischen Sensor und Umwelt muss minimiert werden.

Es kann zwischen zwei verschiedenen Temperatursensortypen unterschieden werden, welche industriell verbreitete Anwendung finden (vgl. Abbildung 11). Widerstandssensoren (thermoresistiv, passiv) finden üblicherweise Einsatz bis 1000 °C und sind thermisch, mechanisch und klimatechnisch stabil. Thermoelemente (thermoelektrisch, aktiv) haben den Vorteil bei hohen Temperaturen bis zu 1750 °C eingesetzt werden zu können. (HERING & SCHÖNFELDER 2018)

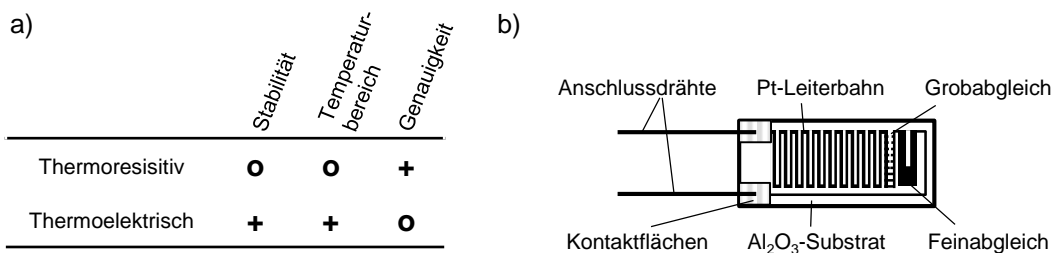


Abbildung 11: a) Grundsätzliche Unterschiede zwischen Widerstandsthermometern (thermoresistiv) und Thermoelementen (thermoelektrisch) (HERING & SCHÖNFELDER 2018), b) Prinzipskizze eines Dünnschicht-Messwiderstands nach BERNHARD (2014).

Widerstandsthermometer

Metallwiderstandsthermometer sind in der Regel entweder Nickel (Ni)- oder Platinbasiert (Pt). Bei beiden Sensorarten erhöht sich der elektrische Widerstand mit zunehmender Temperatur. Sie sind somit den PTC-Widerständen (Positive Temperature Coefficient) zuzuordnen, welche in Dünnschichtwiderstände (vgl. Abbildung 11) und drahtgewickelte Messwiderstände unterschieden werden können. Erstere werden mäanderförmig auf einem isolierenden Grundkörper in dünner Schicht aufgebracht und haben eine sehr kleine Baugröße. Die drahtgewickelte Version wird in einen Glas- oder Keramikkörper eingebracht und ist bauartbedingt nur in größeren Ausführungen verfügbar. Widerstandsthermometer werden derart ausgelegt, dass sie bei einer Temperatur von 0 °C entweder 100 Ω, 500 Ω oder

1000 Ω elektrischen Widerstand besitzen. Die Sensoren werden abhängig von ihrem Ausgangswerkstoff und ihrem Bezugswiderstand bei 0 °C benannt, sodass zwischen Ni100, Ni500 und Ni1000, sowie Pt100, Pt500 und Pt1000 unterschieden werden kann. (SCHIESSLE 2016, HERING & SCHÖNFELDER 2018)

Nach DIN EN 60751:2009-05 sind die Eigenschaften von platinbasierten Widerständen definiert: Demnach wird zwischen zwei verschiedenen Temperaturmessbereichen differenziert.

1. Temperaturbereich zwischen -200 °C und 0 °C:

$$R_t = R_0 * (1 + At + Bt^2 + C * (t - 100 \text{ °C})t^3) \quad (2-2)$$

2. Temperaturbereich zwischen 0 °C und +850 °C:

$$R_t = R_0 * (1 + At + Bt^2) \quad (2-3)$$

Mit R_t = Widerstand bei der gemessenen Temperatur (t), R_0 = Widerstand bei 0 °C, $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$ und $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-4}$.

Genauigkeitsklassen

DIN EN 60751:2009-05 unterscheidet in vier Genauigkeitsklassen bei welchen zwischen Drahtgewickelten- und Schicht-Widerständen differenziert wird. Für die höchste Klasse (AA) ist ein maximaler Toleranzbereich von $\pm 0,1 \text{ °C}$ zulässig, für die ungenaueste Klasse (C) $\pm 0,6 \text{ °C}$.

2.2.1.2 Dehnungs- und Kraftsensoren

Sensoren zur Bestimmung einer mechanischen Kraft können auf resistiven, piezoresistiven, resonanz- oder optoelektronischen Effekten basieren. (Dehnungs-)Resistive Sensoren sind hierbei die aktuell dominierende Technologie zur Kraft- und Drehmomentmessung und werden dies in der absehbaren Zukunft auch weiterhin bleiben. (WERTHSCHÜTZKY 2018)

Dehnungsresistive Sensoren

Dehnungsresistive Sensoren sind üblicherweise Dehnungsmessstreifen (DMS), welche zur Messung von Kraft, Drehmoment, Druck, Dehnung und Stauchung verwendet werden können (TKOTZ & BUMILLER 2020).

Der elektrische Widerstand R eines runden Leiters kann wie folgt bestimmt werden (ρ = spezifischer Widerstand, l = Länge des Leiters und D = Durchmesser des Leiters):

$$R = \rho \frac{4l}{\pi D^2} \quad (2-4)$$

Der Widerstand ist demzufolge von der Geometrie des Leiters abhängig. Veränderungen in der Form resultieren in einem angepassten Widerstandswert. Diesen Effekt machen sich DMS zu Nutze. (GOBLAU 2020) Die Funktion von Dehnungsmessstreifen basiert auf elastischen Verformungen nach dem Hook'schen Gesetz (Abbildung 12, a)). DMS sind üblicherweise aus einem mäanderförmigen Messgitter aufgebaut, welches auf ein Trägermaterial aufgebracht ist. Der DMS wird durch eine Schutzschicht (z. B. Lack) vor Beschädigung von außen abgeschirmt. Über Lötunkte können die sich verändernden Widerstandswerte unter Belastung durch ein Messgerät erfasst werden (vgl. Abbildung 12, b)).

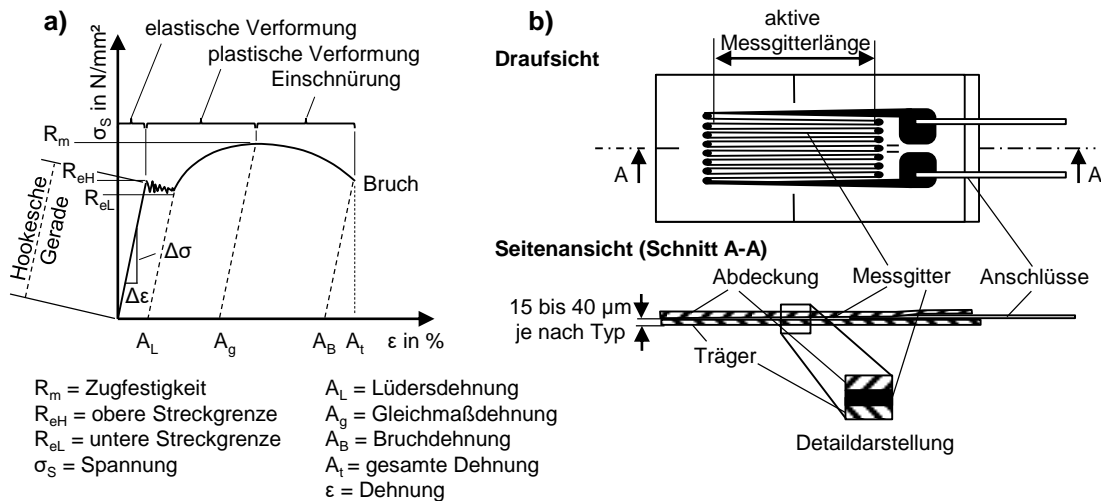


Abbildung 12: a) schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze (ARNDT ET AL. 2014), b) Schematische Darstellung eines DMS (SCHIESLE 2016).

So gilt für die Hookesche Gerade eine Steigung k von (R = elektrischer Widerstand):

$$k \equiv \tan \alpha = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (2-5)$$

mit R = Anfangswiderstand, ΔR = Widerstandsänderung, l_A = Anfangsmesslänge und Δl = elastische Längenänderung. Durch die Umstellung der Formel kann die Dehnung durch eine relative Widerstandsänderung bestimmt werden, wobei k auch als Messempfindlichkeit des DMS verstanden werden kann:

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R} \quad (2-6)$$

So weisen übliche verwendete Metalllegierungen für DMS unterschiedliche k-Faktoren auf:

- Konstantan (60 % Cu, 40 % Ni): $k = 2,05$ (nur für $T < 480 \text{ °C}$)
- NiCr (80 % Ni, 20 % Cr): $k = 2,20$
- Platin-Iridium (90 % Pt, 10 % Ir): $k = 6,60$ (für hohe $T > 650 \text{ °C}$)

Metallische DMS können beispielsweise als Metalldraht-DMS oder Metallfolien-DMS ausgeführt werden. Metalldraht-DMS bestehen aus ca. 20 μm dicken Drähten, werden auf einer Keramikoberfläche aufgebracht und für Hochtemperatureinsätze verwendet. Metallfolien-DMS werden aus einer 5-15 μm dünnen Metallfolie herausgeätzt und sind auf einem Kunststoffträger aufgeklebt. Komplexe Messgitterverläufe können durch das Ätzverfahren wirtschaftlich hergestellt werden (vgl. Abbildung 12). (SCHIESSLE 2016)

Um Bauteile mit den DMS zu einer Einheit mit guter mechanischer Verbindung zu fügen, gibt es unterschiedliche Verfahren (SCHIESSLE 2016):

- Klebstoffe (kalt- und heißhärtend),
- Keramische Kitte (hohe Einbrenntemperaturen nötig) und
- Punktschweißen (v. a. Einsatz im Stahlbau).

DMS sind nach GOBLAU (2020) darauf ausgelegt im elastischen Bereich $\varepsilon < 0,01$ eingesetzt zu werden und zudem in der Lage auch dynamische Belastungen von bis zu 50 kHz zuverlässig zu erfassen.

2.2.1.3 RFID-Sensoren

Das Akronym RFID steht für Radio Frequency Identification und dient einer drahtlosen Erkennung von, mit einem RFID-Tag versehenen, Komponenten (Beispiel Transpondersysteme). Die Kombination der RFID-Technologie mit Sensoren kann verwendet werden um drahtlos sensorgenerierte Messwerte zu übertragen.

Transpondersysteme sind in unterschiedlichen Frequenzbändern zugelassen. Im Wesentlichen unterschieden werden können

- Low-Frequency-(LF)-Bänder (110-150 kHz), von
- High-Frequency-(HF)-Bändern (6,78 MHz, 13,56 MHz, 27,125 MHz und 40,68 MHz), sowie von

- Ultra-High-Frequency-(UHF)-Bändern (433,92 MHz, 869 MHz und 2,4 GHz).

Während die LF-Bänder physikalisch noch im Bereich der induktiven Kopplung arbeiten, handelt es sich bei HF und UHF bereits um eine elektromagnetische Übertragung. (KÖNIG 2015) Unterschiede weisen damit auch die möglichen Ansprehbereiche der Technologien auf. Während im Bereich induktiver Kopplung nur kurze Distanzen überwindbar sind ($\ll 1$ m), lassen sich mittels elektromagnetischer Kopplung Daten auf Distanzen von 2-15 m übertragen. Eine PCB- (Printed Circuit Board) bzw. Patchantenne dient dem System als Koppelglied. (FEIL 2011) Ein typischer Messaufbau eines RFID-Sensorsystems ist in Abbildung 13 schematisch veranschaulicht.

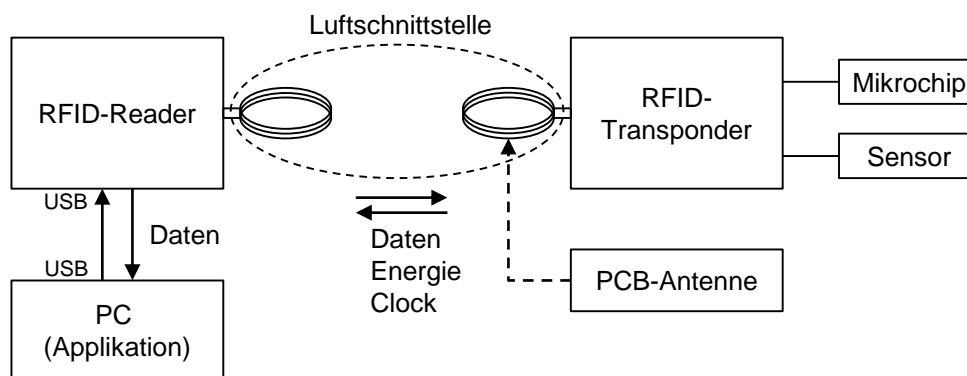


Abbildung 13: Aufbau eines RFID-Systems nach FINKENZELLER (2006) und FEIL (2011).

Die Nutzung von induktiv arbeitenden LF-Technologien bietet den Vorteil, dass die Absorptionsrate niedrig und die Eindringtiefe in Materialien hoch ist. Dem gegenüber steht eine wesentlich höhere Datenübertragungsrate von HF- und UHF-Systemen. (FINKENZELLER 2015)

Induktive Kopplung in Metallumgebung

Die Nutzung von drahtlos kommunizierenden Transpondern in metallischer Umgebung ist nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Abhängig von der Orientierung der magnetischen Feldlinien und dem Grad der Einbettung in das Metall treten jedoch Wirbelstromverluste (engl. Eddy Current loss) auf, welche eine Kommunikation der Systeme verhindern. Wirbelströme beschreiben Induktionsstromlinien, welche wie Wirbel in sich geschlossen sind. Durch sich ändernde Magnetfelder bzw. sich bewegende elektrische Leiter im Magnetfeld werden Wirbelströme induziert und wirken als Kraft oder wärmend auf das Metall. Während

die Entstehung von Wirbelströmen in der Funktechnik eine unerwünschte Begleiterscheinung ist, wird das Phänomen bei Induktionskochfeldern oder als Bremse für bewegende Elemente technisch genutzt.

Bei richtiger Orientierung und Antennenauslegung kann die Kommunikation auch nach dem Abdecken mit einem Metalldeckel erhalten und die Feldlinien können über einen sehr schmalen, dielektrischen Spalt zum Transponder geleitet werden. (FINKENZELLER 2015) Die richtungsabhängige Sendereichweite eines RFID-Transponders ist in Abbildung 14 dargestellt.

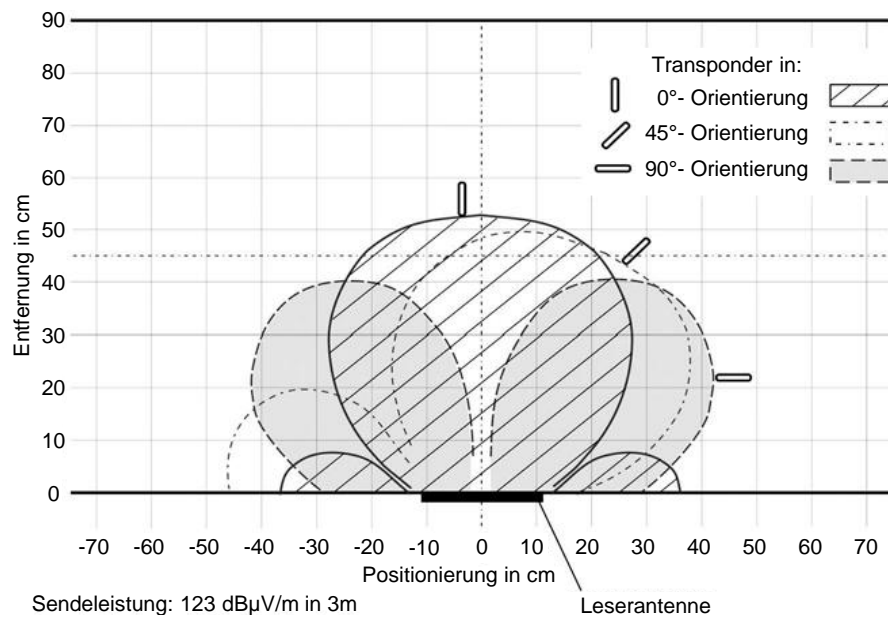


Abbildung 14: Erkennungsbereich für einen LF-Transponder (in Anlehnung an KERN (2007)).

Elektromagnetische Wellen

Durch das sich zeitlich ändernde Magnetfeld im Raum wird ein elektrisches Feld induziert (Wirbelfeld). Das sich an der Antenne ausbildende magnetische Feld geht somit mit zunehmenden Abstand kontinuierlich in ein elektromagnetisches Feld über. Die hierbei entstehende Welle (Wellenlänge λ) löst sich ab einem Abstand von $\lambda/2\pi$ von der Antenne ab und wandert anschließend durch den Raum. Der Wert $\lambda/2\pi$ bildet zudem die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld, da ab diesem Richtwert keine induktive Kopplung von Systemen mehr möglich ist. Eine einfache Bauform bildet die Dipolantenne, welche lediglich aus einem geraden, in der Länge festgelegten Leiterstück besteht. Charakteristische Eigenschaften wie Strahlungswiderstand und Bandbreite können durch eine veränderliche Formgebung der Dipolantenne eingestellt werden.

Das abgestrahlte elektromagnetische Feld wird durch alle geometrischen Körper im Raum beeinflusst und reflektiert, welche größer als die Wellenlänge λ sind. Durch den Einsatz einer Lesantenne kommt es durch die reflektierten Felder zur lokalen Überlagerung (gegen- bzw. gleichphasig) und damit zur Auslöschung bzw. Verstärkung des Signals. Dies resultiert, vor allem unter der Anwesenheit von Metall in der Umgebung, in großen Schwankungen in der Feldstärke E , sodass die minimale Feldstärke E_{\min} , welche für ein Ansprechen des RFID-Systems nötig ist, unterschritten wird.

In Abbildung 15 sind die den RFID-Systemen zur Verfügung stehenden Funkbereiche dargestellt. Unterschiede in den Übertragungsraten, der zur Verfügung stehenden Leistung und die Wirkweisen (induktiv und elektromagnetisch) werden daraus ersichtlich und können miteinander verglichen werden.

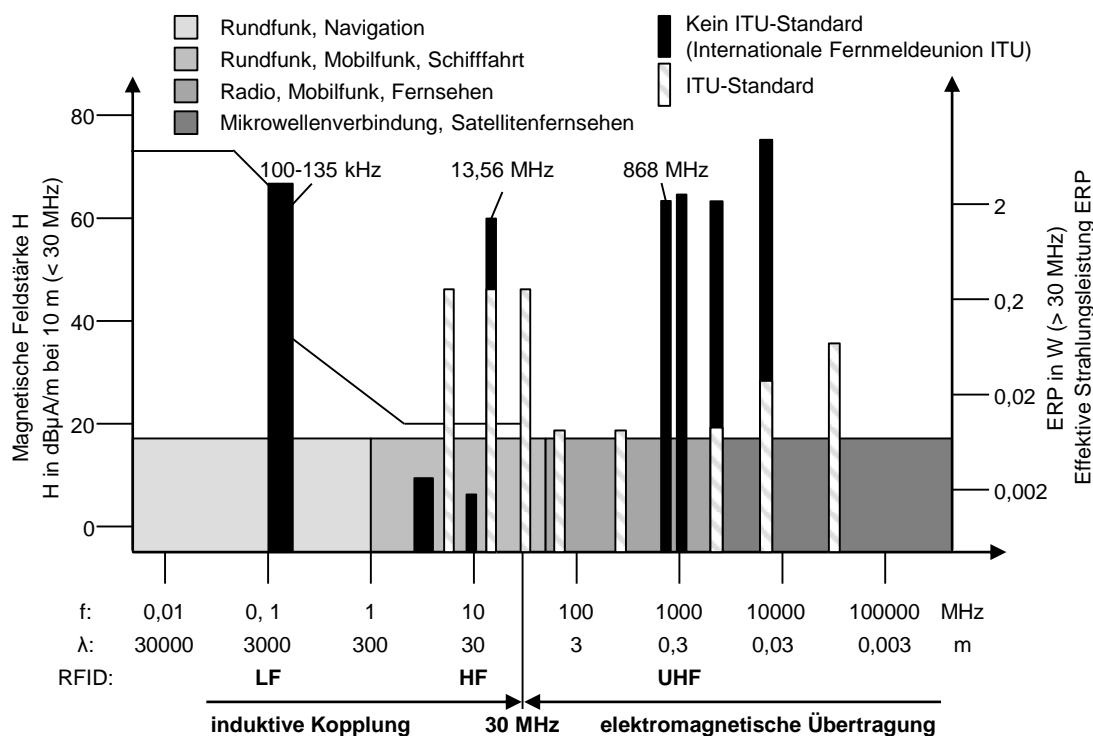


Abbildung 15: Technologien LF, HF und UHF eingeordnet in den für RFID-Systeme verfügbaren Frequenzbereichen in Anlehnung an FINKENZELLER (2015) und KÖNIG (2015).

2.2.2 Elektrische Leiter und Isolatoren

Eine gute elektrische Leitfähigkeit ist die wichtigste Eigenschaft von elektrischen Leitern in der Elektrotechnik, um ein verlustarmes Führen von elektrischen Strömen zu gewährleisten. Üblich ist der Vergleich der Leitfähigkeiten mit hochreinem Kupfer, welches einen Wert von 100 % IACS (International Annealed Copper Standard) aufweist und $58 \cdot 10^6$ S/m entspricht. Somit weist Gold 72 %, Aluminium 62 % und Stahl nur 13-17 % IACS auf. Bei Verunreinigungen der Elemente oder in Legierungen kann es zu zusätzlichen Widerstandserhöhungen kommen. Die Verminderung der Leitfähigkeit kann insbesondere durch ein heterogenes Gefüge und Mischkristallbildung zustande kommen.

Eine Verbindung zwischen zwei Leitern kann durch Löten und Schweißen, sowie durch mechanische Verbindungen erzeugt werden. Beachtet werden muss, dass es in den Bereichen der Verbindungen zu Engstellen kommen kann, in welchen Stromdichten von 10^5 A/mm² vorliegen. Zudem können in diesem Bereich Fremdschichten gebildet werden, welche gemeinsam mit dem Engwiderstand die Stromtragfähigkeit limitieren. Die entstehende Stromwärme an der Kontaktstelle gilt es zu limitieren und unterhalb von Entfestigungstemperaturen zu halten. (DEUTSCHES KUPFER-INSTITUT 2000)

Ein Isolator weist eine Leitfähigkeit von $< 10^{-10}$ S/m (entspricht einem spezifischen Widerstand von $> 10^{10}$ Ω m) auf (DEUTSCHES KUPFER-INSTITUT 2000, PLABMANN & SCHULZ 2013). Neben eines hohen spezifischen Widerstands ist für Isolatoren zudem häufig eine hohe Durchschlagsfestigkeit E_0 (in kV/cm) wichtig. Relevant sind diese Werte jedoch vor allem für Hochspannungsanwendungen. (PLABMANN & SCHULZ 2013)

Bei der Auswahl eines geeigneten Leitermaterials sind neben der Leitfähigkeit auch mehrere andere Faktoren wichtig: Gewichtslimitationen, verfügbarer Platz, Anforderungen an die mechanischen Kennwerte, wie Härte oder Festigkeiten, Korrosionsbeständigkeit oder die Auswahl der Verbindungstechnik fließen in die Findung des richtigen Werkstoffs mit ein. (DEUTSCHES KUPFER-INSTITUT 2000)

Bei der Auslegung von Kabeln und Leitungen ist auf die Auslegung und Einhaltung des Nennquerschnitts zu achten. Dieser ist gemäß IEC 60228 als elektrisch wirksamer Querschnitt definiert und entspricht einem spezifischen Widerstandswert (R_{20} in Ω /km) bei einer Bezugstemperatur von 20 °C und einer Leiterlänge von 1000 m. (DEUTSCHES KUPFER-INSTITUT 2000) Gemäß der folgenden Formel kann der Widerstand bestimmt werden, wobei k_t einem Korrekturfaktor entspricht, R_t dem gemessenen Widerstand und L der Länge der Leitung in m. Gemäß DIN

EN 60228 müssen Leiter zudem aus Kupfer oder Aluminium(-legierungen) bestehen.

$$R_{20} = R_t * k_t \frac{1000}{L} \quad (2-7)$$

Nach der Ermittlung von R_{20} muss geprüft werden, ob der Widerstandswert mit dem dedizierten Nennquerschnitt übereinstimmt. (DIN EN 60228 2005)

2.3 Automatisierung der Produktion

Die Notwendigkeit Produktionsprozesse in der Industrie zu automatisieren basiert stets auf den folgenden Teilzielen: Produktivitätssteigerung, Reduktion von Fertigungszeiten, Erleichterung der menschlichen Arbeit, Kostensenkung oder Qualitätserhöhung. (HEINRICH ET AL. 2017)

Alle Fertigungs- und Montagevorgänge und damit im Zusammenhang stehende Nebentätigkeiten können dem Begriff Produktion zugeordnet werden (REINHART 2017). Demnach werden in einem Produktionsprozess Materialien (Werkstoffe, Teile und formlose Stoffe), Eingangsenergien sowie Eingangsinformationen in Produkte (inkl. Abfälle), Ausgangsenergien und Ausgangsinformationen umgewandelt (vgl. Abbildung 16).

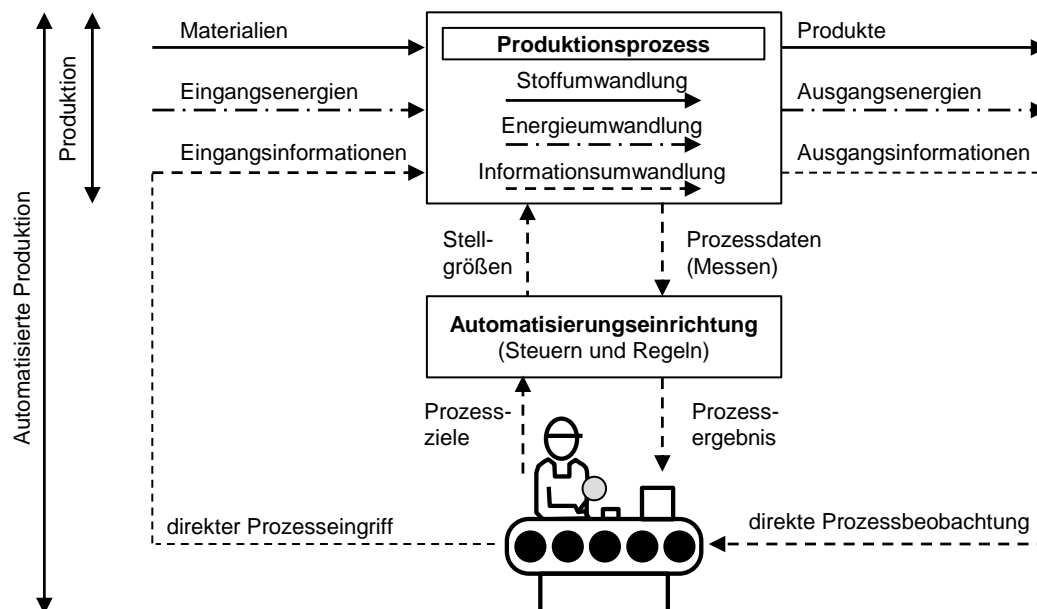


Abbildung 16: Schema der Produktion (REINHART 2017) und deren Automatisierung (HEINRICH ET AL. 2017).

Soll die Montage nicht manuell, sondern automatisiert ablaufen, muss der Prozess um Steuerungs- und Regelungselemente ergänzt werden. Die Nutzerin kann mit dem automatisierten Prozess interagieren indem sie Prozessziele definiert oder sogar direkt in den Prozess eingreift. Durch Prozessbeobachtung oder Analyse des entstehenden Produkts können sich nötige Änderungen der Ziele oder der Bedarf eines manuellen Eingriffs in den Prozess ergeben. (HEINRICH ET AL. 2017)

3 Stand der Technik

3.1 Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen

3.1.1 Effektive Schichtstärke

Die Pulverschichtstärke ist beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen einer der wesentlichsten einstellbaren Prozessparameter (MAHMOODKHANI ET AL. 2019). Allerdings muss bei der Schichtstärke differenziert werden zwischen der einstellbaren nominalen Schichtstärke und der in der Realität vorherrschenden effektiven Schichtstärke t_{eff} . Diese gilt es zu unterscheiden, da die Packungsdichte einer aufgezugene Pulverschicht mit Leerstellen $\ll 100\%$ liegt und nach dem Aufschmelzen zu einer geringeren Höhe an festem Vollmaterial (idealerweise 99 - 100 %) verdichtet wird. Die Höhe einer darauffolgenden Schicht ist somit zusammengesetzt aus der zugestellten Schichtstärke, erweitert um den Betrag der Kompaktierung durch das Aufschmelzen. Dieser Effekt führt zu Beginn eines jeden Bauprozess (ca. die ersten sieben Schichten) zu einer stetig steigenden effektiven Schichtstärke, bevor diese abhängig von der nominalen Schichtstärke, der Pulverschüttdichte und der erzielten Bauteildichte ein Gleichgewicht findet. (MEINERS 1999, SPIERINGS & LEVY 2009, ZHANG ET AL. 2010, MINDT ET AL. 2016)

Mathematisch folgt die Veränderung der effektiven Schichtstärke folgender Theorie (MINDT ET AL. 2016):

$$t_{\text{Bauteil}} = t * \delta_{\text{Pulver}} \quad (3-1)$$

Hierbei entspricht t der theoretischen Schichtdicke und damit dem Verfahrensweg der Bauplattform, δ_{Pulver} stellt die Pulverschüttdichte dar und t_{Bauteil} steht für die, nach dem Pulveraufschmelzen resultierende, Schichtdicke aus Vollmaterial. Die Annahme ist in diesem Fall, dass die resultierende Materialdichte 100 % gleichkommt und keine nennenswerte Materialverdampfung stattfindet. Dieser Effekt setzt sich über alle nachfolgenden Schichten fort. Beispielhaft wird angenommen, dass eine Schichtdicke $t = 50 \mu\text{m}$ entspricht und die Pulverschüttdichte bei 50 % liegt (vgl. Abbildung 17). So ist die erste Pulverschicht $t_{\text{eff}|1} = 50 \mu\text{m}$ dick und schrumpft nach dem Aufschmelzen, gemäß Formel (3-1) zu $t_{\text{Bauteil}} = 25 \mu\text{m}$ zusammen. Ein darauffolgendes Verfahren der Bauplattform um $50 \mu\text{m}$ nach unten, führt demzufolge zu einem Pulverauftrag $t_{\text{eff}|2}$ im Bauteilbereich von $50 \mu\text{m} + 25 \mu\text{m} = 75 \mu\text{m}$, und so weiter.

Die effektive Schichtdicke kann demnach folgendermaßen berechnet werden:

$$t_{eff|n+1} = t + t_{eff|n}(1 - \delta_{Pulver}) \quad (3-2)$$

Die Zeichen n und n+1 stehen für die vorherige bzw. aktuelle Schicht. Der Verlauf der effektiven Schichtdicke kann Abbildung 17 entnommen werden. Nach ca. sieben Schichten erreicht der Verlauf einen Gleichgewichtszustand, welcher dem doppelten Wert der eingestellten Schichtdicke entspricht.

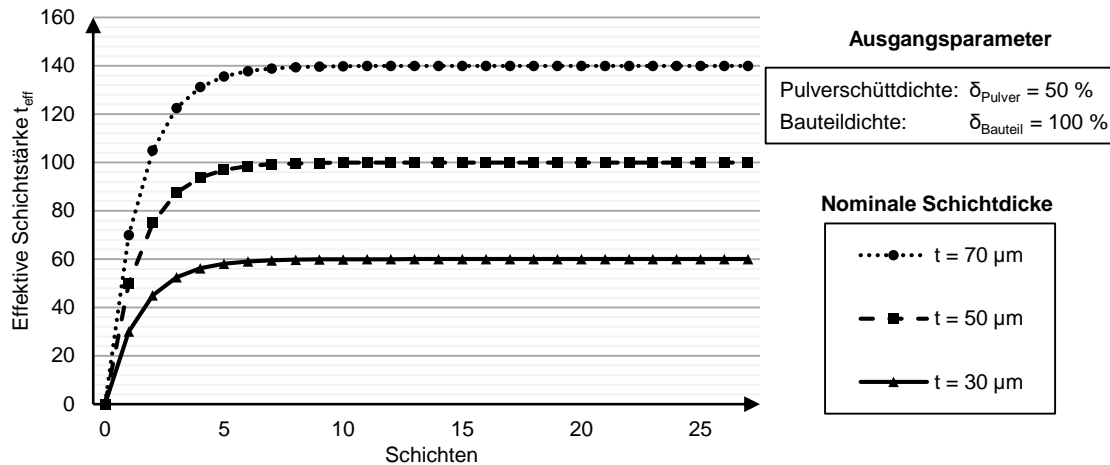


Abbildung 17: Veränderung der Schichtdicke über die ersten Schichten eines Bauprozesses nach MINDT ET AL. (2016) für drei verschiedene Schichtdicken.

Neben der theoretischen Berechnung lässt sich die effektive Schichtstärke auch durch praktische Versuchsaufbauten nachweisen. So ermittelte MAHMOODKHANI ET AL. (2019) für die Verarbeitung von rostfreiem Stahl (17-4 PH) bei einer nominalen Schichtstärke von 20 µm eine effektive Schichtstärke von 150 µm via Analyse mittels Lasermikroskopie. Der gemessene Effekt weicht somit von der theoretischen Herleitung ab. Hierfür ursächlich kann eine verringerte Pulverschüttichte oder eine zu grobe Messauflösung durch das Mikroskop sein.

3.1.2 Spritzerformation beim PBF-LB/M

Die Bildung von Prozessspritzern und deren Einfluss werden bereits durch viele verschiedene Forschergruppen untersucht. Der wesentlichste Bestandteil der Untersuchungen ist es durch Spritzer verursachte Alterungseffekte im Pulver quantifizieren und deren Einfluss auf das gefertigte Bauteil bestimmen zu können. Des Weiteren ist es von Interesse, welche Vermeidungsstrategien dazu genutzt werden können, um wirtschaftlich und ressourceneffizient mit bereits genutztem und mehrfach recyceltem Pulver umzugehen. (LUTTER-GÜNTHER 2020, GUNENTHIRAM ET AL. 2018)

Gemäß DI WANG ET AL. (2017) gibt es verschiedene Arten der Spritzer: Typ I: Metallische Strahlspritzer, Typ II: Tropfenspritzer, und Typ III: Pulverspritzer. Dieser Annahme bedienen sich auch Forscher wie ANWAR & PHAM (2018) (vgl. Abbildung 18).

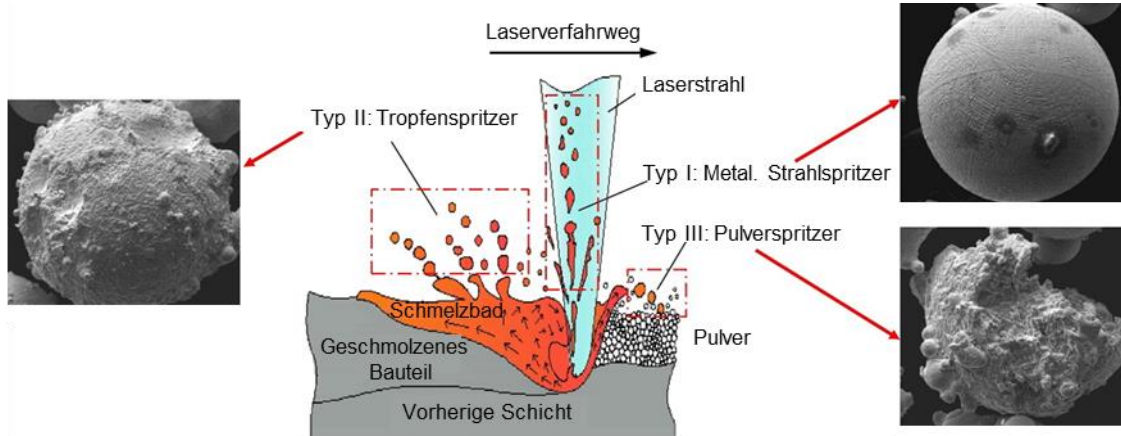


Abbildung 18: Ausbildung verschiedenartiger Prozessspritzer (Typ I: Kugelförmig, Typ II: Grobkugelförmig, Typ III: Unregelmäßig; Abbildung in Anlehnung an DI WANG ET AL. (2017)).

ANWAR & PHAM (2018) berichten in ihren Analysen der Spritzer beim PBF-LB/M-Prozess von einer steigenden Spritzerbildung bei zunehmender Schichtanzahl. Der Effekt der zunehmenden Spritzeranzahl äußert sich in ihren Analysen über die ersten zehn Schichten hinweg ausschließlich bei Partikeln, welche unweit der gefertigten Probe landen. Partikel, welche durch die Schutzgasströmung eine größere Wegstrecke zurücklegen, verändern sich in ihrer Anzahl hingegen nicht. Die Autoren vermuten, dass dieser Effekt auftritt, da die Prozessspritzer meist einen größeren Durchmesser besitzen als die Schichtdicke hoch ist. Dadurch können die Prozessspritzer der vorherigen Schichten durch die Pulverschicht scheinen und die Bildauswertung der aktuellen Schicht verfälschen.

REPOSSINI ET AL. (2017) erforschen die Ausbildung von Prozessspritzern und interpretieren die Daten hinsichtlich des Energieeintrags in unterschmelzt (zu wenig Energie), normal aufgeschmolzen und überschmelzt (zu viel Energie). Im Prozess des Überschmelzens entstehen wesentlich mehr Spritzer als in den anderen beiden Fällen. Dieser Effekt kann sowohl bei Veränderung der Lasergeschwindigkeit (REPOSSINI ET AL. 2017) als auch der Laserleistung (YANG ET AL. 2020) nachgewiesen werden.

3.1.3 Schutzgasströmung

Die Schutzgasströmung hat beim PBF-LB/M einen hohen Einfluss auf die Prozessstabilität und die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen. Die Strömung kann einerseits entstehenden Prozessdampf (Schmauch) aus dem Arbeitsbereich des Lasers tragen und somit verhindern, dass der Laserstrahl gestreut oder abgeschwächt wird oder sich Rußpartikel auf der Einkoppelscheibe festsetzen. Andererseits werden zeitgleich Prozessspritzer entfernt, welche zu Bindefehlern im Inneren der gefertigten Bauteile führen können. (LUTTER-GÜNTHER 2020, WIRTH ET AL. 2021) So kann die Verlangsamung der Schutzgasströmung von 3 m/s auf 1 m/s zu einer Erhöhung der Porosität des gefertigten Materials von 0,1 % zu 5-10 % führen. (REIJONEN ET AL. 2020) Die Schutzgasströmung sollte so ausgelegt sein, dass ein laminarer Gasstrom über die Baufläche fließt. Wird die Gasgeschwindigkeit verändert kann es zu lokalen Turbulenzen, mit negativen Effekten auf den Bauprozess, kommen. Bei zu hohen Geschwindigkeiten kann das applizierte Pulver verweht werden. Werden Teile der Schutzgas-Einlassdüse abgedeckt, erhöht dies die Einströmgeschwindigkeit des Gases und führt zu Veränderungen in der Gasausbreitung innerhalb der Prozesskammer. (WIRTH ET AL. 2021)

3.1.4 Prozessunterbrechungen

Die Kritikalität von Bauprozessunterbrechungen beim PBF-LB/M und eine notwendige Vermeidungsstrategie ist im Fehlerkatalog VDI 3405 BLATT 2.8 (2021) dargelegt. Während der Durchführung von Bauprozessen kann es demnach zu beabsichtigten oder auch unbeabsichtigten Prozessunterbrechungen kommen, wobei letztere als kritischer anzusehen sind. Diese Unterbrechungen, welche mit Veränderungen von Bauteiltemperatur und Schutzgasatmosphäre einhergehen, können negative Einflüsse auf die gefertigte Bauteilqualität haben. Vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt werden Prozessunterbrechungen als sehr problematisch interpretiert und werden während Verifikationsphasen nicht akzeptiert (GUMPINGER & PAMBAGUIAN 2019). Prozessunterbrechungen werden als signifikantes Risiko der Bauteilintegrität verstanden und dürfen nur in speziellen Fällen wieder aufgenommen werden, wenn eine geprüfte Wiederaufnahmeprozedur definiert ist. Dieses Vorgehen muss Faktoren, wie Grund der Prozessunterbrechung, maximale Unterbrechungszeit oder Pulverbettabkühllimits einschließen. (NASA 2017a) Es gilt mit jedem Aufwand zu vermeiden, dass ein Bauprozess unterbrochen werden muss. Jede Unterbrechung soll zudem, zusammen mit der Baujobhöhe, ausreichend dokumentiert werden. (NASA 2017b).

STOLL ET AL. (2019) kann im Rahmen einer experimentellen Studie für den Werkstoff 316L konstatieren, dass eine Prozessunterbrechung eine Reduktion der Zugfestigkeit und des E-Moduls von $> 15\%$ nach sich zieht. HAMMOND ET AL. (2019) ermittelt für den Werkstoff AlSi10Mg nach einer Prozessunterbrechung negative Veränderungen der Werkstoffhärte und Zugfestigkeit von ca. 10% , wobei zu erwähnen ist, dass die Bauplattform inklusive der halb fertiggestellten Proben während der Unterbrechung aus- und anschließend wieder eingebaut worden ist. Dies stellt einen Extremfall der Baujobunterbrechungen dar, die sich nicht auf moderatere Unterbrechungen ohne Plattformausbau übertragen lässt. Durch den Aus- und Wiedereinbau können Faktoren wie leichte Positionsänderungen, verstärkte Kontamination der Unterbrechungsschicht oder veränderte thermische Bedingungen nicht ausgeschlossen werden, welche sich in Veränderungen der mechanischen Eigenschaften widerspiegeln können.

Eine Bauprozessunterbrechung kann zudem verbunden sein mit einer Oxidation der Bauteiloberfläche, induziert durch das Öffnen der Prozesskammertüre oder dem Nicht-Aufrechterhalten der Schutzgasatmosphäre. Eine solche Oxidation der Oberfläche kann, gemäß YAP ET AL. (2015), die Schichtanbindung beeinflussen und zu sogenanntem Balling führen. Dieser Effekt tritt auf, da flüssiges Metall im Allgemeinen nicht ohne chemische Reaktion mit einer oxidierten Metalloberfläche in Kontakt treten kann. Dadurch kann sich ein Ball-förmiger Tropfen bilden, welcher nur geringfügig an die vorhergehende Schicht angebunden ist. Dieses Phänomen kann eine Erklärung sein für die durch Stoll und Hammond berichtete Reduktion der Festigkeiten.

3.2 Elektrische Elemente in additiv gefertigten Bauteilen

Gemäß JIANG ET AL. (2017) wird die Sensorintegration in AM-Komponenten eine der Schwerpunkte für die Additive Fertigung im Jahr 2030 sein. So wird im Rahmen der Untersuchungen besagter Studie oder auch durch GAUSEMEIER (2012) der generelle Trend hin zur Integration von Sensoren und anderen elektrischen Komponenten in Maschinenbauteile beschrieben. HARRIS ET AL. (2018) erkennt zudem große technologische Lücken im Bereich der Sensorintegration und MM-Verarbeitung.

Die Integration von Leiterbahnen und Elektronik in Kunststoffbauteile ist wegen des nichtleitenden Strukturwerkstoffs und geringerer auftretender Verfahrenstemperaturen grundlegend einfacher als in Komponenten aus Metall. Aber auch auf-

grund der vergleichsweise kurzen Zeit der Erfindung und Erforschung von metallbasierten AM-Verfahren ist der Polymersektor weiter entwickelt als der Metallsektor. So können beispielsweise HOERBER ET AL. (2014) bereits eine verfahrenstechnische Lösung für das Drucken und Einlegen von Elektronik in mittels Freistrah-Bindemittelauftrag gefertigte Polymerbauteile während des Prozesses vorstellen. Durch andere etablierte und polymerverarbeitende 3-D-Druckverfahren, wie der Materialextrusion oder dem Freistrah-Materialauftrag, lassen sich bereits industriell Elektronikkomponenten auf oder in gefertigte Bauteile drucken (WOHLERS ASSOCIATES 2021).

Um Sensoren während des Prozesses beim PBF-LB/M integrieren zu können, gibt es grundlegend zwei Varianten dies umzusetzen: entweder durch das Einlegen von bestehenden Sensoren oder durch das Drucken von Sensoren in das Bauteil.

3.2.1 Einlegen von elektrischen und sensorischen Komponenten

In Tabelle 2 ist ein Überblick über die Vorarbeiten der Integration von elektrischen und sensorischen Komponenten beim PBF-LB/M gegeben. Im Anschluss an die Tabelle werden die aufgeführten Forschungsarbeiten zudem im Text beschrieben.

Das grundlegende Vorgehen zum Einlegen von elektrischen oder sensorischen Komponenten läuft in mehreren Schritten ab: Der Bauprozess wird bis zu einer definierten Bauhöhe durchgeführt und anschließend unterbrochen. Nun wird manuell, unter dem Öffnen der Bauprozesskammer, Pulver entfernt, um eine Leerstelle/Kavität im Bauteil zu schaffen, in welche die zusätzliche Komponente in das Bauteil eingelegt wird. Anschließend wird der Bauprozess fortgesetzt (vgl. Abbildung 19).

DANI (2019) hat zum Ziel ein intelligentes Werkzeug für den Spritzguss additiv zu fertigen. Zur Umsetzung einer Temperaturüberwachung werden daher Thermoelemente in additiv gefertigte Bauteile eingelegt. Zudem werden zur Messung des anliegenden Drucks im Werkzeug Integrationskonzepte von anschweißbaren DMS und kapazitiven Drucksensoren untersucht. Für die kapazitiven Drucksensoren und die Thermoelemente kann in ersten Versuchen die generelle Funktion nachgewiesen werden. Die DMS-Integration scheint jedoch nicht erfolgreich, da nicht weiter auf das Konzept eingegangen wird und keine Sensordaten im Forschungsbericht erwähnt werden.

Tabelle 2: Überblick von Vorarbeiten aus dem Bereich des PBF-LB/M im Kontext der Integration von Sensoren.

	Relevanteste Metalle bei der AF (Sculpteo 2017, Lanza et al. 2017)				Wichtigste Messgrößen (Reinhart et al. 2019) und RFID-Technologie							Arten der Signalübertragung (Wiebe 2013)				Temperaturschutz			Sensorfixierung			Automation		Einfluss Prozessunterbrechung		
	Aluminiumlegierung	Titanlegierung	Stähle	Nickelbasis-Legierung	Temperatur			Kraft	Beschleunigung	RFID	Elektrische Leiter			Geometrisch	Beschichtung	Metallplatte	Belichtungsparameter	Kraftschluss	Formschluss	Stoffschluss	Bedarf/Konzept	Umsetzung	Gefügeuntersuchungen	Festigkeitsuntersuchungen	Kompensationsmöglichkeiten	
					PT100/Thermoelektrode	SAW	Faseroptik				Faseroptik	DMS	Piezoelement													Eingelegt
Dani		x	x		x				x	x																
Havermann/Maier et al.			x				x	x				x						x	x							
Töppel/Müller/Lausch et al.		x			x				x	x		x	x		x			x	x							
Li et al.		x					x	x				x		x						x						
Mathew et al.		x					x	x				x		x												
Paz et al.		x	x						x			x						x								
Petrat et al.		x								x				x												
Sehrt et al.		x	x						x			x						x		x						
Stoffregen et al.		x						x		x				x				x								
Stoll et al.		x			x		x			x		x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x		
Tomaz et al.		x			x					x				x				x					x			

Die Forschergruppe um *Havermann und Maier* fokussiert sich auf die Integration von Fibre-Bragg-Grating-Sensoren (FBG) in Bauteile aus Edelstahl. In ihrer Forschung teilen sie den Prozess in drei Bereiche: 1) Normal-Bauteilfertigung bis zur Prozessunterbrechung, 2) Stoff-/Formschlüssige Einbettung der lichtdurchlässigen Faser mit gesonderten Bedingungen, 3) Weiterführung des Prozesses. Die stoffschlüssige Anbindung zwischen dem Fasermaterial SiO₂ (Silica) und dem AM-gefertigten Bauteil aus 316L (Edelstahl) gestaltet sich indes als herausfordernd. Während der Fasersensor die Belastung im elastischen Bereich noch erfassen kann, rutscht beim Zugversuch von Proben die Faser aufgrund der schlechten Anbindung durch. (MAIER ET AL. 2013, MAIER ET AL. 2014, HAVERMANN ET AL. 2015a, 2015b)

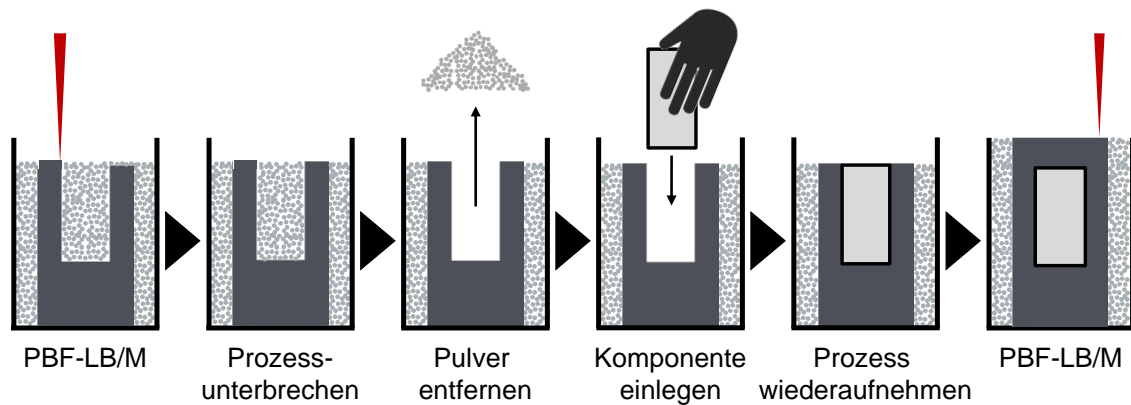


Abbildung 19: Prinzip des manuellen Einlegens einer elektrischen Komponente beim PBF-LB/M erweitert aus LAUSCH ET AL. (2016).

Die Forschergruppe um *Lausch, Müller und Töppel et al.* beschäftigt sich mit der Integration von Piezoelementen in Komponenten aus Titanlegierungen. Im besonderen Fokus sind medizintechnische Anwendungen, wie die Funktionalisierung von Hüftimplantaten. Des Weiteren kann die Forschergruppe ein Thermoelement in einen additiv gefertigten Werkzeugstempel integrieren. (LAUSCH ET AL. 2016, LAUSCH ET AL. 2017, MÜLLER & TÖPPEL 2017, TÖPPEL ET AL. 2018)

Bereits im Jahr 2001 zeigt *Xiachun Li* im Rahmen seiner Dissertation, wie mit Nickel und Edelstahl beschichtete FBG-Sensoren in einem PBF-LB/M-artigen Verfahren in gefertigte Metallprüfkörper integriert werden können. Li gelingt der Nachweis über die Temperaturmessung im Inneren des gefertigten Bauteils, er identifiziert jedoch auch hohe Temperaturgradienten und schnelle thermische Zyklen als Ursache für Probleme bei der Sensorintegration. Der Forscher liefert durch seinen Ansatz die Grundlage und inhaltliche Basis für viele andere Wissenschaftler. (LI 2001)

Mathew et al. untersucht die Integration von faseroptischen Sensoren im PBF-LB/M-Prozess unter Berücksichtigung einer speziellen Oberflächenbeschichtung zur verbesserten Bauteil-Sensor-Anbindung (MATHEW ET AL. 2017). In seinem Fokus liegt die Überwachung von Hochtemperaturanwendungen (MATHEW ET AL. 2015).

PAZ ET AL. (2014) integrieren in ihren Untersuchungen RFID-Tags in aus Stahl- und Nickelbasislegierungen hergestellte Prüfkörper. Sie können in ihren Untersuchungen theoretisch wie auch experimentell Unterschiede in der erzielbaren Materialdurchdringung von LF- und HF-RFID-Tags eruieren.

Sehrt et al. untersuchen in ihrer Forschung die Integration von RFID-Tags (ohne die Angabe des Frequenztyps) und können in ihren Versuchen die Funktionsfähigkeit der Tags nach dem Einsetzen in GP1 und Hastelloy X nachweisen. Wanddicken von bis zu 2,7 mm bei einer Auslesereichweite von über 5 mm können in Vorversuchen mit PBF-LB/M-gefertigten Proben erzielt werden. Im Rahmen der Veröffentlichungen wird zudem die Entwicklung und Beforschung einer Automationseinheit gefordert, welche in der Lage ist, ohne manuelle Eingriffe RFID-Tags in gefertigte Bauteile zu integrieren. Diese Idee kann jedoch nicht realisiert werden. (SEHRT 2010, SEHRT & WITT 2011, SEHRT & WITT 2012)

Einen Piezoaktuator integrieren *Stoffregen et al.* in ein PBF-LB/M gefertigtes Metallgehäuse zur aktiven Schwingungsdämpfung eines Tragwerks. Zur Fertigung des Hybridbauteils wird der Vielschichtaktor in das Metallbauteil eingelegt und mit einer zusätzlichen Platte verschlossen, um nicht gefüllte Bereiche der Kavität vor herabrieselndem Pulver zu schützen. (MAYER ET AL. 2014, STOFFREGEN 2015)

Stoll et al. betrachten in ihren Untersuchungen die Integration von Pt100-Elementen, inklusive Fixierung mit Feder und verifizieren deren Funktionsweise mit der Messung von unterschiedlichen Oberflächentemperaturen (STOLL ET AL. 2018). Des Weiteren betrachten Stoll et al. die Integration von faseroptischen Sensoren zur Prüfung von mechanischer Last und Temperatur und versuchen durch das Einspannen der Faser eine gleichmäßig formschlüssige Anbindung an das Bauteil zu erzielen. Die Anbindung der FBGs ist auch unter Berücksichtigung verschiedener Belichtungsstrategien (z. B. Wobblingstrategie) nicht von ausreichender Güte. (STOLL ET AL. 2016) Zudem wird durch das Team der Einfluss von Prozessunterbrechungen auf die Festigkeit von 316L untersucht, inkl. Bruchflächenanalyse. So können Einbußen von Festigkeit und Veränderung des E-Moduls vermerkt werden, sowohl bei liegend als auch stehend aufgebauten Probekörpern. Verwendet werden unter anderem zweifache und dreifache Remelting-Strategien zur besseren Materialanbindung nach der Unterbrechung. In der jüngsten Veröffentlichung von Stoll et al. gelingt die Integration eines Wirbelstromsensors und der anschließende Nachweis einer Rissdetektion im Bauteil durch diesen. (STOLL ET AL. 2016, STOLL ET AL. 2018, STOLL ET AL. 2019, STOLL 2020, STOLL ET AL. 2021)

TOMAZ ET AL. (2021) integrieren einen SAW-Sensor (engl. surface acoustic wave, sensor, zu Deutsch: Oberflächenwellensensor) in ein Bauteil aus 316L und sind anschließend in der Lage Temperaturen zwischen 20 °C und 200 °C mit dem Sensor zu erfassen.

Weitere Integrationsversuche in relevantem Kontext

Die Forschergruppe um *Chadda und Link* legen während des Fertigungsprozesses eine Metallplatte ein, auf welche ein DMS aufgeklebt ist. Die Enden der Metallplatte werden mittels Lasersystem mit dem additiv gefertigten Metallkörper verbunden und der Einfluss von drei verschiedenen Belichtungsstrategien wird untersucht. Die Metallplatte mit dem aufgeklebten Sensor wird nicht in das Bauteil eingedruckt, sondern nur die Enden der eingelegten Platte mit dem AM-Körper verschweißt. Anschließend wird die Funktionsweise der DMS an einer Universalprüfmaschine nachgewiesen. Im Ausblick wird der Bedarf genannt, DMS-Sensoren vollständig in Bauteile miteinzudrucken. (CHADDA ET AL. 2020, LINK ET AL. 2021)

CLAESSON ET AL. (2019) integrieren einen faseroptischen Sensor in ein Warmumformungs-Werkzeug, um simulativ ermittelte, thermische Belastungen innerhalb des Bauteils mit experimentellen Versuchen vergleichen zu können. Der Sensor wird jedoch erst nach der Fertigung in das Bauteil integriert und durch einen gefertigten Kanal geschoben.

Forscher um *HOSSAIN ET AL. (2016, 2017)* erforschen die Integration von Piezokeramiken vom Typ PZT vorwiegend in mittels Elektronenstrahlschmelzen (PBF-EB/M) gefertigte Bauteile. Sie bemerken bei der Verarbeitung von Ti6Al4V Veränderungen der in Schlifffbildern erkennbaren Schmelzbahnen im Bereich der Bauprozessunterbrechungsschicht. Im Übergangsbereich ist das Schmelzbad sichtlich flacher. Die mechanischen Eigenschaften (PBF-EB/M) werden zudem beeinflusst durch die Unterbrechung, da es zu einer Nichtanbindung von Einzelpartikeln in der Unterbrechungsschicht gekommen ist, in welcher Zugproben versagten. Im Rahmen von Experimenten kann die Funktion der Piezokeramiken verifiziert werden. Des Weiteren untersucht Hossain in einem Versuch die Integration von Temperatursensoren (Thermoelement und PZT-Sensor) in ein Bauteil aus Inconel 625. Die Integration der Sensoren erfolgt allerdings außerhalb der Baukammer, sodass es sich nicht um eine Integration während des PBF-LB/M-Prozesses handelt.

Eine LED integrieren *Petrat et al.* in eine Metallstruktur aus 316L. Hierfür verwenden sie einen hybriden Fertigungsprozess, sodass sie zu Beginn mittels PBF-LB/M eine Gitterstruktur aufbauen, von Pulver befreien und von der Bauplattform abtrennen. Anschließend wird eine LED inklusive Verkabelung in das Halbzeug eingelegt und die Kavität mittels Laserpulverauftragsschweißen verschlossen. (PETRAT ET AL. 2018)

3.2.2 Additive Fertigung von elektrischen Funktionsteilen

Das pulverbettbasierte Schmelzen von Metall zur Herstellung von elektrischen Komponenten ist noch kaum erforscht, da MM-Mechanismen nötig sind, um elektrische Leiterbahnen, isolierende Materialbereiche und einen Strukturwerkstoff gleichzeitig verarbeiten zu können. Dennoch gibt es erste Forschungen in diesem Bereich:

Koopmann entwickelt einen MM-Mechanismus zur Fertigung von elektrischen Leiterbahnen und betrachtet die Fertigbarkeit von Keramiken (Gemisch aus ZrO_2 und Al_2O_3) und elektrischen Leitern in Kombination. Aus dem Werkstoff CuNi44Mn1 gelingt die Fertigung von Leiterbahnen im Strukturwerkstoff von X38CrMoV5. Die Bauteile sind jedoch riss- und porenbehaftet. (KOOPMANN 2020)

Silbernagel et al. verarbeitet AlSi10Mg zur Nutzung in elektrischen Motoren. Durch das typische Gefüge nach dem PBF/LB-M ist der elektrische Widerstand in horizontaler Ebene um 22 % niedriger als in vertikaler Richtung. Dieser richtungsabhängige Effekt kann aber durch die Wärmenachbehandlung mittels T6-Zyklus vollständig eliminiert und der spezifische Widerstand zusätzlich verringert werden auf bis zu $5,67 \mu\Omega\text{cm}$. Es werden jedoch noch keine elektrischen Strukturen aufgebaut, das gefertigte Material wird lediglich auf seine prinzipielle Eignung untersucht. (SILBERNAGEL ET AL. 2018)

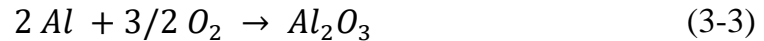
Silbernagel et al. weist zudem die Verarbeitbarkeit von Reinkupfer mittels PBF-LB/M nach, es wird jedoch eine hohe Reflektivität von Kupfer im Wellenlängenbereich von 1094 nm verzeichnet. Im Rahmen der Versuche können Komponenten von bis zu 54 % IACS aufgebaut werden. Zukünftige Anwendungen werden im Bereich elektrischer Motoren, neuartiger Antennendesigns oder elektromagnetischer Anwendungen gesehen. (SILBERNAGEL ET AL. 2019)

3.3 Werkstofftechnik Metall

Oxidation von Aluminium

Tritt Aluminium mit Sauerstoff in Kontakt beginnt die Oberfläche zu oxidieren. Dies gilt sowohl für reines Aluminium als auch für Aluminium-Magnesium-Legierungen. Es bildet sich eine Oxidschicht aus amorphem Aluminiumoxid (Al_2O_3), die sich anschließend mit der Zeit verdickt. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Oxidschichtdicke ist zudem abhängig von der herrschenden Temperatur.

(MAAB 2019) Freies Aluminium kann, gemäß MAAB (2019), mit den Sauerstoffmolekülen wie folgt reagieren:



Bereits von AlSi10Mg-Pulver ist es bekannt, dass die Partikel, abhängig von ihrem Verwendungsalter, Oxidschichten auf ihrer Oberfläche von ~4 nm bis zu ~38 nm aufweisen. Auch in dieser Oxidschicht liegt vorwiegend amorphes Al_2O_3 vor, sowie zu einem geringeren Anteil $MgAl_2O_4$ (vgl. Abbildung 20). (RAZA ET AL. 2021) Die Arbeiten von JEURGENS ET AL. (2002) konnten zudem zeigen, dass diese Oxidschichten bei Aluminium bereits bei geringen Temperaturen entstehen. Die Ausbildung der Oxidschichten ist bis zu einer Temperatur von 573 K recht ähnlich und folgt einem logarithmischen Verlauf, sodass sich bereits nach einer Zeit von unter 2 s ein zeitlich stabiler Oxidfilm von 0,5-1,0 nm auf der Oberfläche entwickelt. Für Temperaturen unter 350 K bleibt diese Oxidschicht in ihrer Dicke konstant, für Temperaturen darüber ist mit einem Wachstum der Schicht zu rechnen. (JEURGENS ET AL. 2002) Aluminiumoxid ist ein sehr guter Isolator und zeichnet sich demnach durch eine hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit (20-30 V/ μ m) und Härte (200-350 HV) aus (OSTERMANN 2007).

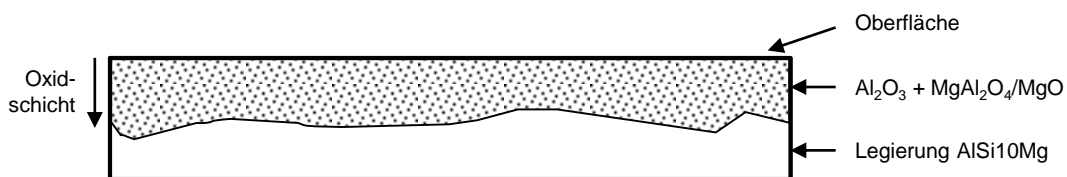


Abbildung 20: Schematischer Aufbau von oxidiertem AlSi10Mg in Anlehnung an OSTERMANN (2007) und RAZA ET AL. (2021).

Intermetallische Phasen und Legierungsbildung

Bei der Vermischung von Legierungen und Metallen als Einzelelement kann es, abhängig von der auftretenden Temperatur und dem Mischungsverhältnis, zur Ausbildung von neuen Legierungsbereichen oder aber von intermetallischen Phasen kommen. Intermetallische Phasen zeichnen sich in der Regel durch eine hohe Härte, Sprödigkeit und Festigkeit aus. Sie weisen im Phasendiagramm meist nur eine geringe Phasenbreite auf. Der elektrische Widerstand ist um Größenordnungen höher, als der reiner Übergangsmetalle. (PETZOLDT ET AL. 2013, OSTERMANN 2007, PFEIFER 2016)

in der Literatur unterschiedliche Angaben vor. Der Einbruch des Härteverlaufs lässt sich somit mit der einer hohen Unsicherheit dieses Werts begründen.

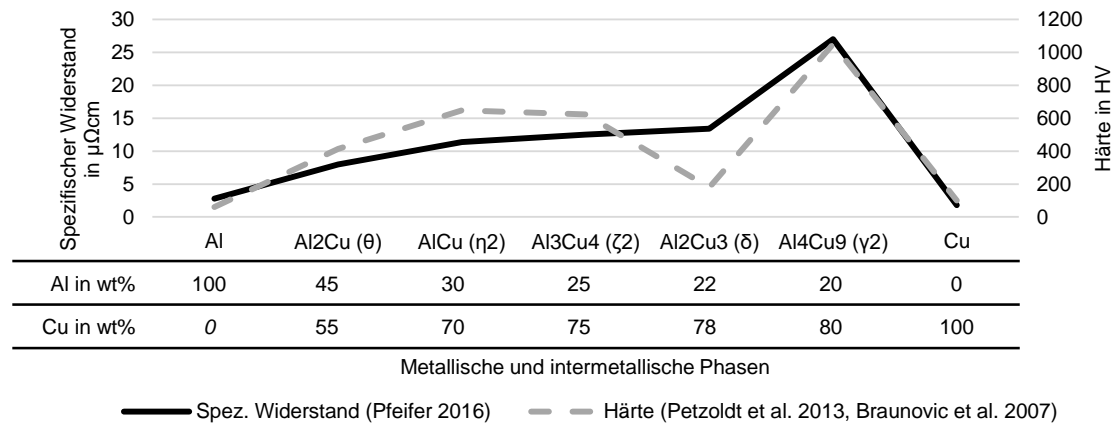


Abbildung 22: Verlauf von spezifischem Widerstand und Härte von Aluminium-Kupfer in Abhängigkeit der vorliegenden Phasen (PETZOLDT ET AL. 2013, BRAUNOVIC ET AL. 2007, PFEIFER 2016).

3.4 Defizite des Stands der Technik

Im Folgenden sind aktuelle Defizite des Stands der Technik gelistet, welche sich aus den Abschnitten 3.1 bis 3.2 und aus der Tabelle 2 ableiten lassen.

1. Prozessketten zur Sensorintegration

In den Vorarbeiten zur Sensorintegration beim PBF-LB/M wird das Vorgehen zur Integration beschrieben und es werden wichtige, durchgeführte Handlungsschritte aufgelistet. Es wird jedoch bislang keine gesamtheitliche Integrations-Prozesskette aufgestellt und detailliert analysiert. Ein Vorgehen, welches die Integrationsmöglichkeiten aufzeigt und dem Nutzer eine Entscheidungsgrundlage mit verschiedenen Handlungsoptionen liefert, liegt nicht vor.

2. Temperaturlast auf eingelegte Komponenten

In Vorarbeiten von STOLL (2020) werden bereits Untersuchungen zur Temperaturlast in Kavitäten beim PBF-LB/M vorgestellt. Jedoch werden zur Erfassung der auftretenden Temperaturen bereits von oben verschlossene Kavitäten verwendet. Da das Vorgehen von Stoll ein Einlegen des Sensors und das anschließende Verschließen der Kavität von oben vorsieht, sind detailliertere Untersuchungen nötig, um die thermische Last präziser einschätzen zu können. MÜLLER & TÖPPEL (2017)

haben ähnliche Versuche bereits durchgeführt, jedoch keine detaillierten Ergebnisse in diesem Bereich vorgestellt.

3. Aluminiumlegierungen

Obwohl Aluminiumlegierungen zu den wichtigsten Materialien beim Laserstrahlschmelzen (HOELZLE ET AL. 2017) und in der Industrie (SCULPTEO 2017) zählen, sind bislang keine Untersuchungen zur Integration von Sensoren in solche bekannt.

4. Einfluss von Prozessunterbrechungen beim PBF-LB/M

STOLL ET AL. (2019) können bereits Analysen zum Einfluss von Prozessunterbrechungen auf die Zugfestigkeit gefertigter Bauteile vorstellen. Die Untersuchungen sind aber material- und prozessparameterabhängig (der Fokus liegt auf 316L, verarbeitet mit einem Parametersatz), sodass die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Werkstoffe (wie AlSi10Mg) und Unterbrechungsszenarien nur eingeschränkt möglich ist. Weitere Analysen sind daher notwendig, welche die Detektierbarkeit und den Einfluss von Unterbrechungen genauer betrachten.

5. Kraftdetektierende Sensorik

Gemäß REINHART ET AL. (2019) ist eine der wichtigsten in der Industrie zu erfassenden Messgrößen die Kraft. Dementsprechend ist für die Kraftdetektion eine gute kraftschlüssige Verbindung notwendig. LI (2001), HAVERMANN ET AL. (2015a) und STOLL (2020) haben diesen Bedarf ebenso erkannt und experimentieren an der Integrierbarkeit von mit Metall beschichteten, faseroptischen Sensoren. Nachteilig ist, dass sich die Faser nur parallel zur Beschichterrichtung integrieren lässt, die große Sprödigkeit der Fasern ein Auseinanderbrechen beim Integrieren fördert und der thermische Ausdehnungskoeffizient eine Herausforderung darstellt (STOLL 2020). Durch die hohen auftretenden Temperaturen ($> 430\text{ °C}$) beim Anschweißen der Fasern, löst sich die Verbindung zwischen der Metallbeschichtung und der Faser, sodass keine Kraftübertragung in die Faser und damit auch keine zuverlässige Detektion von Kräften oder Temperaturen mehr möglich ist (HAVERMANN ET AL. 2015b). Daher ist es nötig andere Möglichkeiten zu erforschen, welche die Krafterfassung in PBF-LB/M-gefertigten Bauteilen zulassen.

6. Sensorsignalübertragung

Die Verkabelung von Sensorik ist in bisherigen Vorarbeiten ein restriktiver Faktor für die Integration und das geometrische Design von Bauteilen. Umständliche Montageschritte seitlich durch das Bauteil (STOLL ET AL. 2018) und eine damit

einhergehende, nicht mehr vollständige Kapselung bereiteten Probleme. Zudem gibt es erste Untersuchungen zur Integrierbarkeit von drahtlos kommunizierenden RFID-Tags in Metall (PAZ ET AL. 2014, SEHRT & WITT 2012). Eine gesamtheitliche Betrachtung der Signalübertragung wird jedoch bisher nicht durchgeführt und die Problematik nicht im Detail analysiert, womit systematische Lösungswege, auch für die Datenübertragung von Sensoren, abzuleiten sind.

7. PBF-LB/M gefertigte elektrische Leiter und eingelegte Sensorik

Obwohl in Vorarbeiten bereits die additive Fertigung von elektrischen Leitern, als auch das Einlegen von Sensorik untersucht werden, sind keine Ansätze bekannt welche die Fertigung von Leitern mittels PBF-LB/M und die Verkabelung eingelegter Sensorik miteinander verknüpfen, um so die Herausforderung des schwer handhabbaren Kabelmanagements zu lösen.

8. Automatisierte Sensormontage

Die Integration zusätzlicher Komponenten beim PBF-LB/M erfolgt in allen Vorarbeiten bisher stets manuell. Ansätze der automatisierten Integration von Komponenten, wie sie bspw. im Bereich des Freistrah-Bindemittelauftrags zu finden sind (GLASSCHROEDER 2018), sind nicht bekannt. Die Nachteile von langen Prozessunterbrechungen unter der Anwesenheit von Sauerstoff im Bauraum und einhergehenden großen Temperaturveränderungen im Bauteil sind bekannt. So skizzieren drei Forschergruppen (SEHRT & WITT 2011, HOSSAIN 2017, STOLL 2020) zwar bereits die Vorteile von automatisierten Lösungen, umgesetzt werden kann jedoch bisher kein Ansatz. Nötige Softwareschnittstellen wurden bisher nicht umgesetzt, Handhabungsabläufe sind undefiniert und demnach auch eine experimentelle Validierung der Idee ausstehend.

9. Methodik

Erste materialspezifische Teillösungen einer Sensorintegration werden durch die aktuellen Forschungsergebnisse unter punktueller Betrachtung einzelner Sensorarten ermittelt. Das Einlegen von isolierten Drähten ist hierbei im Fokus. Es fehlt aber bislang ein materialunabhängiges Vorgehen, die gesamtheitliche Prozessbetrachtung ist nicht ausreichend und verschiedene Sensorsignalübertragungsarten werden nicht systematisch untersucht.

3.5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich aus dem aktuellen Stand der Technik und den sich daraus ergebenden Defiziten der folgende Handlungsbedarf ableiten, welcher im Rahmen dieser Arbeit adressiert werden soll:

- Integration von Sensoren in Aluminiumbauteile,
- Einbettung von temperatur- und krafterfassender Sensorik,
- Fertigung von Leiterbahnen und deren Kombination mit eingelegter Sensorik,
- Implementierung von drahtlosen Datenübertragungsmöglichkeiten,
- Untersuchung zum Einfluss von Prozessunterbrechungen,
- Umsetzung einer automatisierten Sensorintegration und
- gesamtheitliche Betrachtung aller Faktoren in einem Handlungsleitfaden.

Die adressierten Themenpunkte erweitern damit den aktuellen Stand der Technik auf methodischer als auch prozesstechnischer Ebene (vgl. Abbildung 23).

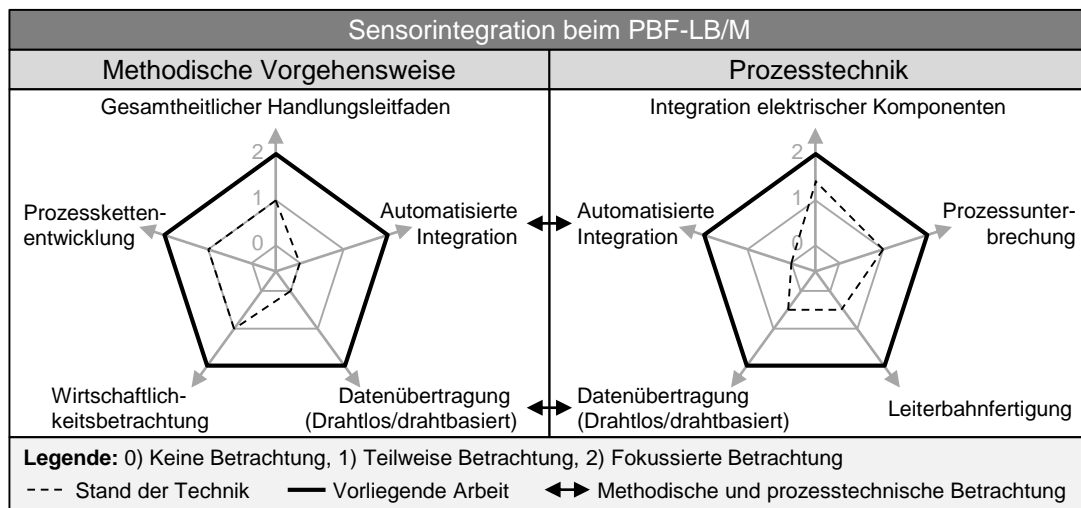


Abbildung 23: Erweiterungen des Stands der Technik durch diese Arbeit.

4 Prozesskettenentwicklung und Sensorauswahl

Gemäß dem methodischen Vorgehen aus Abschnitt 1.5 dient dieses Kapitel dazu, anforderungsgerechte Fertigungsschritte und geeignete Sensoren für die Integration zu definieren (vgl. Abbildung 24). In diesem Rahmen werden Anforderungen und Einflussgrößen (Abschnitt 4.1) systematisch analysiert, bevor auf dieser Basis eine allgemeine Prozesskette zur Sensorintegration (Abschnitt 4.2) aufgestellt werden kann. Durch die Kenntnis des Fertigungsablaufs können geeignete Sensoren für die Integration ermittelt werden (Abschnitt 4.3) und die Prozesskette sensor-spezifisch adaptiert werden (Abschnitt 4.4).

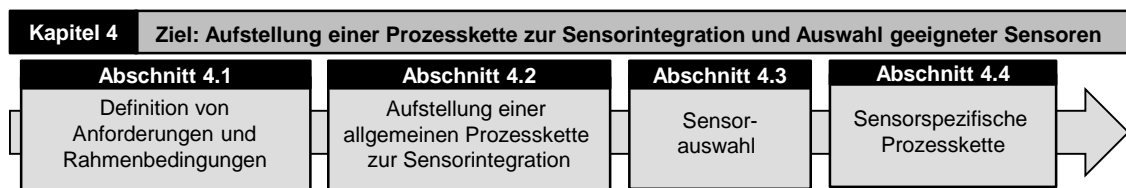


Abbildung 24: Ziel und schrittweises Vorgehen von Kapitel 4.

4.1 Definition von Anforderungen und Rahmenbedingungen

In diesem Schritt sollen Anforderungen an das Sensorintegrationskonzept bestimmt werden, welche aus den Herausforderungen und dem Bedarf der Ausgangssituation und dem Stand der Technik abgeleitet werden. Diese gestellten allgemeinen Anforderungen sind die Grundlage für die Auswahl von Komponenten und die übergeordnete Konzeptionierung des Vorgehens. Sie werden ergänzt durch die spezifischen Anforderungen an Prozess und Auslegung in den Folgekapiteln 5 und 6.

Die allgemeinen Anforderungen an Prozess und Konzept lassen sich in Anlehnung an ISO/IEC/IEEE 29148 unterteilen in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen (vgl. Tabelle 3). Von hoher technischer Wichtigkeit ist, dass der Sensor an der gewünschten Messstelle positioniert werden kann, dieser durch den schichtweisen AM-Aufbau eingekapselt werden kann und das Bauteil bei diesen Schritten nicht in seiner Struktur geschwächt wird. Es gilt die Sensorfunktion während und nach der Integration zu erhalten – thermisch oder durch das Metallpulver induzierte Schäden müssen vermieden werden. Ein Sensor muss zudem beliebig an jeder Stelle im Bauteil platziert und der Integrationsprozess wiederholbar und robust durchgeführt werden können. Aus übergeordneter Sicht müssen die ermittelten Lösungen zudem skalierbar, praxisnah und wirtschaftlich sein, um für einen Transfer in industrielle Anwendungen in Frage kommen zu können.

Tabelle 3: Unterteilung der Anforderungen an das Integrationskonzept in funktional und nicht-funktional.

Funktionale Anforderungen	Nicht-funktionale Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Zugänglichkeit zur Messstelle im Bauteil • Vollständige Kapselbarkeit der integrierten Sensorik • Minimale Bauteilschwächung durch Sensorintegration • Erhalt und Schutz der Sensorfunktionen • Flexible Positionierbarkeit von Sensorik im Bauteil • Gute Wiederholbarkeit und Robustheit des Vorgehens 	<ul style="list-style-type: none"> • Nähe zu industrieller Praxis • Skalierbarkeit der Sensorintegration • Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozess

Neben den Anforderungen gilt es durch umfassende Analyse, genaue Kenntnis und Miteinbezug von Einflussfaktoren eine Integration von Sensoren für eine spezifische Anwendung anforderungsgerecht planen und umsetzen zu können (siehe Liste an Einflussgrößen gemäß Anhang A5, Abbildung 110 und Tabelle 37).

Der Fokus der Analyse liegt auf drei Rubriken, welche einen großen direkten Einfluss auf den Fertigungsprozess besitzen:

- Die **Anwendung** und der **Bauteileinsatz** bestimmen die grundsätzlichen Fragestellungen nach zu verwendendem Werkstoff, erforderlichen Härten oder der Bauteilgeometrie. Vor allem aber auch die Einsatzbedingungen der Komponente sind für die Sensorintegration wichtig. Auftretende Temperaturen, Drücke, Vibrationen oder chemische Bedingungen beeinflussen die Sensorauswahl, dessen Positionierung und die notwendige Kapselung von Umgebungseinflüssen.
- Um einen Sensor in ein **Bauteildesign** integrieren zu können, muss entsprechend Platz für die Sensorkomponente und deren Verkabelung eingeplant werden. Der Sensor sollte einerseits möglichst nah an der auftretenden Messgröße sitzen, andererseits die eigentliche Bauteilfunktion, wie z. B. strömungsoptimierte Oberflächen oder belastungsgerecht ausgelegte Streben, nur geringfügig beeinflussen.
- Das PBF-LB/M ist ein **Fertigungsverfahren**, welches auf metallischem Pulverwerkstoff basiert. Die Fließfähigkeit dieses Pulvers, aber auch die verbaute Schutzgasführung, das verwendete Pulverauftragssystem oder die Höhe der eingebrachten Laserenergie wirken, neben vielen weiteren Faktoren, auf die schichtweise gefertigte Komponente ein.

4.2 Allgemeine Fertigungsprozesskette

Im nächsten Schritt gilt es aus den Anforderungen und Einflussfaktoren eine allgemeine Prozesskette abzuleiten. Hierfür wird der Integrationsvorgang durch Analyse der Literatur und durch den Vergleich mit konventionellen Montageschritten in alle potenziell nötigen Arbeitsschritte untergliedert. Diese Unterteilung ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Prozesskette des PBF-LB/M besteht weiterhin aus Pre-, In- und Post-Prozess. Die allgemeinen Schritte einer AM-Baujobdurchführung sind jedoch erweitert um für die Sensorintegration notwendigen Arbeitsschritte.

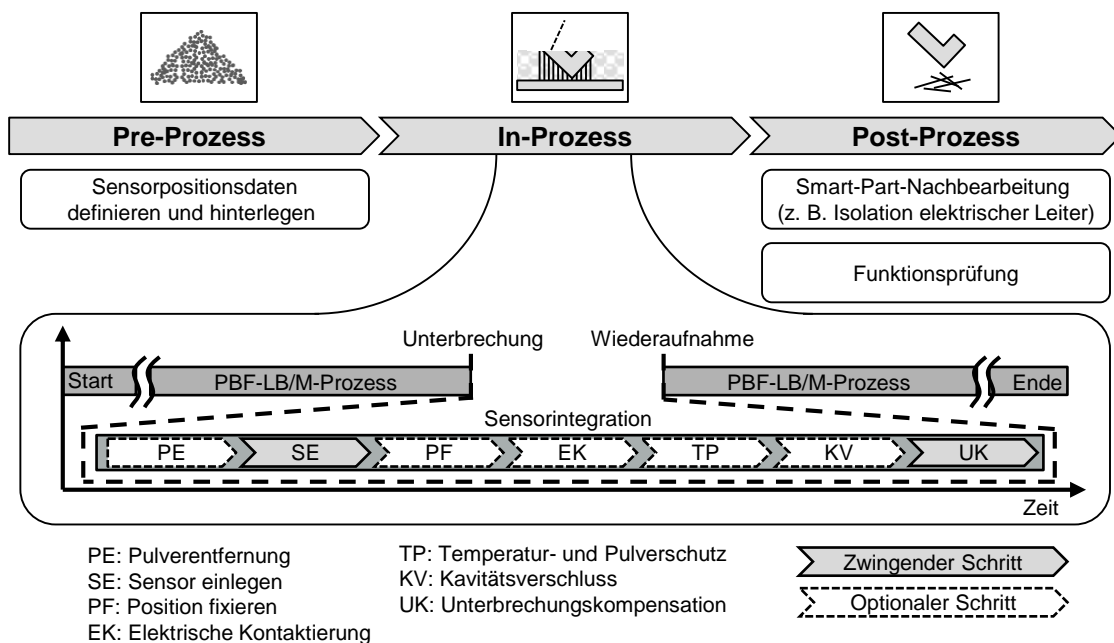


Abbildung 25: Notwendige Prozessschritte für die Sensorintegration.

Im Folgenden werden die in Abbildung 25 aufgeführten Schritte näher erläutert.

Im Rahmen des **Pre-Prozesses** müssen die CAD-Daten des AM-Bauteils um eine Kavität erweitert werden und Sensorpositionsdaten daraus abgeleitet und an die Maschine übergeben werden. Der standardisierte **In-Prozess** wird, wie in Abbildung 75 visualisiert, ergänzt. Nachdem der additive Fertigungsprozess eine zuvor definierte Schicht erreicht hat, wird der Prozess unterbrochen, um die Integration eines Sensors durchzuführen. Der Sensorintegrationsprozess lässt sich hierbei in sieben allgemeine Prozessschritte untergliedern. Abhängig vom ausgewählten Sensor, kann zwischen optionalen und zwingend nötigen Schritten unterschieden werden.

- 1) **Pulverentfernung** (PE, optional): Die Aussparung für die einzulegende Komponente ist prozessbedingt mit Metallpulver gefüllt. Dieses Metallpulver gilt es präzise und mit ausreichend guter Pulverreinheit zu entfernen. Der Schritt ist optional, da eine Komponente auch in die mit Pulver gefüllte Kavität hineingedrückt werden kann.
- 2) **Sensor einlegen** (SE, zwingend): Der zu implementierende Sensor muss nun in die hinreichend gesäuberte Aussparung innerhalb des Bauteils eingelegt werden. Hierbei ist zu beachten, dass der Sensor nicht aus der Aussparung herausragen darf, da der anschließende Pulverauftragsprozess ansonsten in der Regel nicht mehr stattfinden kann.
- 3) **Position fixieren** (PF, optional): Der Prozess des Fügens sorgt dafür, dass der Sensor in seiner Position innerhalb des Bauteils ausreichend gut gesichert ist (Kraftschluss, Formschluss oder Stoffschluss). Der Schritt kann entfallen, wenn bspw. durch die Auslegung der Kavität oder das umgebende Pulver bereits eine indirekte Fixierung der Komponente gewährleistet werden kann.
- 4) **Elektrische Kontaktierung** (EK, optional): In diesem Schritt wird die Signalübertragung des Sensors sichergestellt. Dies kann beispielsweise das Kontaktieren von isolierten Drähten mit dem Sensor beinhalten. Für ein in sich geschlossenes System, ohne nötige Kommunikation zur Außenwelt sowie für Systeme welche drahtlos kommunizieren, kann dieser Schritt entfallen.
- 5) **Temperatur- und Pulverschutz** (TP, optional): Es kann nötig sein die integrierte Elektronik nach dem Einlegen vor den prozessbedingten Umgebungseinflüssen zu schützen. Beispielsweise umsetzbar durch das zusätzliche Einlegen einer kavitätsverschließenden Metallplatte oder dem Einfüllen eines aushärtenden, positionsfixierenden, isolierenden und schützenden Mediums. Der Schritt kann z. B. entfallen, wenn eine Komponente aktiv mit dem Bauteil verschweißt werden soll oder bereits über eine schützende Einhausung verfügt.
- 6) **Kavitätsverschluss** (KV, optional): Der Schritt des Kavitätsverschlusses dient dazu, die Kavität so vorzubereiten, dass anschließend ein erneuter Pulverschichtauftrag möglich wird. Dies wird beispielsweise durch das Auffüllen der Kavität mit Pulver erreicht. TP und KV können zusammenfallen, wenn ein Sensorschutz durch den Verschluss der Kavität entsteht. Soll der Sensor nicht gekapselt werden, kann der KV-Schritt übersprungen werden.
- 7) **Unterbrechungskompensation** (UK, zwingend): Bevor der PBF-LB/M-Prozess wiederaufgenommen werden kann, muss die oberste Pulverschicht

des Pulverbetts im Bauraum vorbereitet werden, vergleichbar mit dem Aufziehen einer Startschicht beim Baujobstart. Verbliebene Spalte an der Kavität oder ungewollten Pulveranhäufungen im Pulverbett können durch Schichthomogenisierung kompensiert werden. Abhängig vom verarbeiteten Material, der Bauplattformtemperatur und der Prozessunterbrechungszeit können zudem Maßnahmen Sinn ergeben, welche einen Temperaturschwund des gefertigten Bauteils, kompensieren.

Ist der Fertigungsprozess mittels PBF-LB/M abgeschlossen, gilt es Schritte der Nachbearbeitung (**Post-Prozess**) durchzuführen, welche Smart-Part-spezifisch sind. Dies kann bspw. die nachträgliche Isolation von elektrischen Strukturen durch Eingießen eines Isolators sein, oder die Bearbeitung von Anschlusslitzen, welche aus dem Bauteil ragen. Zudem kann eine zusätzliche Funktionsprüfung der verbauten Sensorik Sinn ergeben.

4.3 Sensorauswahl

Gemäß BERNSTEIN (2014) ist die Sensorauswahl für eine erfolgreiche Integration und die anschließende gewünschte Funktionsweise der Bauteile essentiell. Daher fokussiert sich dieser Abschnitt auf die Findung und Auswahl geeigneter Sensoren.

4.3.1 Ermittlung und Einordnung von Anforderungen an die Sensorik (PBF-LB/M-spezifisch)

Um Sensoren beim PBF-LB/M in die gefertigten Bauteile integrieren zu können, müssen diese allen Anforderungen des AM-Fertigungsprozesses gerecht werden (vergleiche vorangehende Abschnitte 4.1-4.2). Darauf aufbauend wird unter Berücksichtigung von Literaturerfahrungswerten eine Einflussmatrix nach LINDEMANN (2009) erstellt, welche darlegt welche Einflussgrößen es bei der Sensorauswahl zu berücksichtigen gilt (vergleiche Abbildung 26). Zudem werden die Merkmale danach bewertet, ob es sich bei ihnen um kritische, passive, aktive oder träge Faktoren handelt. Kritische Merkmale beeinflussen die anderen Parameter sehr stark, träge Größen können hingegen für sich alleine stehen. Aktive Ausprägungen üben viel Einfluss auf andere Faktoren aus, werden jedoch selbst nur im geringen Maße beeinflusst. Für passive Kriterien gilt das umgekehrt. Abhängig von der Häufigkeit der Nennung des Faktors in der Literatur wird objektiv auf die Relevanz geschlossen (vgl. Kreisdurchmesser in Abbildung 26). Durch die Literaturanalyse wird erkennbar, dass vor allem eine gute Einbettung (feste Positionierung), die richtige Sensorkommunikationsart, eine ausreichende Temperaturbeständigkeit

sowie die Sensorgröße, von hoher Relevanz ist. Doch auch die Fragestellung der Energieversorgung des Sensors gilt es frühzeitig zu lösen, da die aktiven Merkmale alle anderen besonders stark beeinflussen.

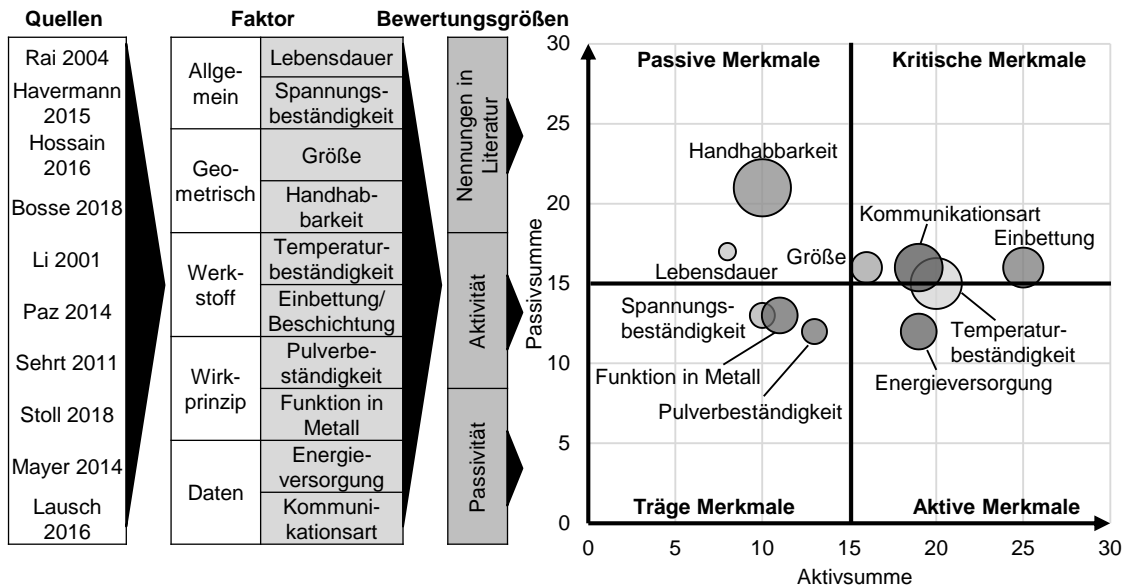


Abbildung 26: Einflussmatrix von Faktoren, welche für die Sensorauswahl für die Integration im AM-Prozess von Bedeutung sind (Kreisgröße abhängig von den Nennungen in der Literatur: min.: eine Nennung, max.: zehn Nennungen).

4.3.2 Auswahl bestehender Produkte

Durch die Kenntnis der allgemeinen Prozesskette zur Sensorintegration und der AM-spezifischen Anforderungen an einen Sensor, kann eine Sensordatenbank erstellt und mit auf dem Markt verfügbarer Sensorik befüllt werden. Die Datenbank (vgl. Anhang A5, Abbildung 111 und Abbildung 112) sollte nach Möglichkeit für jeden Sensor alle Informationen zu den Sensor-Zielgrößen (vgl. Abbildung 27) beinhalten. Die Zielgrößen setzen sich aus allgemeinen Anforderungen an einen Sensor und AM-spezifischen Aspekten (vgl. vorherigen Abschnitt) zusammen. Es gibt Faktoren wie die Lebensdauer oder die Spannungsbeständigkeit (vgl. Abbildung 26), welche schwer zu ermittelnde Größen sind und normalerweise nicht vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden. Nach diesen Größen kann daher auch in der Datenbank nicht gefiltert werden. Die Faktoren sind situativ bedingt in den Sensorauswahlprozess miteinzubeziehen und bedürfen gegebenenfalls den direkten Austausch mit dem Sensorhersteller.

Die eigentliche **Sensorauswahl** kann nun begonnen werden, indem der Bedarf einer bestimmten Messgröße an einem Messpunkt in einem Bauteil festgelegt wird.

Anschließend werden die Anforderungen an den Sensor in einer Zielgrößen-Abfrage festgelegt, diese mit der Datenbank abgeglichen und passende Ergebnisse gefiltert. Die Nutzerin kann nun die Ergebnisse bewerten und prüfen, ob die vorher definierten Zielgrößen zu offen oder zu restriktiv getroffen worden sind, um eine fundierte Sensorauswahl durchführen zu können. Nach ggf. mehreren Iterationen werden die Zielgrößen insoweit nachgeschärft, dass das Filterergebnis die Auswahl des am besten geeigneten Sensors erlaubt.

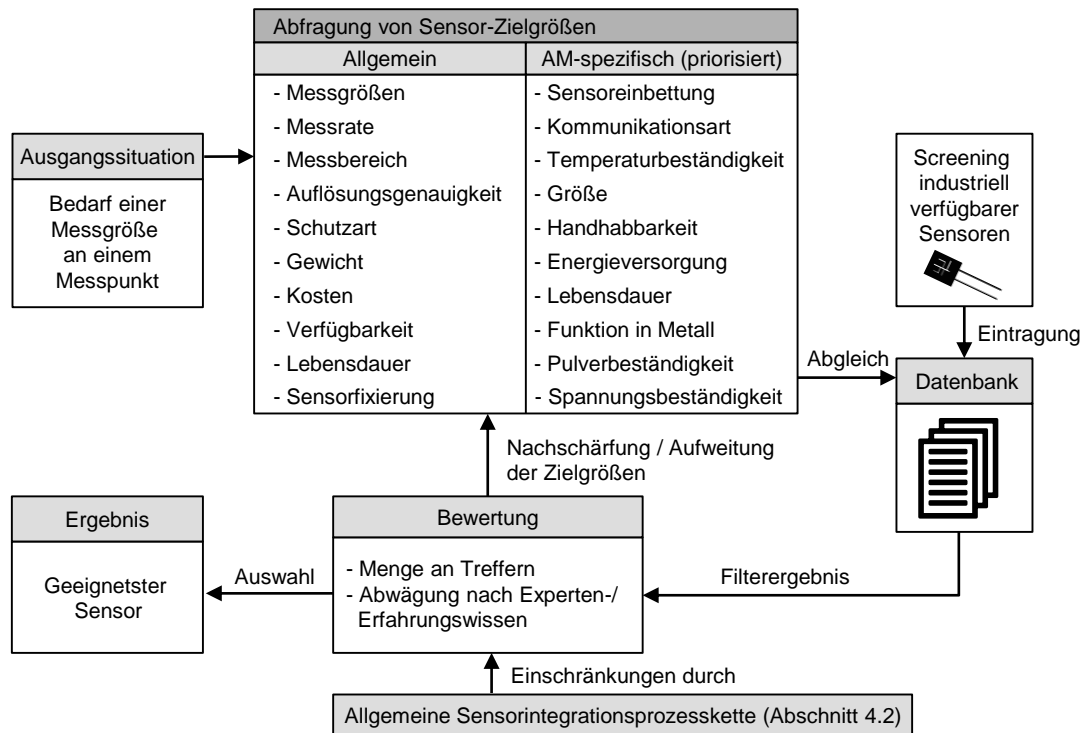


Abbildung 27: Vorgehen zur Sensorauswahl.

Durch die Festlegung auf einen Sensor liegen nun konkrete Daten für die AM-spezifischen Zielgrößen vor (vgl. Abbildung 28). Im Rahmen des Auswahlprozesses werden beispielhaft drei Komponenten ausgewählt, welche die industriell wichtigen Kenngrößen Temperatur und Kraft abdecken können, sowie eine drahtlose Kommunikation erlauben. Diese Sensoren bilden die Basis für die Folgeuntersuchungen in den Kapiteln 5, 6 und 7.

Kenngröße	Name	Sensor-kapselung	Geometrische Dimension	Fixierung	Temperaturbeständigkeit	Handhabbarkeit	Datenübertragung	...
Temperatur	Pt100	ja	4,8 mm ³	Kraftschluss	bis 600 °C	mittel	kabelbasiert	...
Kraft	DMS	ja	400,0 mm ³	Stoffschluss	bis 300 °C	mittel	kabelbasiert	...
Drahtlose Kommunikation	RFID	ja	353,3 mm ³	Formschluss	bis 125 °C	sehr gut	drahtlos	...

Abbildung 28: Eigenschaften der ausgewählten Sensoren (vgl. Anhang A4)

4.4 Sensorspezifische Prozesskette

Mit Hilfe der Kenntnis der Sensoreigenschaften kann die allgemeine Prozesskette zur Sensorintegration (Abbildung 29) nun präzisiert und auf den spezifischen Fall angepasst werden. Abhängig vom geplanten Anwendungsfall und den Eigenschaften des Sensorsystems muss evaluiert werden, welcher der optionalen Prozessschritte benötigt wird oder wegfallen kann. Im Falle eines drahtlos kommunizierenden Sensors kann beispielsweise eine elektrische Kontaktierung entfallen, aber eine zusätzliche Temperaturschutzmaßnahme nötig sein, falls die thermische Beständigkeit für eine Integration nicht ausreicht. Entfällt zusätzlich der Bedarf eines speziellen Kavitätsverschlusses, reduziert sich die spezifische Prozesskette entsprechend, wie es Abbildung 29 zeigt.

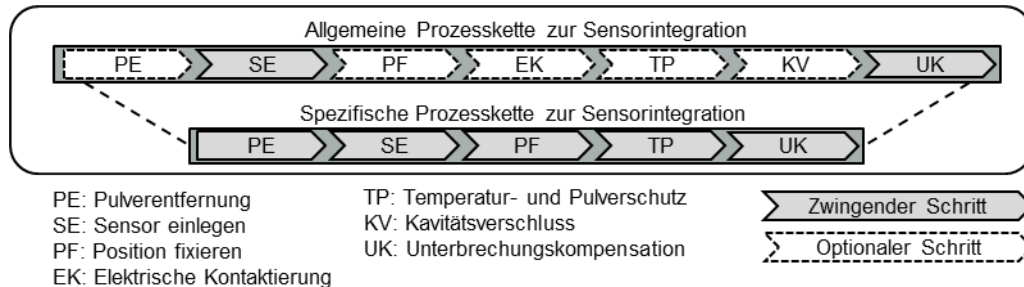


Abbildung 29: Exemplarische Darstellung der Reduktion der allgemeinen zur spezifischen Prozesskette für einen drahtlos kommunizierenden Sensor.

Durch die Kenntnis der spezifischen Prozesskette können nun, im Rahmen von Kapitel 5, konkrete Lösungen für die benötigten Schritte ermittelt und in die Feinplanung des Prozesses eingebunden werden.

4.5 Fazit

Mit Hilfe der Ausführungen und Ergebnisse dieses Kapitels können anforderungsgerechte Fertigungsschritte definiert und in einer allgemeinen Prozesskette unter-

geordnet werden. Dadurch wird es dem Anwender ermöglicht, die davon abhängige, anwendungsgerechte Sensorik aus einer Datenbank auszuwählen. Mit Hilfe der Definition des zu verwendenden Sensors kann wiederum eine sensorspezifische Prozesskette abgeleitet werden, welche eine anwendungs- und sensorgerechte Integration umsetzen kann. Ein DMS, Pt100-Sensor und RFID-Tag werden durch das Vorgehen ausgewählt, welche in den weiteren Versuchen der Arbeit verwendet werden sollen. Die jeweilige spezifische Prozesskette kann nach dem vorgestellten Vorgehen in diesem Kapitel für jedes Szenario in den Folgekapiteln aufgestellt werden.

5 Manuelle Sensorintegration

Dieses Kapitel hat es gemäß Abschnitt 1.5 zum Ziel, wesentliche Herausforderungen einer Sensorintegration beim PBF-LB/M zu ermitteln und anschließend Lösungsmöglichkeiten zu erarbeiten und zu validieren (vgl. Abbildung 30). Es wird sich auf eine manuelle Sensorhandhabung beschränkt. Durch eine vorangehende Analyse der Prozessschritte (Abschnitt 5.1), können notwendige Experimente zu den Lösungskonzepten (Abschnitt 5.2) abgeleitet werden, welche anschließend in einem zusammenfassenden Experiment validiert werden (Abschnitt 5.3).

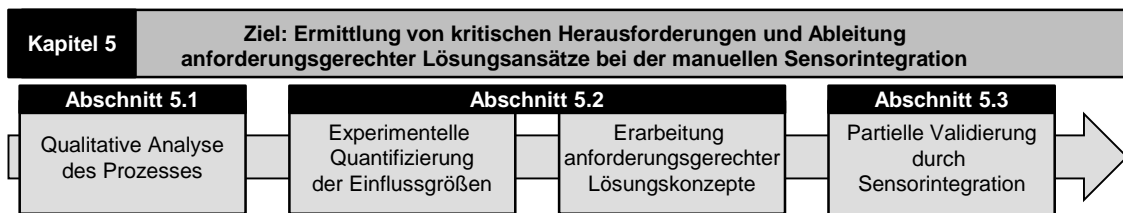


Abbildung 30: Systematische Vorgehensweise im Rahmen von Kapitel 5.

5.1 Qualitative Analyse des Prozesses

Zu Beginn der Analyse muss die in Kapitel 4 aufgestellte Prozesskette als Basis herangezogen werden. Anschließend werden für jeden Einzelschritt potenzielle Lösungsmöglichkeiten aus dem aktuellen Stand der Technik gesucht oder individuelle Vorschläge erarbeitet. In Abbildung 31 ist die so aufgestellte Übersicht an möglichen Lösungskonzepten auf Basis eines morphologischen Kastens gezeigt, welcher analog zum Vorgehen der allgemeinen Prozesskette zur Sensorintegration strukturiert ist. Der gezeigte morphologische Kasten unterscheidet sich aus Übersichtlichkeitsgründen von dem üblichen Vorgehen insofern, dass auch mehrere Parameter einer Ausprägung als Lösungsmaßnahme ausgewählt werden können. Berücksichtigt werden alle Ausprägungen, welche im Rahmen einer systematischen Analyse als potenziell geeignet eingestuft werden. Kombinationen der einzelnen Maßnahmen aber auch eine Mehrfachwirkung einer Option (z. B. Vergießen des Sensors zum Schutz und Fixieren) sind möglich. Die nachfolgenden (Unter-)Abschnitte basieren in ihrer Struktur und ihren Inhalten auf diesem Vorgehen, leiten die genannten Einzeloptionen her und validieren diese. Im Rahmen der Unterabschnitte werden zudem nicht alle Optionen experimentell betrachtet, sondern der Fokus wird auf die wesentlichen und technologiereifen Möglichkeiten gesetzt.

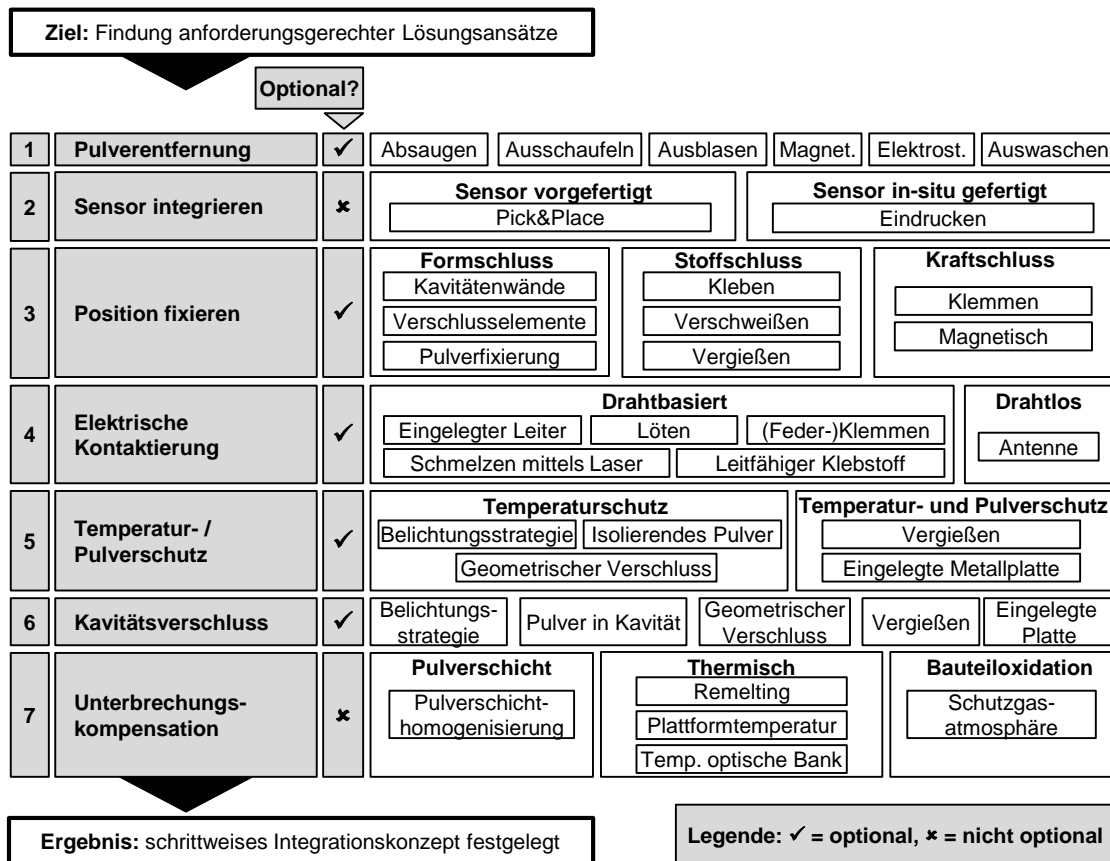


Abbildung 31: Auflistung der Lösungsmaßnahmen entlang der allgemeinen Prozesskette zur Sensorintegration in Anlehnung an einen morphologischen Kasten.

Bei der Umsetzung der einzelnen Prozessschritte liegen zwei Parameter im Fokus. Erstens muss die Funktion des integrierten Sensors bestmöglich sichergestellt werden. Zweitens gilt es Einflüsse und Nachteile auf den PBF-LB/M-Prozess und das gefertigte Bauteil, welche durch die Sensorintegration verursacht werden können, zu eruieren, zu minimieren und zu kontrollieren. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Bauteil, der Kenntnis der Prozesskette, allgemeinem PBF-LB/M-Prozesswissen und dem, aus dem Stand der Technik abgeleiteten, Handlungsbedarf rücken die folgenden inhaltlichen Herausforderungen in den Fokus:

Die Pulverentfernung (1) muss eine ausreichend hohe Kavitätsreinheit erzeugen. Der Sensor muss richtig positioniert und fixiert werden (2 und 3), da ansonsten keine zuverlässige und korrekte Messung umsetzbar ist. Für die Sensorsignalübertragung (4) gilt es drahtlose und drahtbasierte Möglichkeiten zu ermitteln. Zusätzlich sollen für den Schutz des Sensors vor Pulver und Temperatur (5) auftretende thermische Lasten erfasst und Schutzkonzepte erarbeitet werden. Erweitert wird die Betrachtung auf Möglichkeiten zum kontrollierten Verschluss der Kavität (6). Des Weiteren sollen Nachteile auf den PBF-LB/M-Prozess und das AM-Bauteil vermieden werden. Dies inkludiert vor allem die Analyse und Kompensation von

Effekten der Prozessunterbrechung (7), wie Änderungen im Werkstoffgefüge und in den mechanischen Eigenschaften (z. B. verursacht durch Oberflächenoxidation oder Temperaturveränderungen). Abschließend wird theoretisch und experimentell analysiert, inwieweit eine Baujobunterbrechung auf die Qualität eines Bauteils wirken kann und auftretende Effekte kompensiert werden können.

5.2 Analyse der Prozessschritte und Lösungskonzepte

Im Folgenden werden die in Abschnitt 5.1 genannten und ermittelten Schritte und Faktoren umfassend analysiert, sowie eventuell nötige Maßnahmen ermittelt und erprobt. Die Faktoren sind zudem abgestimmt auf die Schritte der allgemeinen Sensorintegrationsprozesskette.

5.2.1 Pulverentfernung

In diesem Unterabschnitt soll ein Konzept erarbeitet und validiert werden, welches eine präzise Pulverentfernung aus einer Kavität erlaubt. Dabei gilt es die folgenden spezifischen Anforderungen zu erfüllen (Reihenfolge nach absteigender Priorität):

- **Kavitätsdimension:** Es sollen Kavitäten unterschiedlicher Geometrie und Größe vom Pulver befreit werden können. Minimale Abmaße: 1 mm Breite und 1 mm Tiefe; maximale Abmaße: 30 mm Breite und 20 mm Tiefe (Werte im Einklang mit Sensoren aus Datenbank, vgl. Abbildung 27).
- **Reinigungsgrad:** Die Kavität soll möglichst frei von Pulver sein. Als Bemessungsgrundlage hierfür wird die Richtlinie VDA 19.1 (2015) verwendet.
- **Material-unspezifisch:** Der Reinigungsmechanismus soll unabhängig vom zu entfernenden Pulvermaterial funktionieren.
- **Schutzgas:** Die Pulverentfernung muss unter konstanter Schutzgasatmosphäre im Bauraum durchgeführt werden können, damit eine schnelle Prozesswiederaufnahme ermöglicht werden kann.
- **Pulverwiederverwendbarkeit:** Das Pulver soll bestenfalls so aus der Kavität entfernt werden, dass dieses später wieder dem Prozess zugeführt werden kann, ohne negative Einflüsse auf den Prozess erwarten zu müssen.

Zur Auswahl eines geeigneten Reinigungsmechanismus wird der Pulverentfernungsprozess in Teilaufgaben untergliedert. Zuerst soll eine Pulverentfernung stattfinden, anschließend ein Pulverabtransport und zuletzt eine Pulverabschei-

dung. Für die jeweiligen Teilaufgaben werden Umsetzungsmöglichkeiten erarbeitet (vgl. Abbildung 32) und anschließend hinsichtlich der spezifischen Anforderungen und der Einfachheit der Lösung bewertet.

		Bewertungskriterium: Umsetzbarkeit / Einfachheit der Lösung					
		hoch gering					
		1	2	3	4	5	6
Pulverentfernung	Absaugung	<i>Magnetismus</i>	<i>Ausblasen</i>	Ausschaufeln	Elektrostatik	<i>Auswaschen</i>	
Pulverabtransport	Fluidstrom	Fließband	Pick&Place	<i>Manuell</i>			
Pulverabscheidung	<i>keine Abscheidung</i>	Filtern	Gravitation	Fliehkraft	Elektrostatisch	<i>Flüssigkeit</i>	

Kursiv: Lösung entspricht nicht den genannten spezifischen Anforderungen. **Fett:** Ansätze können den spezifischen Anforderungen entsprechen und haben ein erwartetes hohes Erfolgspotential.

Abbildung 32: Morphologischer Kasten an Konzepten zur Pulverentfernung.

Im weiteren Verlauf wird sich aus den genannten Bewertungskriterien auf Absaugungskonzepte konzentriert, welche mittels Fluidstrom Pulver abtransportieren und durch Filterung, Gravitation oder Fliehkraft das Pulver abscheiden können.

Zur **Umsetzung** einer optimalen Unterdruckgenerierung, wurde die Methode Design-of-Experiments (DoE, vgl. REINHART ET AL. (1996)) genutzt, um die zu verwendenden Einzelkomponenten zur Filterung, Pulverabscheidung und Unterdruckerzeugung auszuwählen (vgl. Daten in Anhang A5, Abbildung 113). Eine Venturidüse setzte sich im Rahmen dieser Versuche zur Unterdruckerzeugung gegenüber Vakuumpumpen durch. Unterschiedliche Filterarten wie Papier- oder Edelstahlfilter wurden miteinander verglichen, sowie Mechanismen der Fliehkraft, Gravitation und Flüssigkeit für eine Pulverabscheidung erprobt. Die optimale Komponentenkonfiguration wurde durch eine Venturi-Düse in Kombination mit einem Schalldämpfer, einem Filter zur Abscheidung feiner Partikel, sowie einem Zyklonabscheider zur Sammlung des abgesaugten Pulvers gebildet (vgl. Abbildung 33). Sie erreicht die höchste Unterdruckerzeugung (< 0,3 bar Absolutdruck) bei gleichzeitig bestem Pulverabscheidegrad (> 99,5 %).

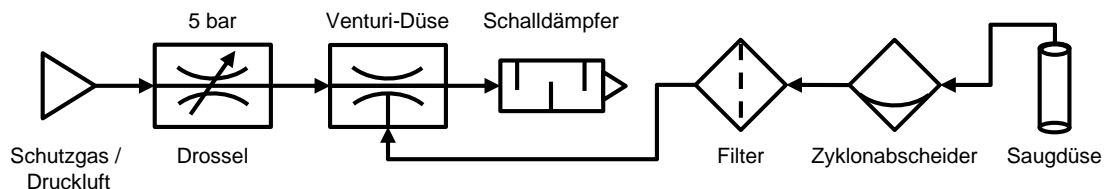


Abbildung 33: Pneumatik-Schaltplan nach DIN ISO 1219-1 für die Kavitätabsaugversuche.

Initiale Versuche

Es wird angenommen, dass eine Pulverentfernung für verschiedene Pulvermaterialien unterschiedlich gut funktionieren kann. Bei vergleichbarer Partikelgrößenverteilung, -adhäsion und -morphologie, wie es bei Pulvern für das PBF-LB/M der Fall ist, ist die Materialdichte der wesentliche Faktor, der die Entfernbarkeit des Pulvers beeinflusst. Je höher die Dichte, desto höher ist auch die aufzuwendende Kraft, um ein Pulverkorn aus einer Kavität zu entfernen. Um bei den folgenden Untersuchungen einen großen Betrachtungsbereich abdecken zu können, werden die Pulverentfernungsversuche daher mit einem vergleichbar schweren Material durchgeführt. Gemäß HOELZLE ET AL. (2017) und SCULPTEO (2017) sind die vier am weitest verbreiteten Metalle für den 3-D-Druck Aluminiumlegierungen, Titanlegierungen, Edelstähle und Werkzeugstähle. Von diesen hat Werkzeugstahl 1.2709 mit $8,05 \text{ g/cm}^3$ die höchste Materialdichte, welche circa dreimal so hoch liegt wie die Dichte von AlSi10Mg ($2,67 \text{ g/cm}^3$) (vgl. Abbildung 34). Die Versuche zur Pulverentfernung wurden daher mit Werkzeugstahl 1.2709 durchgeführt, um den Reinigungsprozess am herausforderndsten Material zu erproben. Zusätzlich wurden die Rauheiten von PBF-LB/M-gefertigten 1.2709-Komponenten experimentell ermittelt (siehe Abbildung 34), da ein Einfluss der Oberfläche auf die Adhäsion von Partikeln in der Kavität zu erwarten ist.

Um das Absaugen von Pulver zu analysieren und besser verstehen zu können, wurde eine dünne Schicht 1.2709-Pulver gleichmäßig auf einem weißen Untergrund (Papier) verteilt (vgl. BINDER ET AL. (2020d)). Das Pulver hat somit einen guten Kontrast zum Untergrund. Anschließend wurde in unterschiedlichen Abständen das Pulver abgesaugt und der resultierende pulverfreie Kreis ausgemessen (vgl. Abbildung 34). Gemäß der Darstellung auf der rechten Seite vermindert sich die pulverfreie Kreisfläche mit zunehmendem Abstand der Düse (Abstand 0,5 mm führt zu Absaugdurchmesser 12,0 mm; Abstand 2,6 mm führt zu einem Absaugdurchmesser von 4,0 mm). Durch die Vorversuche ist bekannt, dass der Abstand der Düse von der Absaugoberfläche einen wesentlichen Parameter darstellt. Die Düse sollte für eine maximale Saugkraft möglichst nah an der Pulveroberfläche positioniert werden. Die auf Papier durchgeführten Versuche und gemessenen Daten sind relativ und nicht absolut zu interpretieren, da sich die Adhäsion der Partikel auf Papier im Vergleich zur PBF-LB/M-gefertigten Metalloberfläche unterscheiden kann.

Materialdichten und Eigenschaften					
Bezeichnung		Nummer	Dichte in g/cm ³		
Aluminiumlegierung		AlSi10Mg	2,67		
Titanlegierung		Ti64	4,41		
Edelstahl		316L	7,98		
Werkzeugstahl		1.2709	8,05		
Oberflächenrauheit					
Horizontale Ebene			Vertikale Ebene		
Ra	Rz	Rp	Ra	Rz	Rp
10,08 µm	114,15 µm	61,34 µm	7,25 µm	120,6 µm	71,81 µm
Dichte nach Archimedes: 99,58 % (St.-Abw.: 0,12 %)					

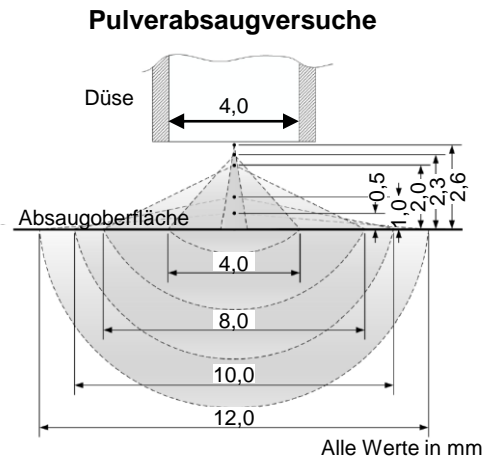


Abbildung 34: Links: Materialdichten und Eigenschaften von PBF-LB/M-Bauteilen. Rechts: Pulverabsaugversuche auf einer weißen ebenen Fläche (Papier) in Abhängigkeit von Düsenabstand zur Absaugbreite (St.-Abw. = Standardabweichung).

Reinigung von Punktkavitäten

Anhand der gängigen Sensorgrößen und -geometrien (bekannt aus Sensordatenbank) werden Testkavitäten (Punktkavitäten, x- oder y-Abmaß bis max. 2 cm) für die Reinigungsversuche ausgelegt (vgl. Abbildung 35). Die Testkavitäten wurden anschließend auf einer PBF-LB/M-Anlage (SLM125HL) gefertigt und von der Bauplattform abgetrennt. Für die Versuchsdurchführung wurde 1.2709-Pulver in die aus 1.2709 gefertigten Kavitäten geschüttet und nicht verdichtet. Das überstehende Pulver wurde vorsichtig abgestrichen, sodass eine durchgängige Ebene entsteht. Somit konnte ein Pulverbett mit reproduzierbaren Eigenschaften in der Kavität erzeugt werden, welches vergleichbar mit dem eines PBF-LB/M-Pulverbetts ist.

Im nächsten Schritt sollte der Einfluss verschiedener üblicher Düsenarten evaluiert werden. Drei unterschiedliche Absaugdüsen sollten bewertet und an Punktkavitäten erprobt werden (vgl. Abbildung 35). Da nicht bekannt ist, inwieweit sich diese für das Entfernen von Pulver eignen, wird dies experimentell ermittelt.

Die untersuchten Düsenarten unterscheiden sich wie folgt: die **Runddüse** bezeichnet einen einfachen Stecknippel nach Druckluft-IQS-Standard (IQS = Integriertes Qualitätssicherungssystem). Die Düse kann flexibel für unterschiedlichste Kavitätenformen eingesetzt werden, indem während der Absaugung mäanderförmig über die abzusaugende Kavitätenoberfläche gefahren wird. Als zweite Option steht die **Pinseldüse** zur Auswahl. Diese unterscheidet sich in der Eigenschaft von der

Runddüse nur um Pinselhaare auf der Unterseite, welche Metallpulver aufwirbeln können und damit einen potenziell höheren Wirkungsgrad der Pulverentfernung erreichen. Als dritte Option soll eine **Aufsetzdüse** auf ihre Eignung getestet werden. Die Aufsetzdüse ist im Durchmesser größer als die anderen Düsenarten und wird auf die zu reinigende Kavitätsform zugeschnitten (Innenabmaße der Kavität entsprechen den Innenabmaßen der Saugdüse).

Pinsel- und Runddüse wurden für die Reinigung unmittelbar über die Kavität (Abstand < 0,5 mm) mäanderförmig und bei gleichbleibender Geschwindigkeit gefahren. Die Verfahrensgeschwindigkeit war so langsam gesetzt, dass auch bei einem Stehenbleiben der Düse kein weiteres Pulver abgesaugt wurde. Die Aufsetzdüse hingegen wurde als Saugglocke auf die Kavität gesetzt und blieb beim Absaugvorgang statisch. Damit ist die Aufsetzdüse weniger flexibel als die anderen Düsen, der Absaugprozess in seinem Programmieraufwand jedoch wesentlich simpler.

Für zwei Kavitäten (K1 und K2) wurden Reinigungsversuche durchgeführt und die Pulverreinheit anschließend gravimetrisch gemäß VDA 19.1 ermittelt (vgl. Abbildung 35). Zur besseren Vergleichbarkeit des verbliebenen Pulvers in Kavitäten wird die oberflächenbasierende Größe Verschmutzungsgrad (VG) definiert. Diese Größe berechnet sich aus dem verbleibenden Pulver und der Kavitätsoberfläche:

$$VG = \frac{m_{Pulver}}{A_{Kavität}} \quad (5-1)$$

Zeitlich wird so lange mit der jeweiligen Düse gereinigt, bis sich keine sichtbare Veränderung mehr eingestellt. Es wird ersichtlich, dass Pinsel- und Aufsetzdüse wesentlich bessere Reinigungsergebnisse erzielen können als die Runddüse. Ursächlich hierfür scheint, dass zu wenig Unterdruck und Strömungsgeschwindigkeit mit der Runddüse auf das Pulverbett aufgebaut werden kann, sodass vergleichsweise wenige Partikel abgesaugt werden können. Die Pinsel- und Aufsetzdüse erreichen hingegen eine bessere Abdichtung gegenüber dem das Pulver umgebenden Freiraum. Da die Reinigungsergebnisse von Pinsel und Aufsetzdüse vergleichbar sind, das Prinzip der Aufsetzdüse in der Praxis aber wesentlich einfacher umsetzbar ist (reduzierter Programmieraufwand), wird die Aufsetzdüse als das am geeignetste Konzept zur Reinigung von Punktkavitäten ausgewählt (vgl. BINDER ET AL. (2020d)).

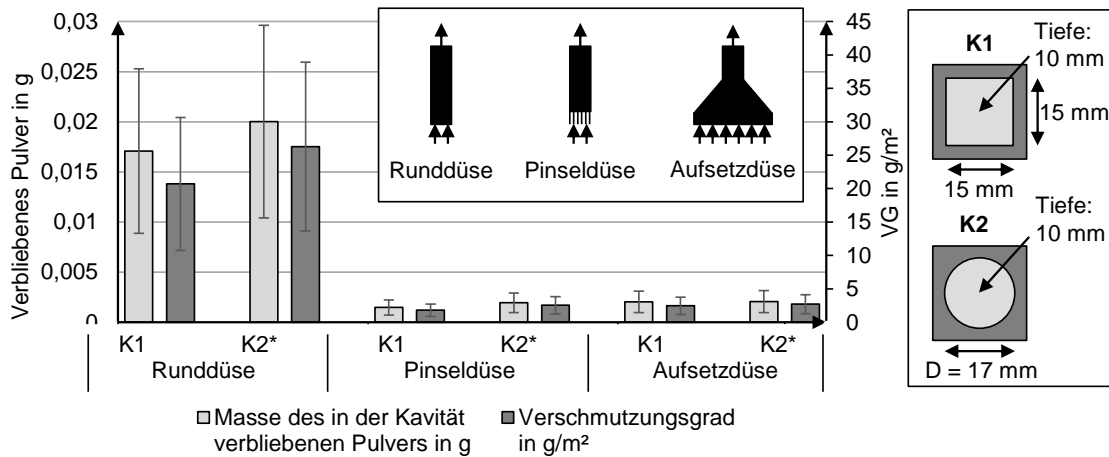


Abbildung 35: Gravimetrisch ermittelte Reinheit der Punktkavitäten (K1 und K2), * = Standardabweichung für K2 wird basierend auf K1 abgeschätzt. Düsenspezifikation: Runddüse: Runder Querschnitt, Innendurchmesser = 4 mm; Pinseldüse: Runder Querschnitt, Innendurchmesser = 4 mm, Pinsellänge ca. 13 mm; Aufsetzdüse: Quadratische Innenfläche, Innenabmaße: 15 x 15 mm².

Vergleich von Punktkavitäten und länglichen Kavitäten

Im Rahmen weiterer Experimente wurden neben Punktkavitäten auch Kavitäten mit hohem Aspektverhältnis (längliche Kavitäten) von Pulver befreit. Bei länglichen Kavitäten bietet sich die Verwendung einer Abwandlung der Aufsetzdüse an. Zum besseren Verständnis ist im Folgenden der Reinigungsprozess einer Punktkavität noch einmal im Detail beschrieben, um anschließend Unterschiede im Vorgang bei länglichen Kavitäten zu verdeutlichen.

- 1) **Punktkavität** (x- oder y-Abmaß bis max. 2 cm): Ist die Kavität (annähernd) gleichseitig in ihren Abmaßen in x-y-Richtung (Grenzabmaße: $x < 2y$ oder $y < 2x$), eignet sich eine Aufsetzdüse gut für die Absaugung des Pulvers in der gesamten Kavität. Die Düse wird auf die Kavität gestülpt und das im Inneren der Kavität liegende Pulver abgesaugt. Wichtig hierbei ist, dass keine perfekte Abdichtung zwischen Kavitätsrand und Absaugdüse angestrebt wird. Ansonsten baut sich ein großer Unterdruck in der Kavität auf und der Gasvolumenstrom wird gehemmt, sodass kaum Pulver durch die geringfügige Strömung mitgerissen werden kann.
- 2) **Längliche oder große Kavität** (sobald $x \geq 2y$ oder $y \geq 2x$): Ist die Kavität in horizontaler Ebene sehr groß oder stark länglich in ihrer Geometrie (hohes Aspektverhältnis), ist die alleinige Nutzung einer Aufsetzdüse nicht mehr ausreichend. Größere Pulvermengen verbleiben dann, auch bei längeren Absaugungszeiten, in der Kavität. Der am Pulver unter der Aufsetzdüse

anliegende Unterdruck wird durch die Vergrößerung der Absaugfläche zu klein, um die erforderliche Reinigungswirkung erzielen und die Partikel entfernen zu können. In diesen Fällen bewährt sich das Konzept einer kleinen, gleichschenkligen Aufsetzdüse (siehe 1)) zu kombinieren mit den Eigenschaften einer Pinseldüse. Die Bürstenhaare erfüllen hierbei drei Funktionen. Einerseits dichten sie die Düse gegenüber der Kavität in einer solchen Weise ab, dass der Unterdruck steigt, sind andererseits aber ausreichend undicht, damit eine hohe Strömungsgeschwindigkeit in der Düse verbleibt. Zum Dritten sorgen sie für ein Aufwirbeln des in der Kavität liegenden Pulvers, was den Reinigungsprozess verbessert. Die Bürsten-Aufsetzdüse wird bei der Pulverabsaugung, wie in Abbildung 36 zu sehen, auf der Kavität platziert und anschließend die Geometrie der Kavität abgefahren. Zur ausreichend gründlichen Reinigung der Kavität kann es sinnvoll sein, den Absaugvorgang zwei- bis dreimal durchzuführen. Die Anwendung dieses Reinigungsverfahren wird beispielsweise für die Integration von Dehnungsmessstreifen notwendig.

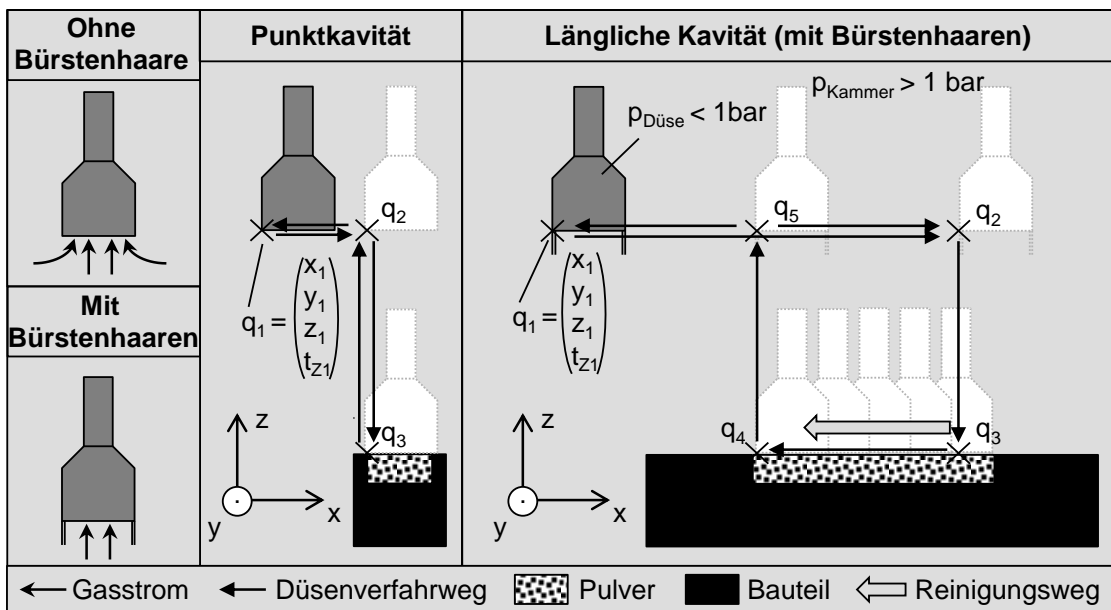


Abbildung 36: Verwendung zweier verschiedener Absaugdüsen zur Entfernung von Pulver aus Punktkavitäten und länglichen Kavitäten. q = Anfahrtspositionen zum Zeitpunkt t_z , p = Druck/Unterdruck. Bei q_3 bzw. zwischen q_3 und q_4 wird die Reinigung aktiviert.

Sollte der Bedarf bestehen wesentlich komplexere Kavitäten von Pulver zu befreien, bietet es sich an einen simulativ optimierten Pulverabsaugungsprozess aus-

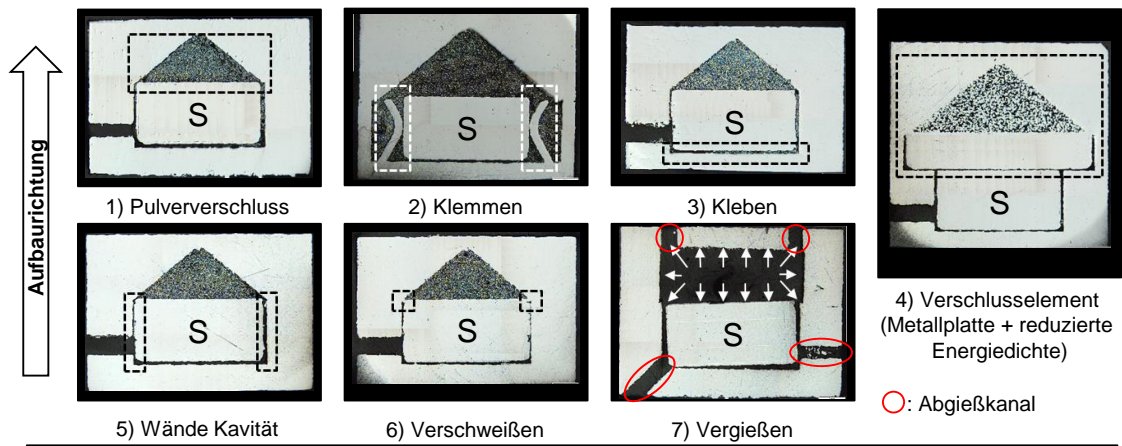
zulegen, der bspw. mit G-Code-basierten Verfahrenen einer Absaugdüse arbeitet. Eine solche Lösung wurde aufgrund der hohen Spezifität und Komplexität der Lösung in dieser Arbeit nicht betrachtet.

5.2.2 Sensorpositionierung und -fixierung

Da der Stand der Technik zum aktuellen Zeitpunkt die in-situ-Fertigung von Sensoren beim PBF-LB/M noch nicht ermöglicht, wird sich in dieser Arbeit auf das Einlegen bestehender elektrischer Komponenten konzentriert.

Durch das gesamtheitliche Verschließen der Kavität durch den PBF-LB/M-Prozess handelt es sich bei jeder vollständigen Sensorintegration in einem Bauteil um eine nicht lösbare formschlüssige Verbindung auf makroskopischem Level. Das Verschließen der Kavität durch ein Aufschmelzen der darüber liegenden Schicht zerstört jedoch viele Sensoren. Zudem kann es zu PBF-LB/M-prozesstechnischen Einschränkungen kommen, wenn dadurch nichtmetallische Werkstoffe verdampfen, oder sich die eingelegte Komponente durch thermisch induzierte Spannungen so verformt, dass sie im Eingriffsbereich des Pulverbeschichters liegt. Daher bedarf es anderer Konzepte, welche eine präzise Fixierung des Sensors sicherstellen und eine Funktionstrennung zwischen Positionierung und Schutzmechanismus ermöglichen.

Als Möglichkeiten der Verbindungstechnik (des Fügens) werden Verfahren wie Schrauben, Nieten, Beschichten oder Ähnliches von vorneherein ausgeschlossen, da der Aufwand zur Umsetzung zu hoch ist. Formschlüssige Verbindungen können die Wände der Kavität selbst darstellen oder aber eingelegte Verschlusselemente, sowie das im Prozess vorhandene Pulver. Alternativ wird das Klemmen, Anschweißen, Verkleben, sowie nachträgliche Vergießen der Sensorik betrachtet. Unterschieden werden muss zudem eine Fixierung in horizontaler und vertikaler Ebene. Während eine Fixierung des Sensors in der x-y-Ebene durch die Wände der Kavität erzielt werden kann, ist dies nicht in gleichem Maße für die Aufbaurichtung (z) möglich, sodass für diesen Fall eine gesonderte Fixierung, durch z. B. das Einlegen einer Metallplatte, erzielt werden muss. In Abbildung 37 sind verschiedene Fixierungskonzepte dargestellt. Deren Eigenschaften, Besonderheiten und Unterschiede sind in der tabellarischen Auflistung von Abbildung 37 erklärt (vgl. auch BINDER ET AL. (2019a), sowie Anhang A5, Tabelle 38). In den Konzepten 1), 2), 3), 5) und 6) werden Verschlussdreiecke genutzt, welche AM-Designregeln entsprechen (Unterabschnitt 2.1.4).



Hinweis: in den Konzepten 1), 2), 3), 5) und 6) verbleibt Pulver im Verschlussdreieck, in 4) ist dieses versintert.

Nr.	Konzept	Technische Details	Spezifische Eigenschaften
1)	Pulverschluss	Pulver wird aktiv in Kavität belassen	+ einfache Umsetzbarkeit + Thermische Isolation des Sensors - Sensor nur eingeschränkt fixiert - Pulver verbleibt im Bauteil
2)	Klemmen	Additive Fertigung von Klemmen in Kavität, welche den Sensor fixieren	+ Klemmen können mitgefertigt werden + Fixierungskraft gezielt einstellbar + Fixierung in x-, y- und z-Richtung denkbar + nutzbar für Signalübertragung (analog zu einem AA-Batteriehalter)
3)	Kleben	Klebstoff wird in der Kavität appliziert und klebt den Sensor an die Kavitätswand	- erhöhte Aushärtezeit - stark pulverbelastete Umgebung ungünstig für eine reproduzierbare und beständige Verbindung - bedingte Temperaturbeständigkeit
4)	Verschlusselement	Nach dem Sensor wird ein Verschlusselement eingelegt, welches die Kavität verschließt und den Sensor fixiert	+ pulverfreies Kavitätswand + leicht hinzuzufügen + gut für Fixierung in z-Richtung - erhöhte Gefahr der Beschichterkollision bei fehlerhafter Integration
5)	Wände Kavität	Präzise Auslegung der Wände zur Sensorfixierung (Passung)	+ Wände sind ohnehin vorhanden o Fixierung nur in x-y-Ebene möglich - Fertigungstoleranzen limitieren mögliche Passungen - ggf. hoher Kraftaufwand für Fixierung nötig
6)	Verschweißen	Lasersystem wird zum Verschweißen von Sensor und AM-Bauteil verwendet	+ belastbare Verbindung + sehr gut automatisierbar - hohe thermische Beständigkeit erforderlich + nutzbar für Signalübertragung
7)	Vergießen	Nach Fertigstellung des Bauteils wird das Pulver aus der Kavität entfernt und der Sensor mit einer aushärtbaren Masse abgegossen	+ Fixierung in allen Raumrichtungen - zusätzlicher Handhabungsschritt - Abgießbohrungen notwendig (Einguss, Entlüftung)

Abbildung 37: Abbildung: Übersicht verschiedener Sensorfixierungskonzepte mit markierten Interessensbereichen (gestrichelt), einheitlicher Sensoratrappe (S, Abmaße: $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$) und seitlichem Kabelschacht (Schnittansicht). Tabelle: Bewertung der Fixierungskonzepte (+ Vorteil, o Neutral, - Nachteil).

Bei den Verschluss- und Fixierungsvarianten ist zu vermerken, dass bei der Nutzung eines Verschlusselements (eingelegte Metallplatte, 4)) eine angepasste Belichtungsstrategie erforderlich ist, da sich ansonsten ein Hitzestau in der Metallplatte bildet und sich diese durch Eigenspannungen von selbst in den Eingriffsbe-

reich des Beschichters hochbiegen kann. Bei Konzept 4) (Abbildung 37) wird daher eine reduzierte Energiedichte (25 %) in Dreiecksform über dem Einlegeelement verwendet, was in einer Versinterung des Pulvers resultiert und ein Aufbiegen der Metallplatte verhindert. Für das Konzept des Abgießens (7)) kann gesagt werden, dass zusätzliche Abgießbohrungen vorgesehen werden müssen. Erst nach dem Aushärten der Abgussmasse ist die Sensorposition abschließend definiert. Es sollte entweder unter Vakuum abgegossen werden oder unter Verwendung einer zusätzlichen Bohrung, damit das zu verdrängende Gas (Luft) entweichen kann. Zudem sind allgemeine Gießregeln zu beachten, da es sonst zu Gießfehlern wie Lunkern, Kaltläufen etc. kommt.

5.2.3 Sensorsignalübertragung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten generierte Sensorsignale an eine Auswerteeinheit zu übertragen. Die Messgrößen können drahtbasiert oder drahtlos übertragen werden. Die drahtbasierte Variante kann einerseits durch vollständiges Einlegen von Kabeln umgesetzt werden. Andererseits können Leiterbahnen auch additiv aufgebaut werden, welche anschließend im Inneren des Bauteils an den Sensor elektrisch angebunden werden. Als drahtloses Verfahren soll die RFID-Technologie betrachtet werden. Die Untersuchung der drei genannten Varianten wird im Folgenden näher beschrieben.

5.2.3.1 Einlegen von Kabeln in das Pulverbett

Das Einlegen von Kabeln und Drähten wird bereits mehrfach im bisherigen Stand der Technik beschrieben, um aus PBF-LB/M-Bauteilen Sensorsignale herauszuführen (siehe Quellen in Unterabschnitt 3.2.1). Das in der Literatur genannte Vorgehen wird für die eigenen Versuche ebenfalls übernommen und soll im Folgenden noch einmal genauer dargestellt werden, da die Ausführungen in Unterabschnitt 3.2.2 nicht zur Versuchsbeschreibung dienen sollten.

Bei einer Baujobunterbrechung wird die Prozesskammer für die Sensorintegration geöffnet. Die Kavität, aber auch umliegende Bereiche um das Bauteil, müssen von Pulver befreit werden, um die Verkabelung des Sensors einbetten zu können. Der Sensor wird in die Kavität eingelegt und die Verkabelung durch eine horizontale offene Nut oder einen schräg/vertikal gefertigten Kanal geführt. Anschließend wird der Rest der Kabel in das Pulverbett eingebettet und durch dies in Position gehalten. Danach kann der Bauprozess, nach Wiederherstellung einer homogenen

Pulverschicht und der Schutzgasatmosphäre, fortgesetzt werden. Berichte über Arbeiten zur Nutzung einer Glove-Box sind bislang nicht bekannt. Der Vorteil wäre hierbei die Schutzgasatmosphäre aufrecht erhalten zu können, sofern eine Absaugvorrichtung innerhalb der Prozesskammer vorhanden ist.

Eigene Vorversuche der Integration von Kabeln zeigten, dass viele Nachteile etwaige Vorteile überwiegen und die Handhabung der Kabel im PBF-LB/M-Fertigungsprozess viel Optimierungspotenzial bietet. Folgende Limitationen und Einschränkungen können in diesem Bezug aufgeführt werden:

- Kabel können nur waagrecht oder nach unten zeigend in das Bauteil eingelegt werden. Eine Positionierung der Kabel den über der Unterbrechungsschicht liegenden Teil des Bauteils (zu dem Zeitpunkt noch nicht gefertigt) ist nicht möglich.
- Kabel dürfen nicht in den Eingriffsbereich des Beschichters geraten, sonst werden diese beschädigt. Zudem könnte es auch zur Beschädigung einer Beschichterlippe oder -bürste kommen. Längere Kabel müssen ausreichend tief im Pulverbett eingebettet werden, um eine Interaktion mit dem Beschichter zu verhindern.
- Der Kunststoff der Kabelisolierung kann durch die Laserenergie beschädigt werden. Dies ist eine Herausforderung bei der Montage der Sensoren, da die genaue Positionierung der Kabel durch die Eigenspannungen im Kabel selbst erschwert wird. Bei noch unverschlossenen, horizontal verlaufenden Kabelschächten muss darauf geachtet werden, dass der Kabelschacht so verschlossen wird, dass die Kabel nicht verschmoren (z. B. durch Dachkonstruktion, vgl. Abbildung 37).
- Die Kabel sind durch ihre leichte Biegsamkeit schwer definiert positionier- und handhabbar. Die Vorspannung der Kabel verhindert umgekehrt eine einfache Montage des Sensors und verschiebt diesen nach der Positionierung in ungewünschte Bereiche (z. B. in den Beschichtereingriff). Zudem ist es in Versuchen vorgekommen, dass in den Pulverkuchen eingebettete Kabel während des anschließenden PBF-LB/M-Prozesses in die aktuelle Pulverschicht gehoben und durch den Beschichter abgerissen werden. Dieser Effekt tritt vermutlich durch bestehende Eigenspannungen im Kabel, das Vibrieren der Anlage beim Beschichten und Nachrieseln von Pulver unter das Kabel auf, sodass eine Grenzkraft unterschritten wird, welche das Kabel zuvor im Pulverbett gehalten hatte.
- Es entsteht stets ein Spalt zwischen den Kabeln und dem Kabelschacht. Damit ist die Kavität nur eingeschränkt gekapselt. Dieser muss zudem

vollständig mit Pulver ausgefüllt werden, da sonst im Prozess Pulver nachrieselt und die jeweilige Pulverschicht im Prozess beschädigt werden kann.

- Idealerweise sollte eine Zugentlastung der Kabel mitvorgesehen werden.

Neben den genannten Nachteilen bieten vorkonfektionierte Kabel aber den Vorteil, dass Schritte des Anschließens der Sensorik an die Kabel entfallen.

5.2.3.2 Additive Fertigung von Leiterbahnen und Kontaktierung

Das Konzept soll möglichst praktikabel sein und durch konventionell verfügbare Monomaterial-Anlagentechnik umgesetzt werden können. Nachteile des Einlegens von Kabeln in das Pulverbett sollen kompensiert werden. So sind Kabel schwer handhabbar und restriktivierend im Bauteildesign. Die additive Fertigung von elektrisch leitenden Strukturen zur Sensorsignalübertragung scheint daher attraktiv, da die Form- und Designfreiheiten des Verfahrens ausgenutzt werden können. Durch den aktuellen Stand der Technik sind jedoch bislang noch keine Verfahren und Möglichkeiten bekannt, welche diesem Ansatz gerecht werden.

Für den Druck von Leiterbahnen beim PBF-LB/M ist die größte Fragestellung, wie elektrisch isolierende Bereiche in das Bauteil implementiert werden können. Das direkte Drucken von isolierendem Material durch einen MM-Prozess bildet hierbei einen Kernpunkt der Forschung (KOOPMANN 2020, SINGER ET AL. 2021b), ist jedoch aufgrund der schlechten Verarbeitbarkeit von nichtleitenden Werkstoffen so herausfordernd in der Umsetzung, dass bislang keine erfolgversprechenden Umsetzungskonzepte bekannt sind. Daher soll der hier vorgestellte Ansatz einen alternativen Weg zum Druck von Leiterbahnen aufzeigen, welcher einfacher in der Umsetzung ist und die Fertigung durch PBF-LB/M mit dem Gießen eines Isolators vereint.

Allgemeines Umsetzungskonzept

Das Konzept basiert darauf metallische Werkstoffe, welche bereits für das PBF-LB/M qualifiziert sind, auch für die Fertigung von Leiterbahnen zu nutzen. Die Nutzung desselben Werkstoffs für die Bauteilstruktur birgt den Vorteil, dass dies potenziell mit bestehender, weit verbreiteter Anlagentechnik umgesetzt werden kann und die Notwendigkeit eines aufwendigen MM-Mechanismus vermeidet. Zur Umsetzung des Prinzips werden die elektrischen Leiter im CAD-Bauteil mit ausgelegt. Bereiche einer notwendigen Isolation bleiben frei, müssen jedoch so ge-

staltet werden, dass ein späteres Eingießen eines isolierenden, flüssigen und aushärtbaren Materials umsetzbar ist (vgl. Abbildung 38). Gegebenenfalls sind Entlüftungskanäle zu setzen, welche einen Lufteinschluss beim späteren Ausgießen verhindern. Ein weiteres Kriterium für die Auslegung ist, dass die Leiterbahn mittels PBF-LB/M aufbaubar ist und das ohne die Verwendung von Stützstrukturen.

Das Bauteil wird nun im PBF-LB/M-Prozess gefertigt. Eine Anbindung jeden Leiters an die Bauplattform ist zwingend notwendig und ggf. durch eine Stützstruktur umzusetzen. Aufgrund der Verwendung des Monomaterialprozesses zum Aufbau des Bauteils wird die Leiterbahn aus demselben Metall bzw. derselben Legierung aufgebaut wie auch das Bauteil selbst. Eine Unterbrechung, verbunden mit einer Sensorintegration kann zudem umgesetzt werden, um einen Sensor an die PBF-LB/M-Leiterbahn anzubinden. Nach Beendigung des Bauprozesses wird das umliegende Pulver, sowie das Pulver in den Kanälen entfernt. Der Leiter bleibt durch seine Anbindung an die Bauplattform in seiner Position und „schwebt“ ohne Kontakt zur Kanalinnenseite innerhalb des Bauteils. Nun wird eine Isolierung durch die vorgesehenen Öffnungen eingegossen und anschließend ausgehärtet. Abhängig von den zukünftigen Einsatztemperaturen des Bauteils kann dies z. B. ein Keramikschlicker oder aber auch ein flüssiger Kunststoff sein. Durch die eingegossene Isolierung wird der AM-Leiter nun in seiner Position innerhalb des Kanals fixiert und vom Rest des Bauteils isoliert. Nach dem nun folgenden Abtrennen von Bauteil und Leiter von der Bauplattform sind die Leiter elektrisch voneinander getrennt und können verwendet werden.

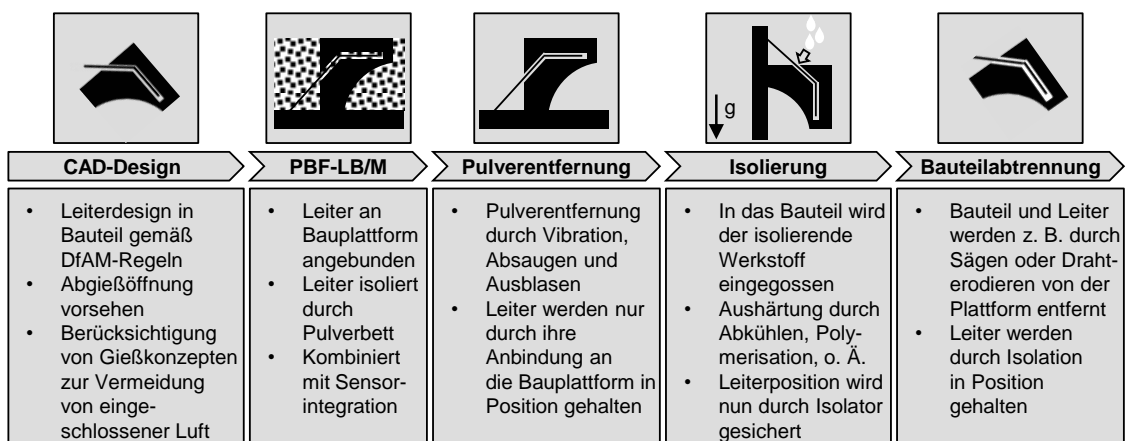


Abbildung 38: Sukzessives Vorgehen zur Isolierung von mittels PBF-LB/M gefertigten Leiterbahnen (vgl. eigene Patentanmeldung DE102020206664A1).

Möglichkeiten und Grenzen der Leiterfertigung

Vergleicht man PBF-LB/M-übliche Stahl- und Aluminiumlegierungen in ihrer Leitfähigkeit, hat die Legierung AlSi10Mg die beste Leitfähigkeit ($18\text{-}27 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) bzw. den geringsten spezifischen Widerstand ($3,7\text{-}5,6 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$) (MEIER 2022). Wie in Abbildung 39 abgebildet, wurden PBF-LB/M-Proben auf ihre Leitfähigkeit untersucht (Messgerät: Loresta GX MCP-T700). Der spezifische Widerstand des verarbeiteten Materials im „wie gebaut“ Zustand ist tendenziell höher als bei anderen Verarbeitungstechniken aufgrund von entstandenen Grenzflächen im Materialgefüge (siehe auch Abbildung 64). Durch eine Wärmebehandlung mit dem materialüblichen Lösungsglühen (4,5 h bei 525 °C) oder T6-Zyklus (Lösungsglühen für 4,5 h bei 525 °C, Abschrecken und Auslagern für 7 h bei 165 °C) erreichen die Proben durch eine Homogenisierung des Gefüges jedoch wieder spezifische Widerstände, welche dem Erwartungswert entsprechen.

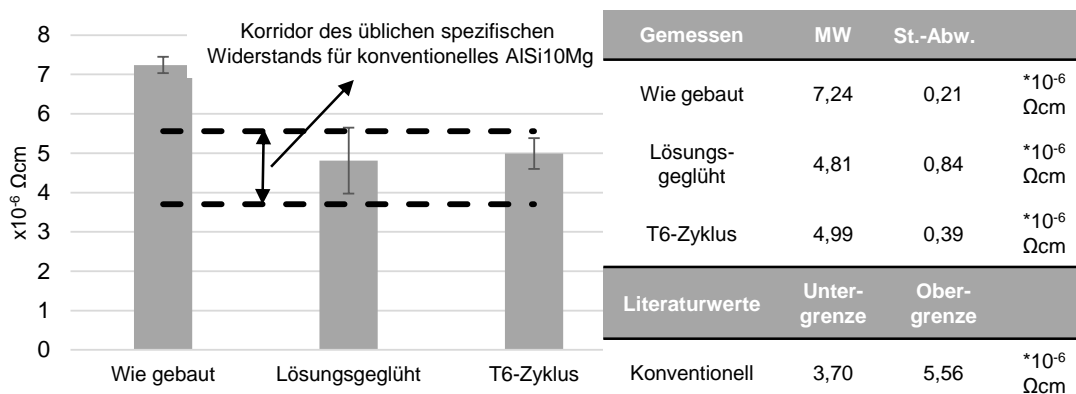


Abbildung 39: Leitfähigkeit von mittels PBF-LB/M gefertigtem AlSi10Mg (SLM125HL) in Aufbaurichtung (MW = Mittelwert).

Leiterbahnfertigung

Zur Ermittlung der Potenziale und Grenzen der Leiterbahnfertigung wurden Versuche definiert, welche insbesondere das Ziel haben, den Aufbauwinkel, entstehende Oberflächenrauigkeiten und Abweichungen von der Zielgeometrie des Leiters zu ermitteln. Da erste Versuche zeigen konnten, dass teils ein erheblicher Unterschied in der Aufbaubarkeit von Leitern besteht, wenn sie entweder in einem umgebenden Bauteil aufgebaut werden oder freistehend im Pulverbett gefertigt werden, wurde im Rahmen der Betrachtung auch zwischen diesen Parametern unterschieden. Daher wurden freistehende Leiter und Leiter in umgebenden Rohrstrukturen gefertigt, welche hierbei ein den Leiter umgebendes Bauteil simulieren sollen, und miteinander verglichen. Die Leiter sind stets 1 mm dick, aus

AlSi10Mg auf einer SLM125HL gefertigt, besitzen einen quadratischen Querschnitt und werden in ihrem Aufbauwinkel variiert ($^{\circ}$ -Angaben). Aus den Versuchen lässt sich Folgendes folgern:

- Der Abstand zwischen einem umgebenden Bauteil (Rohr) und integriertem Leiter muss präzise ausgelegt werden, da sonst ein Kontakt (el. Kurzschluss) entsteht (vgl. Abbildung 40).

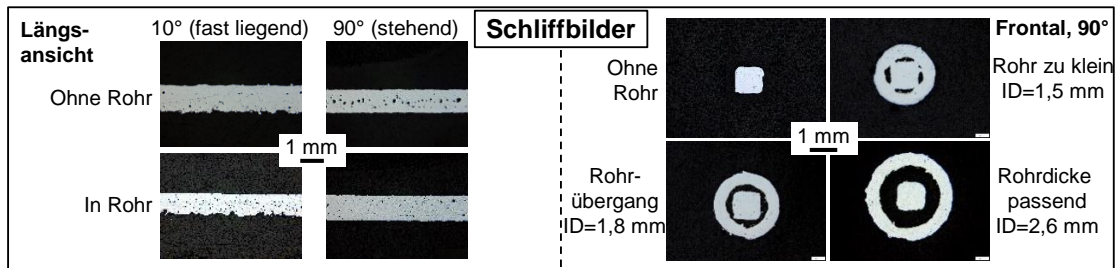


Abbildung 40: Schliffbilder gefertigter Leiter (ID = Innendurchmesser).

- Ein umgebendes Rohr hilft vor allem bei flachen Überhängen (Downskin) die entstehende Rauheit eines Leiters maßgeblich zu reduzieren (vgl. Abbildung 41) und damit die Formtreue zu erhöhen. Begründet werden kann dieser Effekt damit, dass die Wärmeabführung verbessert ist durch das umgebende Vollmaterial und eine vermutete höhere Pulverbettdichte in dem Zwischenbereich von Leiter und umgebenden Rohr (Rauigkeit gemessen mit Lasermikroskop). Hohe Rauigkeiten sollen verhindert werden, da es zum Kurzschluss kommen kann wenn das Schmelzbad zu stark im Pulverbett absackt (entspricht einer hohen Oberflächenrauigkeit). Zudem ist eine Rauigkeit ein quasi nicht nutzbarer Bauteilbereich.

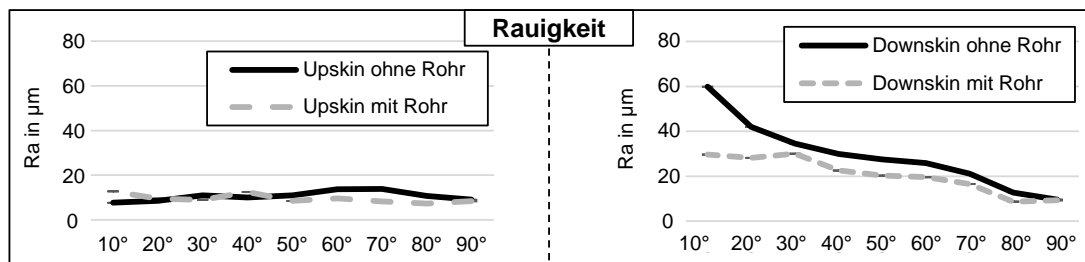


Abbildung 41: Rauigkeiten gefertigter AlSi10Mg-Leiter nach Aufbauwinkel.

- Die elektrische Leitfähigkeit aufgebauter Leiterbahnen nimmt linear in Abhängigkeit des Aufbauwinkels zu. Bereits ein Spannungsarmglühen bei 300 $^{\circ}\text{C}$ für 2 h kann die Leitfähigkeit erhöhen, kompensiert den Einfluss

des Aufbauwinkels aber noch nicht vollständig. Die Leitfähigkeitsmessungen wurden mittels 4-Punkt-Messung (Loresta GX MCP-T700) und Wirbelstrommessung (Sigmascope SMP350) durchgeführt (vgl. Abbildung 42).

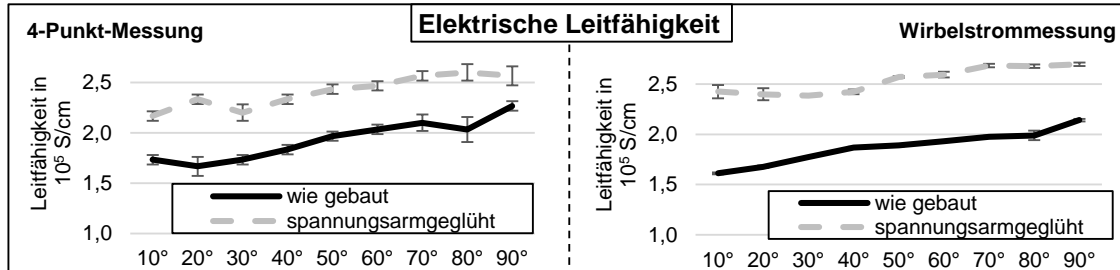


Abbildung 42: Elektrische Leitfähigkeit nach Aufbauwinkel und Wärmenachbehandlung (spannungsarmgeglüht = 300 °C für 2 h).

- Durch das umgebende Rohr (Bauteil) kann der angestrebte Leiter-Durchmesser wesentlich besser erreicht werden (Größenfaktor 1,0 = 100 % Maßhaltigkeit) als bei einem vollständig freistehenden Leiter. Dies gilt insbesondere für flache Winkel der Leiter und liegt begründet in der reduzierten entstehenden Bauteilrauheit (Downskin). Außerdem kann der Leiter weniger stark vom Auftragssystem ins Pulverbett gedrückt werden kann (vgl. Abbildung 43).

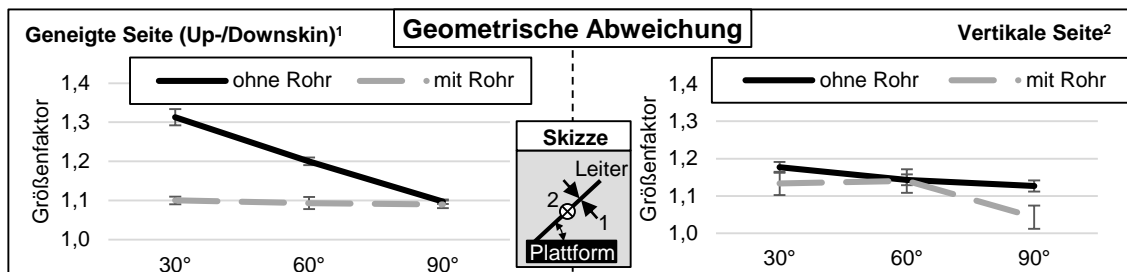


Abbildung 43: Formtreue der AlSi10Mg-Leiter nach Aufbauwinkel.

- Der Aufbau von Demonstratorteilen zeigt, dass es möglich ist, supportfrei jede beliebige Leitergeometrie zu fertigen. Wenn Leiterbahnen im Pulverbett beginnen und erst später im Aufbauprozess den Kontakt (über die Verbindung zu einem anderen Leiterstrang) zur Bauplattform erhalten, sind diese Bereiche besonders kritisch. Für den störungsfreien Aufbau gilt es in diesem Fall den Aufbau, mit möglichst spitzem Winkel im Pulverbett, zu beginnen (vgl. M-Struktur in Abbildung 44 unten links). Werden größere Flächen horizontal im Pulverbett belichtet (horizontaler Leiter), erhöht dies die Fehleranfälligkeit des Leiters. Daher gilt es horizontale Leiterbereiche

zu vermeiden. Alle in Abbildung 44 gezeigten Bauteile weisen eine durchgängige Leiterbahn ohne Kurzschluss zum umgebenden Bauteil/Rohr auf.

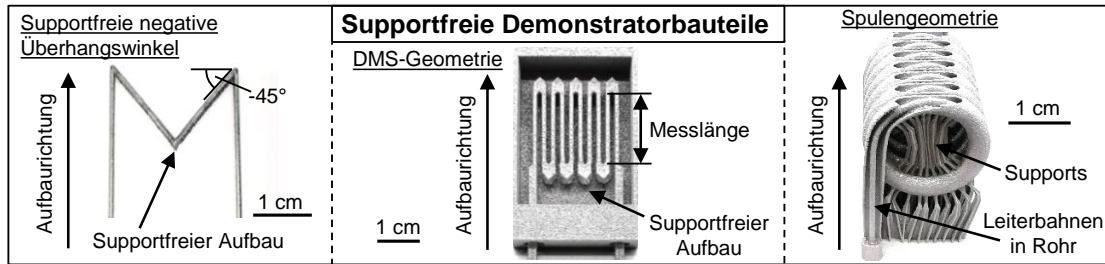


Abbildung 44: Demonstratorstrukturen aus AlSi10Mg.

Kontaktierung

Elektrische Verbindungen werden durch DIN ISO 857 und DIN 60352 in Schweißen und verwandte Prozesse (inkl. Löten) und lötfreie Verbindungen unterteilt. Um eine geeignete elektrische Verbindungstechnik zur Anbindung von additiv gefertigten Leiterbahnen und den Sensorkontaktstellen ermitteln zu können, wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt (vgl. Tabelle 40, Anhang). Die vier Verfahren mit der höchsten Punktzahl sind in Abbildung 45 gemeinsam mit ihrer Einordnung nach Norm gezeigt.

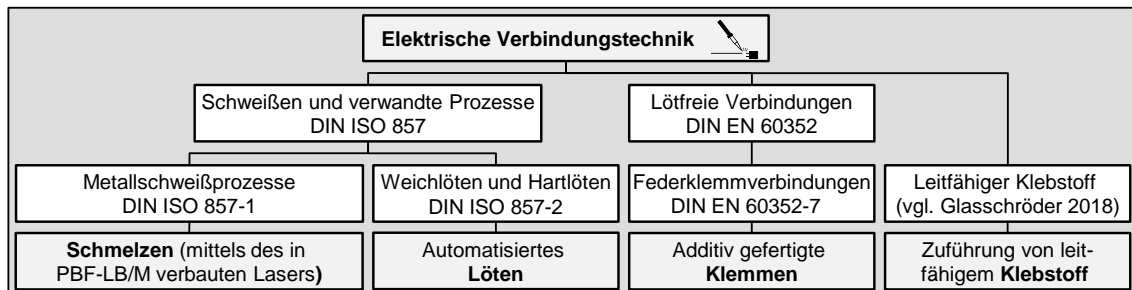


Abbildung 45: Übersicht potenziell geeigneter elektrischer Verbindungstechniken.

Mit den vier Verfahren werden praktische Versuche durchgeführt, um deren anwendungsbezogene Eignung beurteilen zu können. Dadurch können folgende Einschätzungen getroffen werden (für Versuchsdetails siehe Anhang A5, Abbildung 114):

- Die Verwendung des in PBF-LB/M-Anlagen verbauten Lasers eignet sich gut für die Herstellung eines elektrischen Kontakts zwischen Leiter und AM-Material, durch das Aufschmelzen beider Materialien.
- Der Lötprozess hat zum Nachteil, dass die Zuführung des Lotes aufwendig ist, da zusätzliches Werkzeug benötigt wird. Zudem fließt das Lot nur

schlecht auf das AM-Bauteil, da die Heizleistung des LötKolbens nicht ausreichend, um Bauteil und Bauplattform ausreichend zu erhitzen. Geeignete Lötbedingungen sind schwer herstellbar.

- Klemmen additiv in einer Kavität zu fertigen, welche in der Lage sind durch deren Vorspannung einen elektrischen Kontakt zwischen Leiter und sich selbst herzustellen, ist gut umsetzbar. Der Vorbereitungsaufwand ist jedoch dadurch erhöht und die geometrischen Freiheiten eingeschränkt. Ob die Festigkeit der Verbindung ausreichend ist, ist von den am Bauteil anliegenden Beschleunigungen abhängig.
- Die Verwendung von Klebstoff ist aufwendiger, da ein zusätzlicher Stoff eingebracht werden muss. Der Klebstoff trocknet schnell und ist schwer handhabbar. Der Verbund ist spröde und löst sich bereits bei geringen Lasten.

Eine elektrische Verbindung, hergestellt mittels Laserschweißen, erwies sich in den Versuchen als am besten geeignet (vgl. auch Tabelle 40, Anhang). Basierend auf dem Bewertungsergebnis wurden anschließend Versuche durchgeführt, um die Möglichkeit der elektrischen Kontaktierung mittels Laser zu verifizieren. Werkstoffe für konventionelle Verkabelungen sind neben dem häufig verwendeten Kupfer auch Aluminium (DEUTSCHES KUPFER-INSTITUT 2000). Daher wurde für die AM-Leiter das PBF-LB/M-übliche Material AlSi10Mg verwendet und in seiner Verschweißbarkeit gegenüber eingelegten Kupferleitern geprüft (SLM125HL). Die AM-Leiter wurden gefertigt, anschließend wurde ein konventioneller Leiter (Draht) in eine Kavität auf den Leiter gelegt und dieser mittels einer Verschlusskappe mit dem AM-Leiter verschweißt (siehe Abbildung 46). Da es zudem angestrebt wurde Pt100-Temperaturfühler zu integrieren und deren Anschlussdrähte üblicherweise aus Ni-Pt-Manteldrähten bestehen, wurde zudem auch die Verbindbarkeit zwischen Nickeldrähten und AlSi10Mg geprüft (vgl. Anhang A5, Abbildung 115).

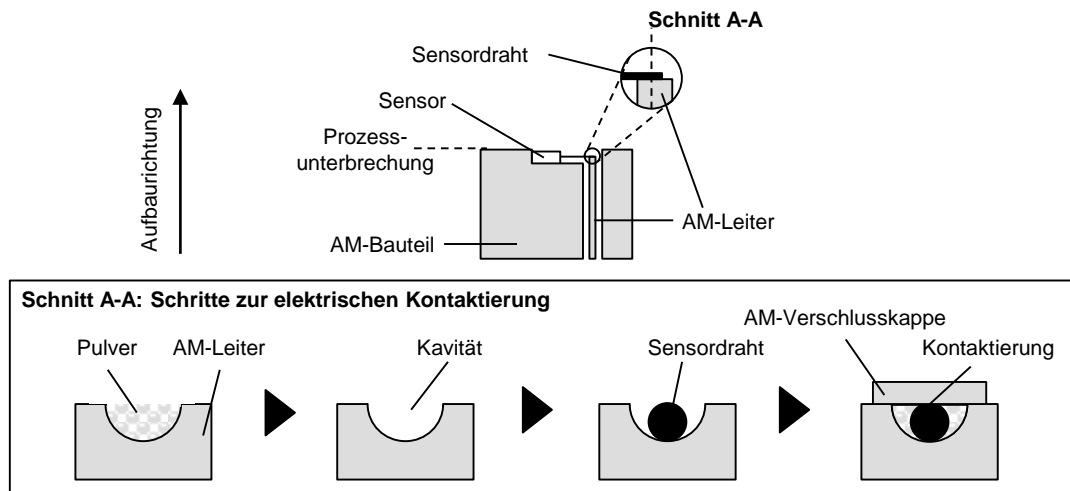


Abbildung 46: Schematisches Vorgehen zur Ankontaktierung eines Sensors mittels des in einer PBF-LB/M-Anlage verbauten Lasersystems.

Die Methode eines vollfaktoriellen DoE's wurde nun genutzt, um das Vorgehen aus Abbildung 46 zu erproben und zu analysieren. Im Fokus der Untersuchung stand die Variation der Laserenergie und der Auslegung der Verschlusskappe. Gut erkennbar in Abbildung 47 ist der Luftspalt, welcher sich bei der Ankontaktierung unterhalb des Sensordrahts ausbildet. Der Spalt liegt vor, da sich aufgrund der U-Form des AM-Leiters nur die Verschlusskappe auf der Oberseite mit dem Draht stoffschlüssig verbinden lässt. Der Draht liegt auf seiner Unterseite weiterhin im nicht verbundenen Zustand vor, da die Laserenergie nicht ausreicht um ihn vollständig aufzuschmelzen. Dies wäre zudem auch kontraproduktiv, da bei einem vollständigen Aufschmelzen des Drahts die Gefahr besteht, dass er an einer Stelle abreist. Der verwendete Kupferdraht wurde in allen Fällen ausreichend angeschweißt, weist jedoch in Abhängigkeit der verwendeten Laserleistung erhebliche Unterschiede auf. Während bei der Verwendung von $P = 300 \text{ W}$ der Draht seine ursprüngliche Geometrie nahezu beibehält, liegt er zwischen $360\text{-}390 \text{ W}$ nur noch anteilig als reiner Kupferdraht vor. Zudem verstärkt sich die Verfärbung des umgebenden AlSi10Mg mit zunehmender Leistung, was an der zunehmenden Durchmischung mit dem Kupferdraht liegt. Die Dicke der Verschlusskappe hat hingegen kaum einen Einfluss auf das Ankontaktierungsergebnis.

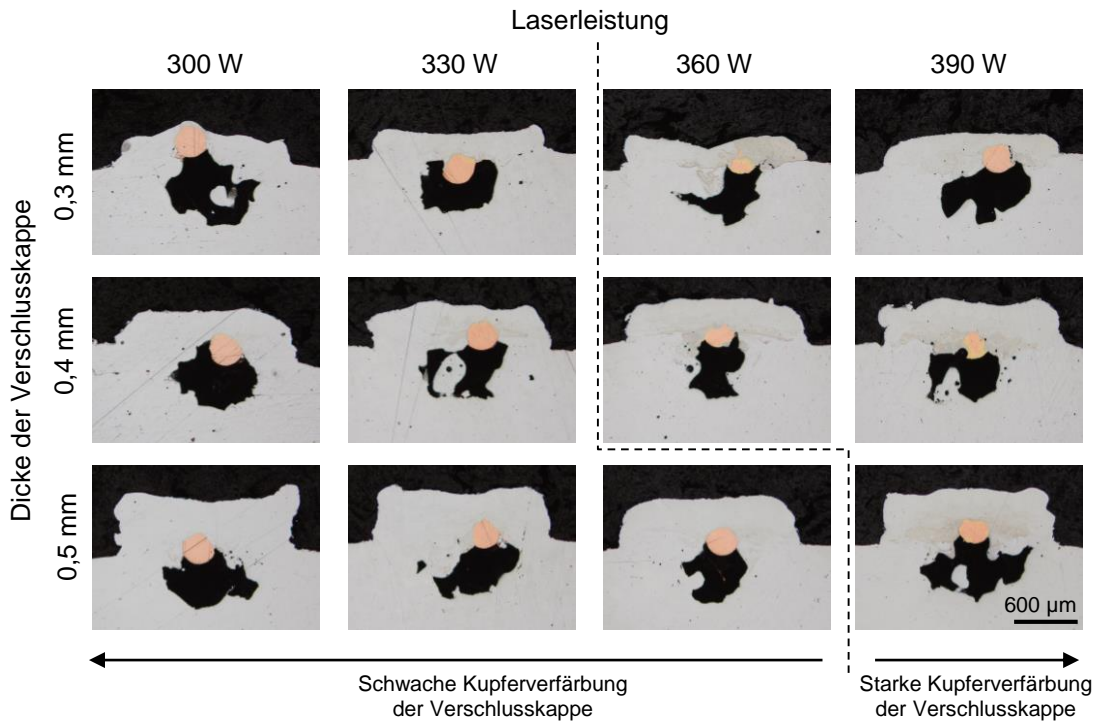


Abbildung 47: Mikroskopaufnahmen der Schliffbilder der Ankontaktierung eines Kupferdrahts von 0,25-0,3 mm Dicke in Verbindung mit AM-gefertigten AlSi10Mgs unter Variation der Laserleistung sowie der Verschlusskappendicke.

Das Prinzip der Ankontaktierung mittels Lasersystem hat demnach eine hohe Robustheit, welches in einem recht breiten Leistungskorridor (300 bis 390 W) gut funktioniert. Es gilt jedoch darauf zu achten, dass nicht zu viel Leistung eingetragen wird, da dünne Drähte sonst zu schnell zum Verdampfen / Reißen neigen.

In Abbildung 48 ist ein exemplarisches Schliffbild aus Abbildung 47 noch einmal näher dargestellt. Unverfärbtes und verfärbtes AlSi10Mg, sowie der Kupferdraht sind gut voneinander zu unterscheiden. Mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX-Analyse) wird schnell ersichtlich, dass die verfärbten AlSi10Mg-Bereiche auch einen höheren Anteil an Kupfer enthalten. Zudem ist die gute Materialdurchmischung erkennbar, welche durch die Marangoni-Konvektion begünstigt wird. Des Weiteren sind Risse sichtbar, welche auf eine Versprödung des Materials und die Bildung von intermetallischen Phasen in diesem Bereich hindeuten. Außerdem fällt auf, dass in Abbildung 48 a) das Material auf der rechten Seite vom Draht stärker verfärbt ist, als auf der linken Seite, was, vergleicht man diesen Eindruck mit den EDX-Analysen, an einem höheren Kupfergehalt liegt. Diese Inhomogenität hängt mit dem Verfahrensweg des Lasers und damit einseitig orientierten Dynamik des Schmelzbades zusammen.

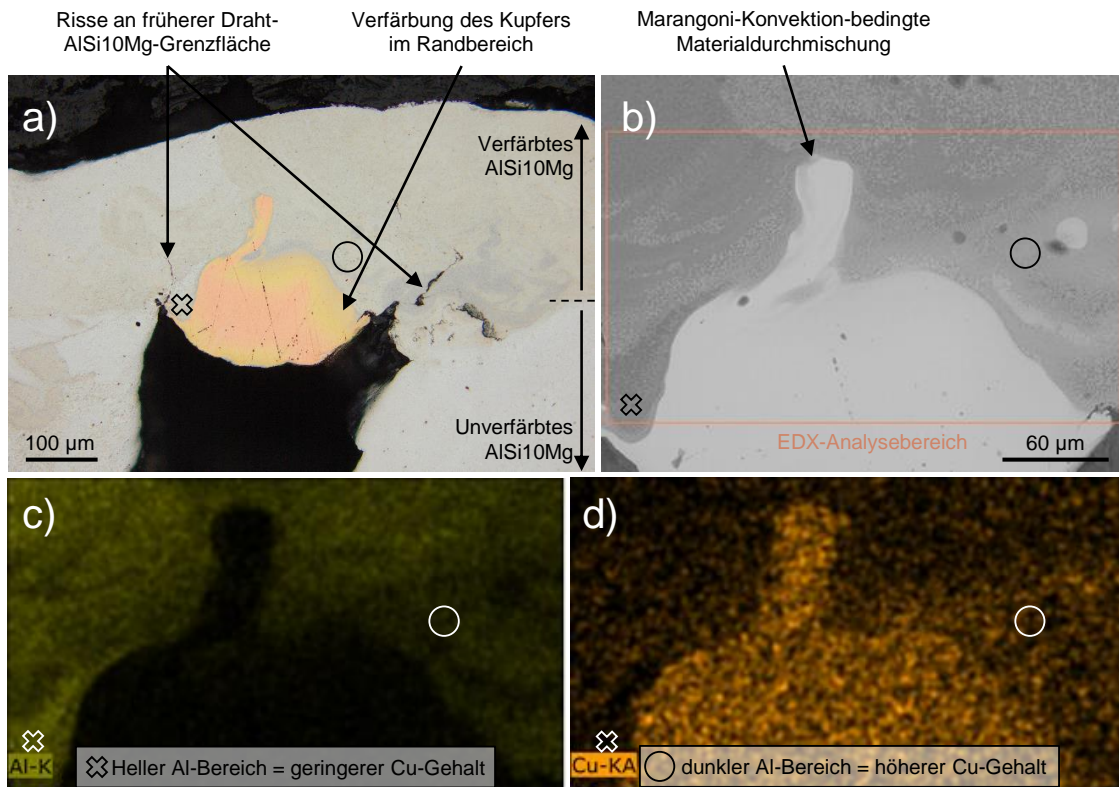


Abbildung 48: Detaillierte Analyse des Ankontaktierungsbereichs (0,3 mm Verschlusskappe, $P = 360$ W): a) Schliffbild, b) Rasterelektronenmikroskop-(REM)-Aufnahme, c) EDX-Analyse Aluminium-Anteile, d) EDX-Analyse der Kupfer-Anteile.

In Abbildung 49 ist ein weiterer Ankontaktierungsbereich des Cu-Drahts mit AlSi10Mg gezeigt. Im Schliffbild oben links gut zu erkennen ist die Aluminiummatrix (vgl. auch Position 0 μm), mittig ein intermetallischer Phasensaum aus Al_2Cu (vgl. auch Position 20 μm) mit anschließendem Übergang in die Kupfermatrix (vgl. auch Position 31 μm). Gemäß STANDFUß ET AL. (2011) ist der übliche Versagensort einer Al-Cu-Verbindung im intermetallischen Phasensaum, sodass die Festigkeit mit zunehmender Dicke des Saumes abnimmt.

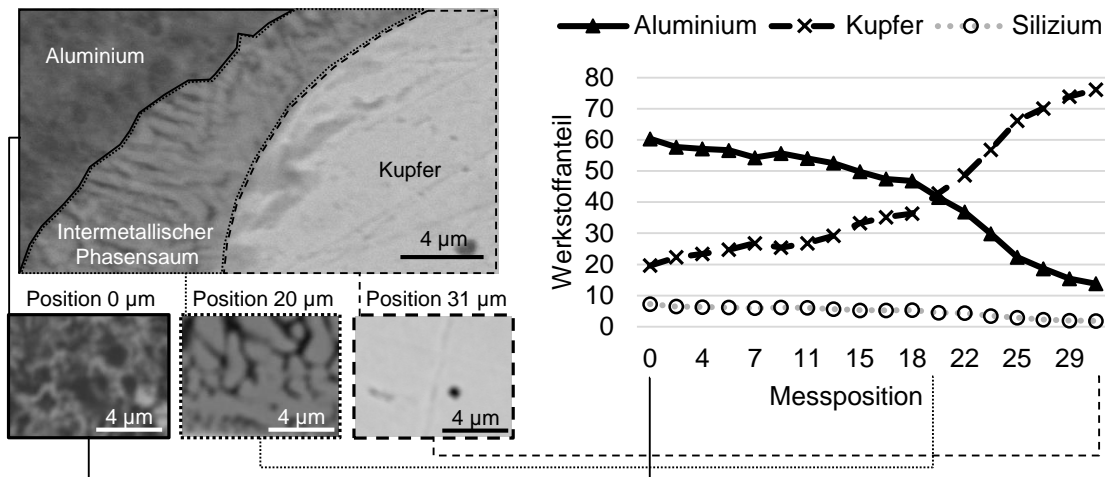


Abbildung 49: Links: REM-Analyse des Ankontaktierungsbereichs; Rechts: Auswertung einer EDX-Analyse mit 1,8 µm Schrittweite über den Ankontaktierungs-bereich hinweg (390 W, 0,5 mm Verschlusskappe, 0,25-0,3 mm Kupferlackdraht).

Die oben gezeigten Versuche und Analysen zur Ankontaktierung wurden für Nickeldrähte, versilberte Kupferdrähte und Kupferlackdrähte durchgeführt. Anschließend werden für die Drähte und die Ankontaktierungsbereiche die Leitfähigkeiten (4-Punkt-Messung) bestimmt und in Relation mit 100 % IACS gebracht (vgl. Abbildung 50). Es wird ersichtlich, dass die Ankontaktierungsstellen im Falle der Kupferdrähte nur geringfügig von denen der reinen Leiter abweichen und somit von einer zureichenden elektrischen Verbindung ausgegangen werden kann. Lediglich der Nickeldraht weist eine Verminderung der Leitfähigkeit von 9,89 m/Ωmm² auf 5,19 m/Ωmm² auf, was auf die Bildung von schlecht leitfähigen intermetallischen Phasen im Übergangsbereich zwischen AlSi10Mg und Ni hindeutet.

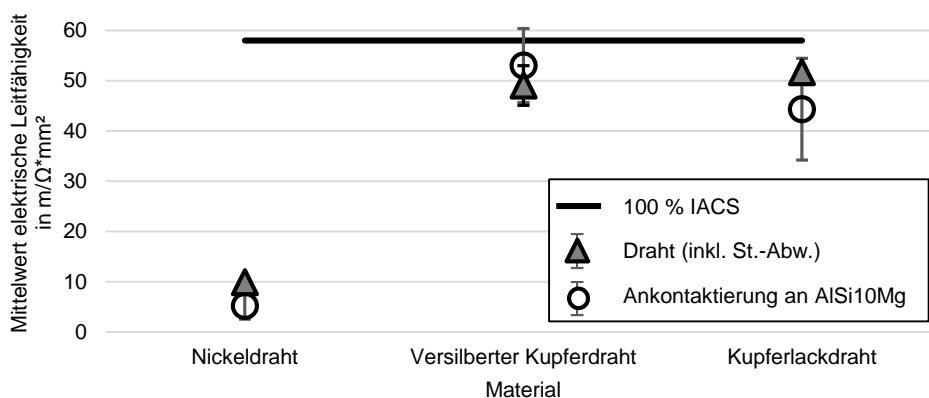


Abbildung 50: Vergleich der Leitfähigkeiten von elektrischen Leiterdrähten im ankontaktierten (AlSi10Mg) und nicht ankontaktierten Zustand.

Pulverentfernung

Nach der Fertigstellung des Bauteils mit AM-Leiterbahnen und ankontaktiertem Sensor muss das Pulver aus den Kanälen, welches die Leiterbahnen umgeben, entfernt werden. Dies stellt einen bereits weitgehend industriell verfügbaren Prozessschritt dar. Hierfür wurde ein automatisches System zur Pulverentfernung (Solukon SFM-AT200) verwendet, welches durch automatische Drehbewegungen und Vibrationen in unterschiedlichen Frequenzbereichen das Pulver aus den Kanälen schütteln kann. Nach diesem Schritt verbleibt das Bauteil mit freischwebenden elektrischen Leiterbahnen im Inneren der Struktur.

Isolierung

Die elektrische Isolation stellt nun den vierten Schritt (Abbildung 38) zur additiven Fertigung von Leiterbahnen in Strukturbauteilen dar. Durch vorgesehene Öffnungen im Bauteil wird eine Isolationsmasse so in das Bauteil abgegossen, dass diese das gesamte Volumen ausfüllen kann und anschließend aushärtet. Hierbei kommt der Isolation, neben der elektrischen Durchschlagsfestigkeit, eine zweite Funktion zu: sie wird bei der späteren Bauteilnutzung die Leiterbahnen in ihrer Position halten.

Wesentliche Anforderungen an das Bauteil zur Umsetzbarkeit der Isolierung richten sich damit nach Gießrichtlinien: Um die Ausfüllbarkeit des gesamten Volumens gewährleisten zu können sollte entweder unter Vakuum abgegossen werden, oder beim Abgießen eine Druckausgleichsmöglichkeit (zusätzliche Bohrung) für die verdrängte Luft vorgesehen werden. Des Weiteren gilt auch hier die Vermeidung von größeren Materialanhäufungen, um der Bildung von Lunkern vorzubeugen. Idealerweise sollte daher auch die Größe der Durchflussquerschnitte konstant gehalten werden. Wichtig ist es zudem Temperaturlasten auf das Bauteil für die Auswahl des Isolationswerkstoffs miteinzubeziehen.

Für die Auswahl eines geeigneten Abgussmaterials sollte daher die Beachtung der folgenden Parameter sichergestellt werden:

- Temperaturbeständigkeit des Werkstoffs (Temperaturen im Bauteileinsatz und bei der Wärmebehandlung; letzteres kann auch vor dem Abgießen des Isolators durchgeführt werden)
- Fließfähigkeit: das Material sollte in der Lage sein, dünne Kanäle (Durchmesser: ~1 mm) auszufüllen (Ziel: niedrige Viskosität beim Abgießen)

Unter diesen Gesichtspunkten werden zwei Werkstoffe zur Isolation von Leiterbahnen miteinander verglichen (siehe Tabelle 4). Da sich die Anforderungen einer

hohen Fließfähigkeit und einer hohen Temperaturbeständigkeit unter Berücksichtigung des Marktangebots zu widersprechen scheinen, wird der experimentelle Vergleich eines gut fließfähigen, mit einem temperaturbeständigen Werkstoff angestrebt. Beide Materialien sind speziell für die Isolation von elektrischen Systemen und Sensoren ausgelegt.

Tabelle 4: Vergleich zweier Isolationsmaterialien als Isolationswerkstoff (RT = Raumtemperatur, HT = Hochtemperatur).

Isolationsmaterial	Dichte	Durchgangswiderstand (RT)	Durchgangswiderstand bei 795 °C	Durchschlagsfestigkeit bei RT	Temperaturbeständigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Anbieter
Polyurethan-Gießharz	1,2-1,3 g/cm ³	1014 Ωcm	-	30 kV/mm	-40 bis 130 °C	0,4 W/mK	Copaltec
HT-Zement	2,25 g/cm ³	107-109 Ωcm	102-103 Ωcm	1-2 kV/mm	bis 843	1,2 W/mK	Omega

Da die Fließfähigkeiten der Werkstoffe nicht bekannt sind, wurde in einem praxisnahen Versuchsszenario die Eignung der Materialien für die Verwendung als Isolationswerkstoff geprüft. Hierzu wurden jeweils zwei Versuchskörper mittels PBF-LB/M aus AlSi10Mg hergestellt (SLM125HL, vgl. Abbildung 51). Während der dreieckige Versuchskörper 1 zur Ermittlung der minimal durchfließbaren Kanalbreite ausgelegt ist, misst Versuchskörper 2 die horizontale Fließweite des eingegossenen Materials bei einer geringen Einfüllspaltweite.

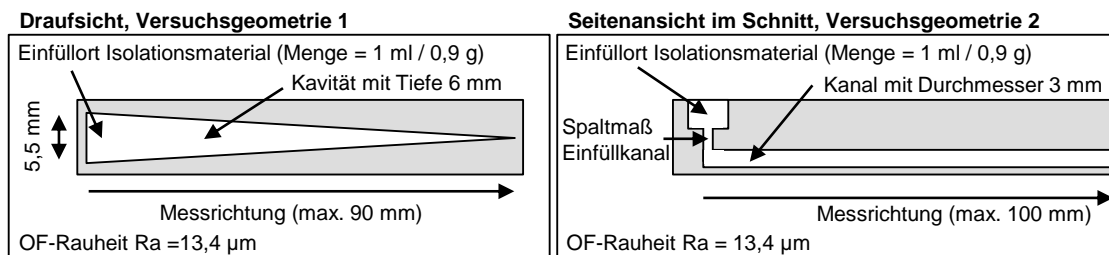


Abbildung 51: Versuchskörper zur Ermittlung der Fließfähigkeit in PBF-LB/M-Körpern. Das Spaltmaß des Einfüllkanals wurde variiert zwischen 1 x 1, 2 x 1 und 3 x 1 mm².

In Abbildung 52 ist gezeigt, wie die beiden Werkstoffe hinsichtlich ihrer Fließfähigkeit abschneiden. Es wird ersichtlich, dass der Werkstoff Polyurethan wesentlich besser dazu geeignet ist, schmale Spaltgeometrien abzugießen. Während der Hochtemperaturzement (Werkstoffbasis: Zr(SiO₄)) bereits bei einer Kanalbreite

von 4 mm aufhört zu fließen, erreicht das Polyurethan-Gießharz fast das Ende des 90 mm langen Versuchskörpers (Kanalbreite 0,1 mm). Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur ohne Erhitzen von Versuchsgeometrie oder Isolatormaterial durchgeführt. Beide Werkstoffe sind bei Raumtemperatur flüssig und härten über die Zeit aus.

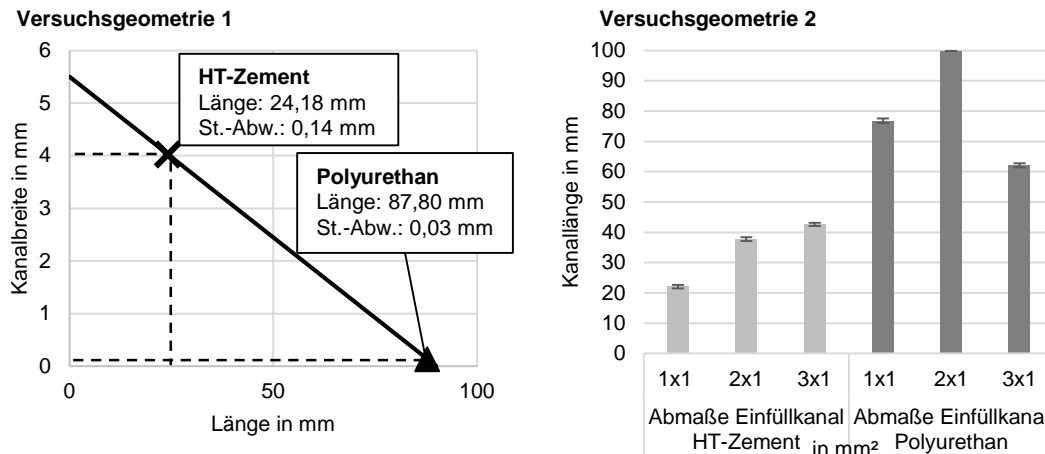


Abbildung 52: Links: Fließweite vom HT-Zement in Versuchsgeometrie 1 in Abhängigkeit von der Kanalbreite. Rechts: Sukzessive Variation der Abmaße des Einfüllkanals in mm in Abhängigkeit der Fließweite in Versuchsgeometrie 2.

Schlussfolgerung

Im Rahmen dieses Unterabschnitts wurde gezeigt, mit welchem Vorgehen additiv gefertigte Leiter mit eingelegten Sensoren elektrisch verbunden werden können und auch eine anschließende Isolation der Leiter erreicht werden kann. Insbesondere das Anschweißen von Kabeln an AM-Leiterbahnen mittels des in der Anlage verbauten Lasersystems kombiniert mit einem anschließenden Abgießen eines Isolationswerkstoffs erweist sich als vielversprechende Methode.

5.2.3.3 Drahtlose Signalübertragung mittels RFID

Für eine drahtlose Signalübertragung sollen RFID-Techniken näher betrachtet werden. Die Technologie ist weltweit verbreitet, genormt und wurde bereits in vielen produktionstechnischen Dissertationen untersucht und ihr Nutzen für die Fertigung und Montage nachgewiesen (vgl. z. B. PHILIPP (2014), ENGELHARDT (2015) oder REISEN (2015)). Zudem lässt RFID in Abhängigkeit der Wellenlänge eine Nutzung in der Anwesenheit von Metall zu, kann passiv (batterielos) betrieben werden und benötigt keinen zwingenden Sichtkontakt. Die Ansätze eines pas-

siven Betriebs sind zudem inklusive einer Kopplung mit Sensorik möglich. (KÖNIG 2015) Inwieweit sich die Vorteile der RFID-Technik für die Sensorintegration nutzen lassen, wird im Folgenden beschrieben.

Im Rahmen des Unterabschnitts wurden geeignete RFID-Technologien ermittelt und diese experimentell hinsichtlich Materialabhängigkeit, durchdringbaren Wanddicken und Frequenzabhängigkeit bewertet.

Die Funktion von in Metallen eingebetteten RFID-Tags kann durch drei verschiedene Effekte gehemmt werden, sodass die auslesbare Distanz reduziert wird (CIUDAD ET AL. 2010):

- 1) Verzerrung des Magnetfelds: Gemäß den Maxwell-Gleichungen erzeugt die Leitfähigkeit eines Metalls die Deformation eines magnetischen Feldes und stört damit auch die Funktion einer RFID-Komponente.
- 2) Verstimmung: Durch sogenannte Wirbelströme (Eddy Currents) wird ein magnetisches Feld senkrecht zur metallischen Oberfläche induziert, welches eine Reduktion der effektiven Induktanz und einen Anstieg der Arbeitsfrequenz des Systems zur Folge hat. Reader und Tag arbeiten dadurch bei unterschiedlichen Frequenzen und erfahren eine Reduktion des Wirkungsgrads.
- 3) Abschirmung und Leistungsverlust: Elektromagnetische Wellen werden durch in Metallen entstehende Eddy Currents abgeschirmt. Die Auswirkung dieser Effekte wird im Folgenden berechnet:

Abschirmung

Um die Eignung unterschiedlicher RFID-Technologien hinsichtlich ihrer Integrierbarkeit in metallische Werkstoffe bestimmen zu können, wird die theoretische Eindringtiefe bzw. Materialdurchdringung berechnet. Mithilfe folgender Formel lässt sich die Eindringtiefe von elektromagnetischen Wellen in gut leitenden Materialien bestimmen (POZAR 2012, CIUDAD ET AL. 2010):

$$\delta_E = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (5-2)$$

δ_E Eindringtiefe in mm

μ magnetische Permeabilität in $\text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$ (bestimmt durch Multiplikation von Magnetfeldkonstante μ_0 mit materialabhängiger relativer Permeabilität μ_r)

σ Leitfähigkeit in $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

f Frequenz in s^{-1}

Gemäß BINDER ET AL. (2019b) kann in experimentellen Untersuchungen mittels HF und UHF kein Metall durchdrungen werden. Abbildung 53 zeigt auf, inwieweit die berechneten Werte mit denen der experimentell ermittelten Eindringtiefen δ korrelieren. Neben der Durchdringung von Metallplatten (Dicke 1 mm) wird zudem die Durchdringung von Metallgittern (Dicke/Stegbreite: 1 mm) untersucht. Die Untersuchungen wurden experimentell verglichen mit Proben aus 316L, AISi10Mg und Ti64 (Anlage SLM125HL), da sich diese Werkstoffe stark voneinander unterscheiden und weit in der Industrie verbreitet sind. Der Tiefenfaktor ermöglicht den Vergleich zwischen theoretischer Eindringtiefe und den experimentellen Werten und ist immer normiert auf das Material Ti64 einer jeweiligen Reihe. Es wird erkennbar, dass die berechneten Werte eine gute Tendenz liefern, welche Reichweiteregebnisse für den jeweiligen Fall erwartet werden können. Durch das Einwirken anderer Störgrößen (z. B. Umgebungseinflüsse durch Metalle und Personen) weichen die experimentell ermittelten Werte jedoch vom berechneten Zustand ab (BINDER ET AL. 2019b).

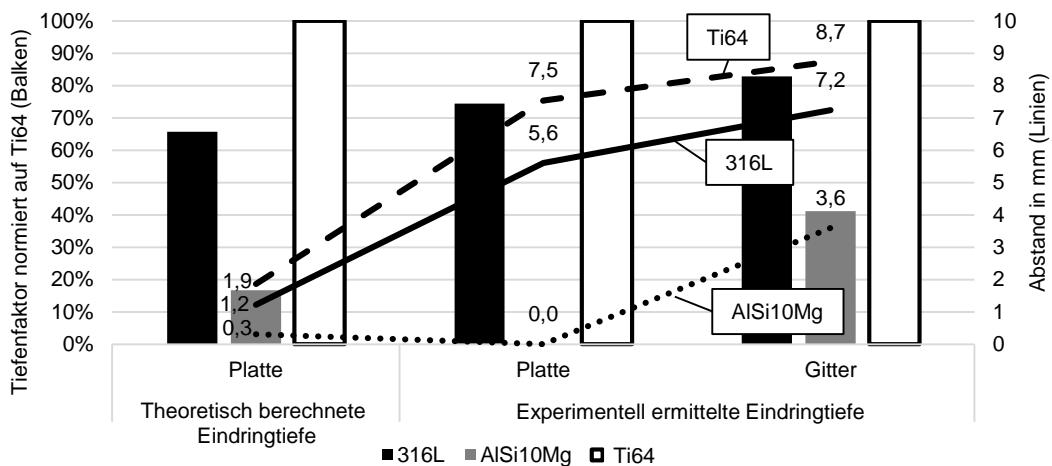


Abbildung 53: Berechnete RFID-Eindringtiefe im Vergleich zu experimentell ermittelten Werten gemäß BINDER ET AL. (2019b).

Leistungsverlust

Neben dem Grad der Abschirmung ist es von Interesse zu ermitteln, inwieweit die dem Tag zugeführte Leistung durch die Einbettung in Metall gemindert wird (Wirbelstromverluste). Dieser Leistungsverlust P_v berechnet sich wie folgt wird (CIUDAD ET AL. 2010):

$$P = \frac{1}{6} \pi^2 f^2 \mu^2 \sigma t_s^2 H_0^2 \quad (5-3)$$

- P_V durchschnittlicher Leistungsverlust in W/mm³
 t_s Dicke des zu durchdringenden Metalls in mm
 H_0 Amplitude des magnetischen Feldes in A/m

Um den qualitativen Verlauf der Leistung besser interpretieren zu können, werden alle bekannten Faktoren (vorderer Formelteil von (5-3)) zu Hilfsvariable $x_{Hilfsvariable}$ vereint und anschließend berechnet, sodass die Formel zum Leistungsverlust folgendermaßen umgeformt wird:

$$P_V = x_{Hilfsvariable} t_s^2 H_0^2 \quad (5-4)$$

$$\text{wobei } x_{Hilfsvariable} = \frac{1}{6} \pi^2 f^2 \mu^2 \sigma \quad (5-5)$$

So können die Einflussgrößen miteinander verglichen werden, obwohl nicht alle Variablen der Formel bekannt sind. Der material- und frequenzabhängige Verlauf dieser Variable wird für das Diagramm in Abbildung 54 berechnet und die Zusammenhänge aufgetragen. Ein zunehmender Wert für die Hilfsvariable kann mit einem höheren Leistungsverlust gleichgestellt werden. Der Einfluss der verwendeten Frequenz LF, HF und UHF wird durch den Frequenzanteil (f^2) der Hilfsvariable abgebildet (Formel (5-5)), die unterschiedlichen Metalle durch $\mu^2\sigma$.

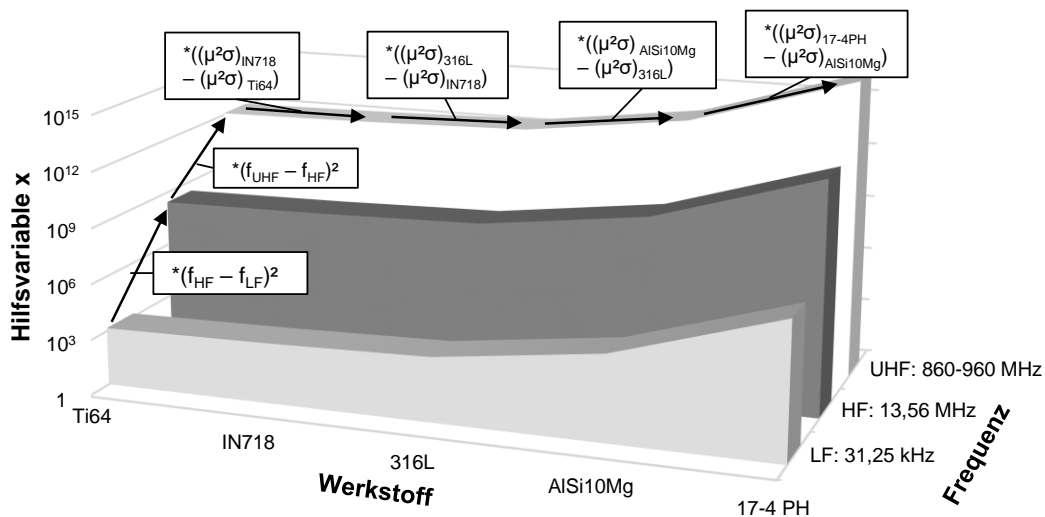


Abbildung 54: Material- und frequenzabhängiger Leistungsverlust von RFID-Tags (Leistungsverlust durch auftretende Wirbelströme (auch genannt Shielding)).

Es wird ersichtlich, dass abhängig von der Frequenz und dem Material die Metalle einen variierenden Leistungsverlust eines RFID-Tags zur Folge haben. 17-4 PH hat im Vergleich zu Ti64 einen 20.000-fach stärkeren Leistungsverlust zur Folge, zwischen UHF- und LF-RFID-Tags liegt der Faktor sogar bei knapp einer Milliarde. Dadurch kann gefolgert werden, dass eine möglichst geringe Übertragungsfrequenz für die Durchdringung von Metall am besten geeignet ist. In Abbildung 55 sind exemplarisch zwei verschiedene AM-Komponenten mit integriertem RFID-Tag im CT-(Computertomographie)-Scan gezeigt. Die Tags wurden während des Aufbauprozesses (SLM125HL) manuell in ein Metallbauteil aus 316L integriert und die Kavität anschließend im Aufbauprozess verschlossen. Durch die CT-Analyse kann gezeigt werden, dass die definierte Positionierung der Tags im Metallbauteil auch nach dem Aufbauprozess vorliegt. Nur der LF-Tag ist in der Lage durch das Metall ausgelesen zu werden. Die Erkenntnisse aus der Berechnung des Leistungsverlusts (Abbildung 54) decken sich mit auch mit Erfahrungen aus der Literatur. So bestimmten beispielweise PAZ ET AL. (2014) für 17-4 PH ebenso eine wesentlich höhere Abschirmungswirkung elektromagnetischer Strahlung als für 316L oder IN718. Auch die Erhöhung der Abschirmwirkung bei steigenden Frequenzen wird durch die Ergebnisse der Forscher plausibilisiert.

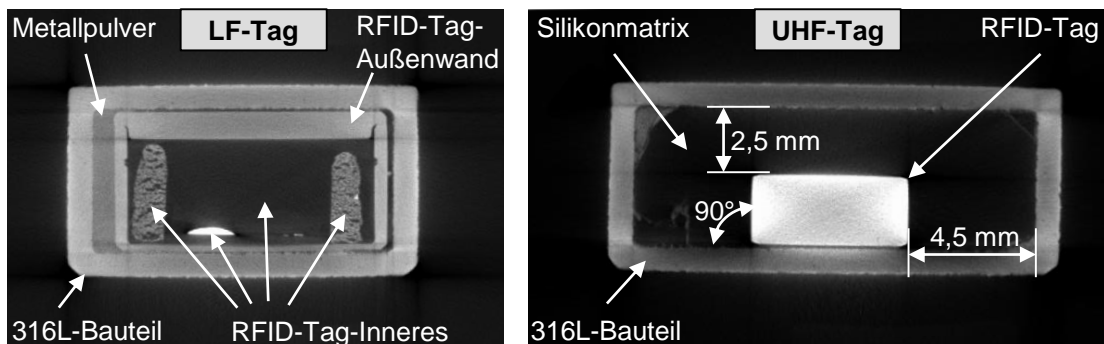


Abbildung 55: In 316L vollständig gekapselte RFID-Tags (Draufsicht, im Schnitt). Links: passgenau eingesetzter LF-Tag (Außenmaße Bauteil: $15,1 \times 12,1 \times 7,1 \text{ mm}^3$, Sensor: $\text{Ø}10,0 \times 4,5 \text{ mm}^3$), Rechts: in Silikonmatrix eingebetteter UHF-Tag (Außenmaße Bauteil: $17,0 \times 12,0 \times 7,0 \text{ mm}^3$, Sensor: $\text{Ø}6,0 \times 2,5 \text{ mm}^3$).

Schlussfolgerung

Es kann gezeigt werden, dass die vollständige Integration von LF-Tags in metallische AM-Bauteile während dem PBF-LB/M-Prozess möglich ist und deren Funktion erhalten bleibt. Die vollständige Integration von HF- bzw. UHF-Tags ist gemäß BINDER ET AL. (2019b) aufgrund der elektromagnetischen Kopplung und dem

damit verbundenen erhöhten Leistungsverlust nicht sinnvoll, da die Tags Metallwände nicht durchsenden können. Die korrekte Funktionsweise kann jedoch auf dem Metall, ohne Kapselung, im Rahmen einer korrekten Auslegung und Kompensation der Antennenverstimmung durch das anwesende Metall, sichergestellt werden.

5.2.3.4 Bewertung der Möglichkeiten der Signalübertragung

Die vorgestellten Sensorsignalübertragungsmöglichkeiten werden nun miteinander verglichen. Als Vergleichsbasis werden die Faktoren geometrische Flexibilität, Übertragungsrate, Handhabbarkeit und Reifegrad verwendet. Es wird ersichtlich, dass sich vor allem die AM-Leiter sowie RFID gegen die anderen Technologien durchsetzen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Vergleich von vier verschiedenen Methoden der Sensorsignalübertragung.

	Kabelbasiert	AM-Leiterbasiert	RFID-basiert
Geometrische Flexibilität	-1	1	1
Übertragungsrate	0	0	-1
Handhabbarkeit	0	1	1
Reifegrad	1	0	0
Durchschnitt	0	0,5	0,25

Legende: -1 schlecht, 0 neutral, 1 gut,

5.2.4 Schutz vor Pulver und Temperatur

Für die folgende Herangehensweise wird angenommen, dass eine zu hohe Temperatur zu einem Schaden am Sensor führen kann und jeder Sensor bei Raumtemperatur funktioniert. Zur Vermeidung hoher Temperaturen am Sensor wird daher wie folgt vorgegangen (vgl. Abbildung 56):

- 1) Bestimmung des Sensor-Arbeitsbereichs gemäß Datenblatt,
- 2) Bestimmung der im PBF-LB/M-Prozess auftretenden Temperaturen,
- 3) Bestimmung der Durchschnitts- und Maximaltemperaturen in der Bauteilkavität und
- 4) Auswahl einer Schutzmaßnahme.

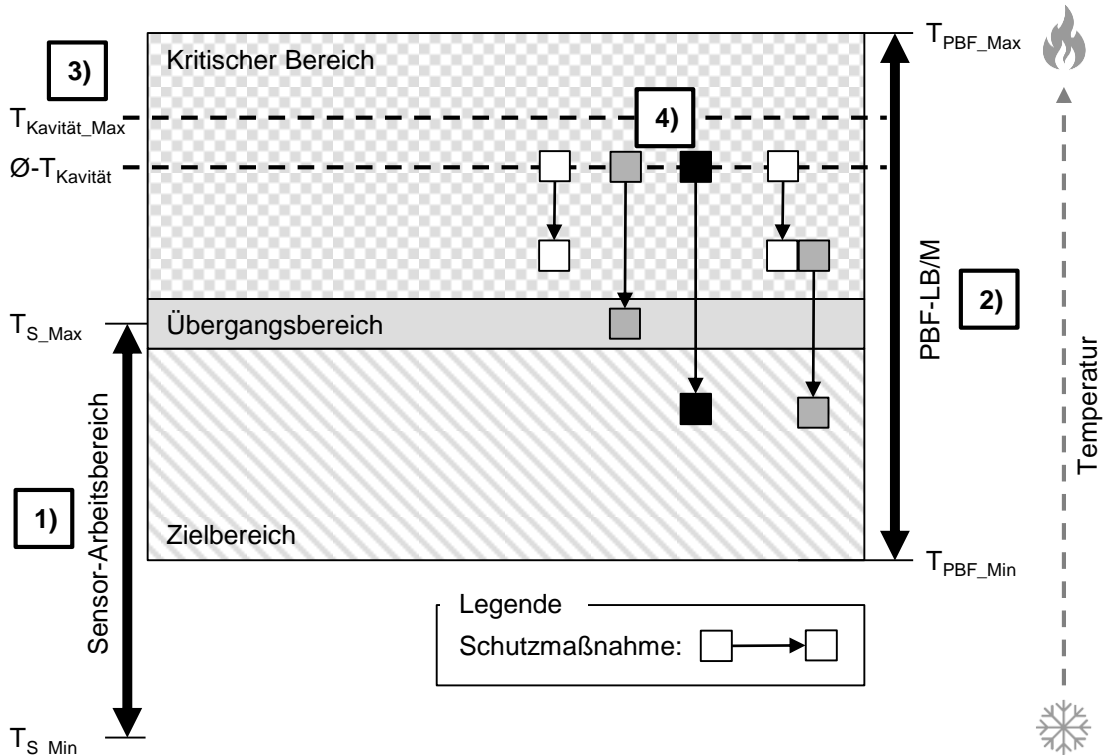


Abbildung 56: Graphische Veranschaulichung des Vorgehens zur Verhinderung einer thermischen Überlast des zu integrierenden Sensors, während des Ferti-gungsprozesses.

Wie in Abbildung 56 gezeigt, werden im Rahmen dieses Vorgehens die Schritte 1-4) durchlaufen. Durch die Kenntnis der Temperaturbereiche 1-3) kann in 4) eine passende Schutzmaßnahme (auch Kombinationen sind möglich) ausgewählt werden, um den Sensor durchwegs in seinen tolerierten Temperaturbereichen zu halten. Das vorgestellte Vorgehen wird im Folgenden näher erläutert und wurde für einen LF-RFID-Tag erprobt.

1) Bestimmung des Sensor-Arbeitsbereichs gemäß Datenblatt

Anhand des zugehörigen Datenblatts wird der zulässige Temperaturbereich (Minimaltemperatur T_{S_Min} und Maximaltemperatur T_{S_Max}), welcher auf den Sensor wirken darf ohne ihn zu zerstören, ermittelt und kann in das Diagramm eingetragen werden (siehe Abbildung 56, 1)).

2) Bestimmung der im PBF-LB/M-Prozess auftretenden Temperaturen

Nun sollen Unter- und Obergrenze (T_{PBF_Min} , T_{PBF_Max}) der beim PBF-LB/M auftretenden Temperaturen bestimmt werden. Für die Bestimmung von T_{PBF_Min} soll die in der Prozesskammer vorliegende Temperatur angenommen werden unter der

Voraussetzung, dass die Sensoren vor ihrer Integration in der Prozesskammer gelagert werden. Hierfür werden in drei verschiedenen Anlagentypen, während vier verschiedenen PBF-LB/M-Prozessen mit mindestens 2 h Laufzeit, die maximal auftretenden Temperaturen bestimmt (vgl. Abbildung 57, Messgerät: MCR-4TC).

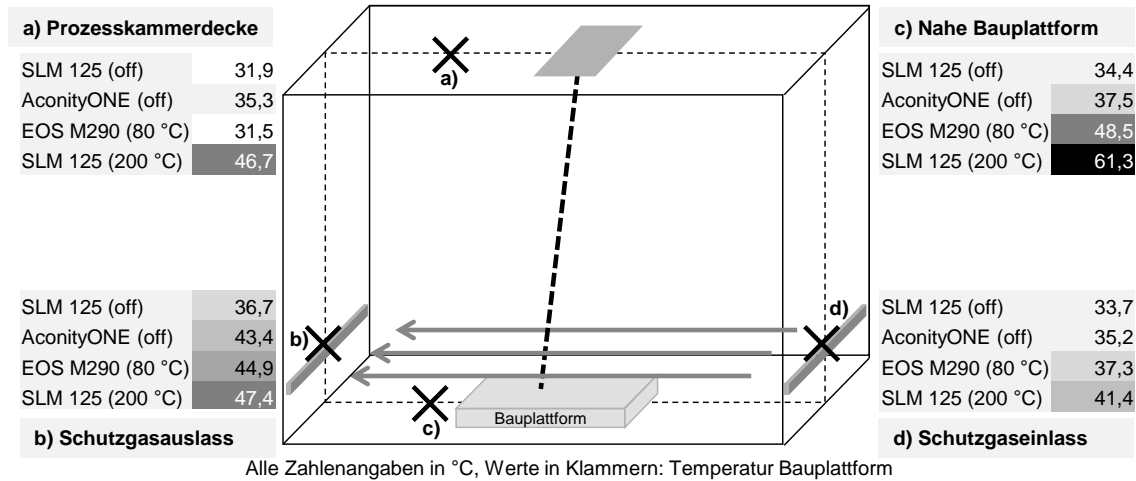


Abbildung 57: Auftretende Maximaltemperaturen in der Prozesskammer verschiedener PBF-LB/M-Anlagen unter der Verwendung unterschiedlicher Bauplattform-Vorheiztemperaturen (vgl. BINDER ET AL. (2020d)).

Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass

$$T_{S_Min} \leq T_{PBF_Min} \leq T_{S_Max} \quad (5-6)$$

gilt. Fälle, dass T_{PBF_Min} über dem Wert von T_{S_Max} liegen, wie es beispielsweise bei einem sehr heißen Prozess mit Bauplattformtemperaturen $\gg 200$ °C der Fall sein könnte, werden somit nicht betrachtet.

Für T_{PBF_Max} wird angenommen, dass die maximal im Prozess auftretenden Temperaturen in der Schmelze bzw. dem Plasma des Keyholes vorliegen. Da dieses Schmelzbad nur selektiv vorliegt und ein Sensorintegrationsprozess angestrebt wird, welcher zuverlässig den Kontakt zwischen Schmelzbad und Sensor verhindert, soll T_{PBF_Max} der Schmelztemperatur des jeweiligen Materials entsprechen (siehe Abbildung 56, 2)).

3) Bestimmung der Durchschnittstemperaturen in der Bauteilkavität

Temperaturen in 1.2709-Kavität

Um die in einer Kavität auftretenden Temperaturen einschätzen zu können, wurde ein Experiment durchgeführt (vgl. Abbildung 58 a)). Ein rechteckiger Testkörper

wurde additiv bis zu einer Unterbrechungsebene aufgebaut und eine Kavität in seiner Geometrie vorgesehen, welche zur Seite und nach oben hin geöffnet ist. Ein Thermoelement (Typ K) wurde durch die seitliche Öffnung so in das Bauteil gesteckt, sodass die Messspitze genau unter der vertikalen Öffnung liegt. Eine Sensorintegration von oben wurde damit simuliert und angenommen, dass eine schützende Pulverschicht der Dicke d_{Schutz} über dem Sensor aufgezogen wurde. Anschließend wurde der Baujob fortgesetzt und die Kavität durch einen horizontalen Überhang verschlossen. Der Versuch wurde mit dem Material 1.2709 durchgeführt, ohne Verwendung einer Bauplattformheizung. Es wurden nun die Maximaltemperaturen von jeweils 14 Schichten nach der Unterbrechungsebene ermittelt und deren Mittelwerte, Standardabweichungen und Extrema bestimmt (vgl. Abbildung 58). Es ist zu erkennen, dass die Temperatur mit zunehmender Schutzschichtdicke stetig abnimmt und sich davon abhängig zwischen 90 und 180 °C bewegt. Die Temperaturwerte von $d_{\text{Schutz}} = 1,5$ mm und 2,1 mm sind zudem auffällig, nachdem deren Durchschnittstemperatur ca. doppelt so hoch liegt wie es ein interpolierter Erwartungswert vermuten lassen würde. Außerdem liegt die jeweils auftretende Maximaltemperatur zwischen 350-450 °C und damit deutlich über den Werten der anderen Messungen. Das überhängende Schmelzbad ist in diesen Fällen von oben so stark abgesackt, dass das Thermoelement mit der Schmelze verschweißt wird. Durch den direkten Kontakt mit der Schmelze und die anschließend verbesserte Leitfähigkeit zur Oberseite des Bauteils war die thermische Last auf den Sensor wesentlich erhöht. Der Sensor ließ sich nach dem Fertigungsprozess nicht mehr aus der Kavität entfernen, da er fest mit ihr verschweißt war. Die Tatsache, dass besagtes Absacken des Schmelzbades erst bei den dickeren Schutzschichten aufgetreten ist, ist nicht nachvollziehbar und tritt zufällig auf. Schlussfolgern lässt sich aus diesem Effekt, dass das Aufziehen von dickeren Schutzschichten zu einer weniger dicht gepackten Pulverschüttdichte führen kann und damit zu mehr Leerstellen im Pulver, durch welche die Schmelze weniger gestützt wird und stärker absacken kann.

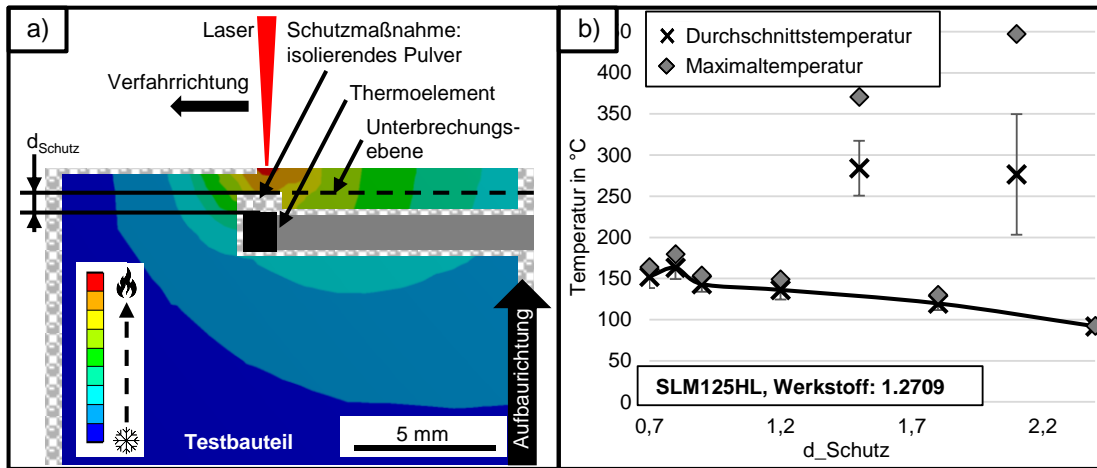


Abbildung 58: Darstellung des Versuchsaufbaus im Längsschnitt zur Ermittlung der in der Kavität anliegenden Temperatur mittels eingelegtem Thermoelement.

Temperaturen in AlSi10Mg-Kavität

Im Rahmen eines zweiten Versuchs wurde ein Testbauteil aufgebaut und der Prozess an definierter Stelle unterbrochen. Ein Thermoelement wurde in eine Bauteilkavität so eingebettet, dass es von einer 1 mm hohen Pulverschicht aus AlSi10Mg geschützt wird, bevor die Kavität horizontal durch den fortgeführten Bauprozess verschlossen wurde. Das Thermoelement konnte somit den Temperaturverlauf während des Prozesses in der Kavität ermitteln. In Abbildung 59 sind die Temperaturdaten graphisch visualisiert. Die Analyse der thermischen Daten ermöglicht eine leichte Unterteilung des Baujobs in Inertisierungsphase, Verschluss der Kavität durch den schichtweisen Aufbau, Fertigstellung des Bauteils mit integriertem Temperatursensor, Fertigstellung anderer Bauteile und Prozessende. Gut erkennbar ist, wie der Energieeintrag des Lasers den gesamten Bauplattform-Bauteil-Verbund über den Prozess hinweg aufheizt. Die Temperaturlast in der Kavität ist immer dann am höchsten, wenn der Laser über die jeweilige Kavität hinwegbelichtet. Die maximale Temperaturlast in der Kavität blieb durchwegs unter 90 °C (vgl. Abbildung 59). Die Durchschnittstemperatur $\bar{T}_{\text{Kavität}}$ betrug ab der Baujobwiederaufnahme bis zum Ende 57,0 °C, die Temperaturspitze lag bei $T_{\text{Kavität_Max}} = 86 \text{ °C}$ (keine Bauplattformheizung verwendet, siehe Abbildung 56, 3)).

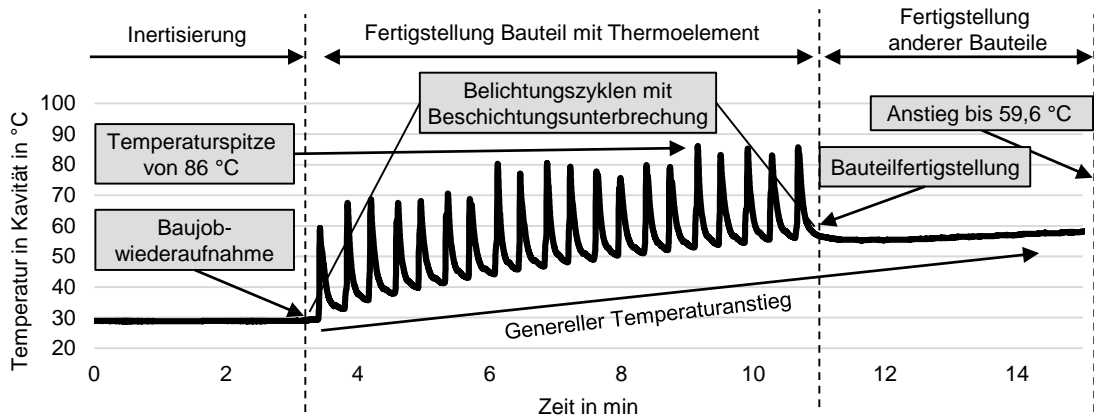


Abbildung 59: Temperaturverlauf eines Thermoelements 1 mm tief eingebettet im Pulverbett aus AlSi10Mg (SLM125HL).

4) Auswahl einer Schutzmaßnahme

Gemäß BINDER ET AL. (2020b) und in Anlehnung an die allgemeinen Integrationskonzepte in Abschnitt 5.2.2 wurden sechs verschiedene Temperaturschutzkonzepte erprobt. Diese beinhalten Ansätze des Temperaturschutzes durch Pulver, reduzierter Energiedichte, geometrisch angepasster Verschlüsse, einer eingelegten Aluminiumplatte und einer umgebenden Silikonmatrix (vgl. Abbildung 60). Da das den Sensor umgebende Silikon schnell verdampft, erreichte Konzept 6 die höchsten Durchschnittstemperaturen von 367 °C am Sensor. Im Gegensatz dazu, konnte durch Konzept 4 (Kombination einer Metallplatte mit triangulärem Verschluss), die Durchschnittstemperatur auf 50,8 °C und die Maximaltemperatur auf 54,8 °C gehalten werden. Ausreißer einer Temperaturspitze von 411 °C, wie sie bei Konzept 2 auftraten, verdeutlichen die Notwendigkeit eines robusten Temperaturschutzkonzepts, da sonst derartige thermische Schocks auf den Sensor ausgeübt werden können. Ein Sensor, welcher eine maximale Temperaturlast von 100 °C erfahren darf, kann somit durch die Schutzkonzepte 1., 4. und 5. integriert werden (siehe Abbildung 56, 4)).

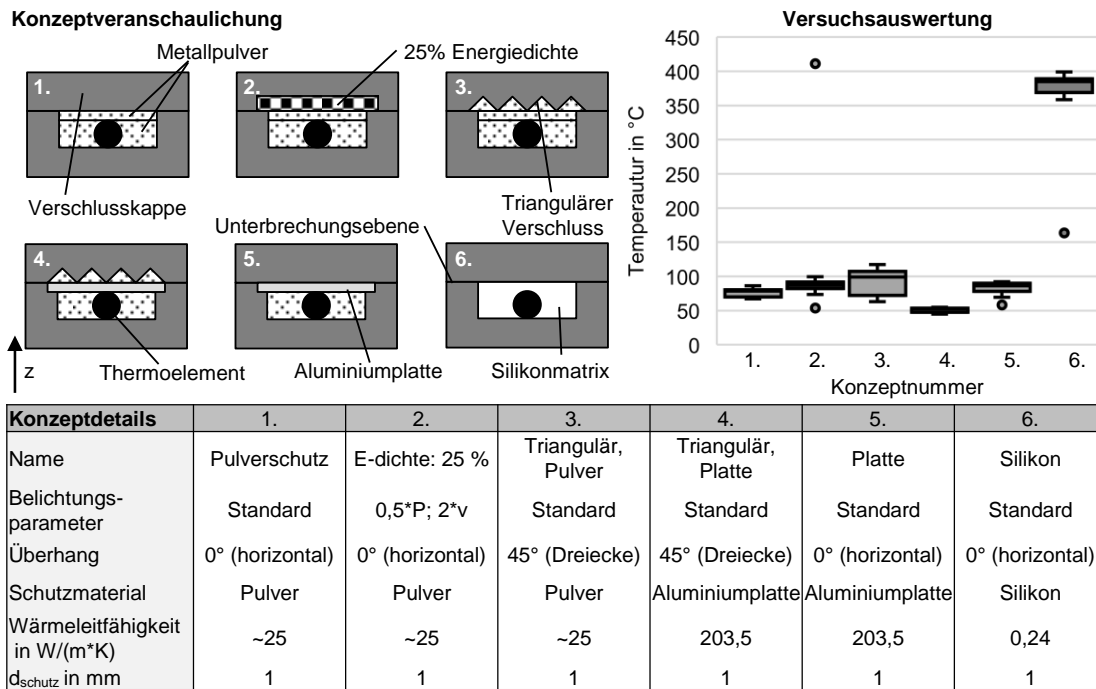


Abbildung 60: Vergleich sechs verschiedener Temperaturschutzkonzepte durch Auswertung mittels Boxplots in Anlehnung an BINDER ET AL. (2020b) (Anlage: SLM125HL, Werkstoff: AlSi10Mg, Pulverleitfähigkeit AlSi10Mg gemäß: LUO ET AL. (2021), Wärmeleitfähigkeiten Aluminiumplatte und Silikon laut Materialdatenblatt).

Durchführung des Vorgehens für einen LF-RFID-Tag

Abschließend wurde das Vorgehen für einen LF-RFID-Tag erprobt. Gemäß 1) (siehe Überschriften und Abbildung 56) wurden T_{S_Min} zu 40 °C und T_{S_Max} zu 125 °C aus dem Datenblatt bestimmt. Der LF-Tag sollte in ein AlSi10Mg-Bauteil auf einer SLM125HL integriert werden, im Rahmen eines Bauprozesses ohne Bauplattformheizung. Gemäß 2) ergaben sich Temperaturen in der Prozesskammer von $T_{PBF_Min} = 20$ °C (Raumtemperatur) und $T_{PBF_Max} = 36,7$ °C. Die \emptyset - $T_{Kavität}$ beträgt für den Prozess für AlSi10Mg (gemäß 3)) 57 °C in einer Pulverbetttiefe von 1 mm, die Maximaltemperatur liegt bei 86 °C. Dementsprechend wird für diese Integrations-Konfiguration nicht zwingend eine weitere Schutzmaßnahme benötigt (4), da der Tag durch eine Pulverschicht von 1 mm bereits ausreichend geschützt wird ($T_{S_Min} < \emptyset-T_{Kavität} < T_{Kavität_Max} < T_{S_Max}$). Falls jedoch die Anwesenheit von Pulver in der Kavität verhindert werden soll, oder Temperaturschübe, wie in Abbildung 58 gezeigt, unbedingt vermieden werden sollen, kann beispielsweise die Schutzmaßnahme „Triangulär, Platte“ angewandt werden (vgl. Abbildung 60).

Resümee

Anhand des in diesem Abschnitt beschriebenen Vorgehens konnte gezeigt werden wie auftretende Temperaturen in einer Kavität ermittelt werden können. Gegebenfalls können die auftretenden Durchschnitts- und Maximaltemperaturen beeinflusst werden, sodass diese den Anforderungen des zu integrierenden Sensors entsprechen. In Unterabschnitt 5.2.4, Arbeitspunkt 3) wurden sowohl die Durchschnittstemperatur in der Kavität als auch die maximal auftretende Temperatur angegeben. Abhängig von der Sensorart und dessen Wärmekapazität kann der Sensor gegebenenfalls kurz anliegenden Temperaturspitzen widerstehen, sodass vor allem die auf ihn wirkende Durchschnittstemperatur von Interesse ist. Liegen jedoch keine detaillierten Informationen über den Sensor gegenüber kurzzeitig wirkenden Temperaturschocks vor, sollte $T_{\text{Kavität_Max}}$ unbedingt unter $T_{\text{S_Max}}$ liegen, um einen Ausfall der Komponente zu vermeiden.

5.2.5 Verschluss der Kavität

Der Verschluss der Kavität stellt einen wichtigen Schritt bei der Sensorintegration dar. Da bei der Integration kein Temperatur- und Pulverschutz nötig sein muss, wird dieser Schritt getrennt genannt, obwohl die Verschlussprinzipien zu einem großen Anteil redundant mit denen der Sensorpositionierung (vgl. Abschnitt 5.2.2) und Schutzmechanismen (vgl. Abschnitt 5.2.4) sind. Jedoch lassen sich manche Integrationskonzepte erst mit den unterschiedlichen Argumenten des Temperaturschutzes und des Kavitätsverschlusses erzeugen und herleiten, wie es bspw. die Kombination des Einlegens einer Metallplatte mit dem triangulären Anschweißkonzept beschreibt. In Tabelle 6 sind die grundlegenden Verschlusskonzepte benannt und schematisch eingeteilt. Ein Überhangverschluss stellt eine nach Design-for-Additive-Manufacturing-Regeln durchgeführte überhängende Struktur dar, wie bspw. in Abbildung 37 gezeigt. Während der Vollmaterialverschluss durch ein horizontales Belichten, auch unter Reduktion der Energiedichte, umgesetzt wird (vgl. Abbildung 60). Ein Hybridverschluss ist eine Struktur, welche anteilig Bereiche belichtet und andere von der Verfestigung ausspart (vgl. z. B. Abbildung 60, trianguläre Belichtung). Eine Besonderheit ist außerdem, dass die Kavität nicht zwingend verschlossen werden muss. In diesem Falle muss der Sensor fest an seiner Position fixiert werden.

Tabelle 6: Grundlegende Kavitäts-Verschlusskonzepte.

	Kein Verschluss	Überhangs-Verschluss	Hybridverschluss	Vollmaterial-verschluss
Beschreibung	Kavität verbleibt offen, der integrierte Sensor muss fest fixiert sein	Kavität wird Schicht-für-Schicht durch Überhangstruktur verschlossen	Teilweise volumenfüllende Struktur wird aufgebaut (z. B. durch Waben, Gitter oder trianguläre Struktur)	Vollmaterialstruktur wird aufgebaut, ggf. mit angepassten Laserparametern
Pulver im Verschluss	entfällt	ja	ja (reduzierte Menge)	nein

5.2.6 Unterbrechungskompensation

Das wesentliche Ziel dieses Unterabschnitts ist es zu gewährleisten, dass vor der Baujobwiederaufnahme bestmöglich die ursprünglichen Prozessbedingungen wiederhergestellt werden. Potenzielle irreversible Veränderungen gilt es nach Möglichkeit zu kompensieren. Die Wiederherstellung des Ausgangszustands vor der Unterbrechung beinhaltet die Schutzgasatmosphäre und die Pulverschichtdicke, sowie deren Homogenität. Zu kompensieren gilt es thermische Veränderungen in der Anlage und im Bauteil, sowie eine potenzielle Oxidation der Oberfläche. Da die Einflüsse im aktuellen Stand der Technik noch unzureichend analysiert worden sind, muss zuerst der Einfluss von Baujobunterbrechungen und deren Nachweisbarkeit ermittelt werden. Anschließend sollen Möglichkeiten zur Kompensation aufgezeigt werden.

5.2.6.1 Einfluss von Baujobunterbrechungen

Da Prozessunterbrechungen für eine Sensorintegration notwendig sind, werden eigene Untersuchungen zu diesem Thema in diesem Unterabschnitt detailliert vorgestellt. Die These, welche in diesem Rahmen nachgewiesen werden soll, ist, dass eine Prozessunterbrechung zu einer veränderten effektiven Schichtdicke und damit zu einer veränderten Energiedichte in diesem Bereich führt. Die Betrachtungen spiegeln zum großen Anteil die Berichte aus BINDER ET AL. (2020c) und BINDER ET AL. (2020a) wieder und werden auf einer SLM125HL mit AlSi10Mg durchgeführt.

Temperaturverlauf eines Baujobs mit Baujobunterbrechung

Um ermitteln zu können, wie sich die Temperatur während eines exemplarischen Baujobs verändert, werden die Temperaturen an einer Bauplattform und am gefertigten Bauteil während des Prozesses gemessen. Hierfür wurde an einem teilweise aufgebauten Bauteil ein Thermoelement montiert, bevor der Versuch begonnen wird (vgl. Abbildung 61). Das Thermoelement ist in der Lage während

des gesamten Bauprozesses die Temperaturen im Prozess zu ermitteln. Für die Messung der Temperaturen wurden verschiedene Szenarien betrachtet: 1) Unterbrechung ohne Ausfall der 200 °C heißen Bauplattformheizung (Szenario 1), sowie eine Unterbrechung mit Ausfall der Plattformheizung und 80-minütigem Wiederaufheizen (Szenario 2, Extremum: zeitliches Maximum) bzw. nur dreiminütigem Wiederaufheizen der Bauplattform (Szenario 3, Extremum: zeitliches Minimum). Die Temperaturveränderungen am Bauteil sind in Abbildung 61 gezeigt.

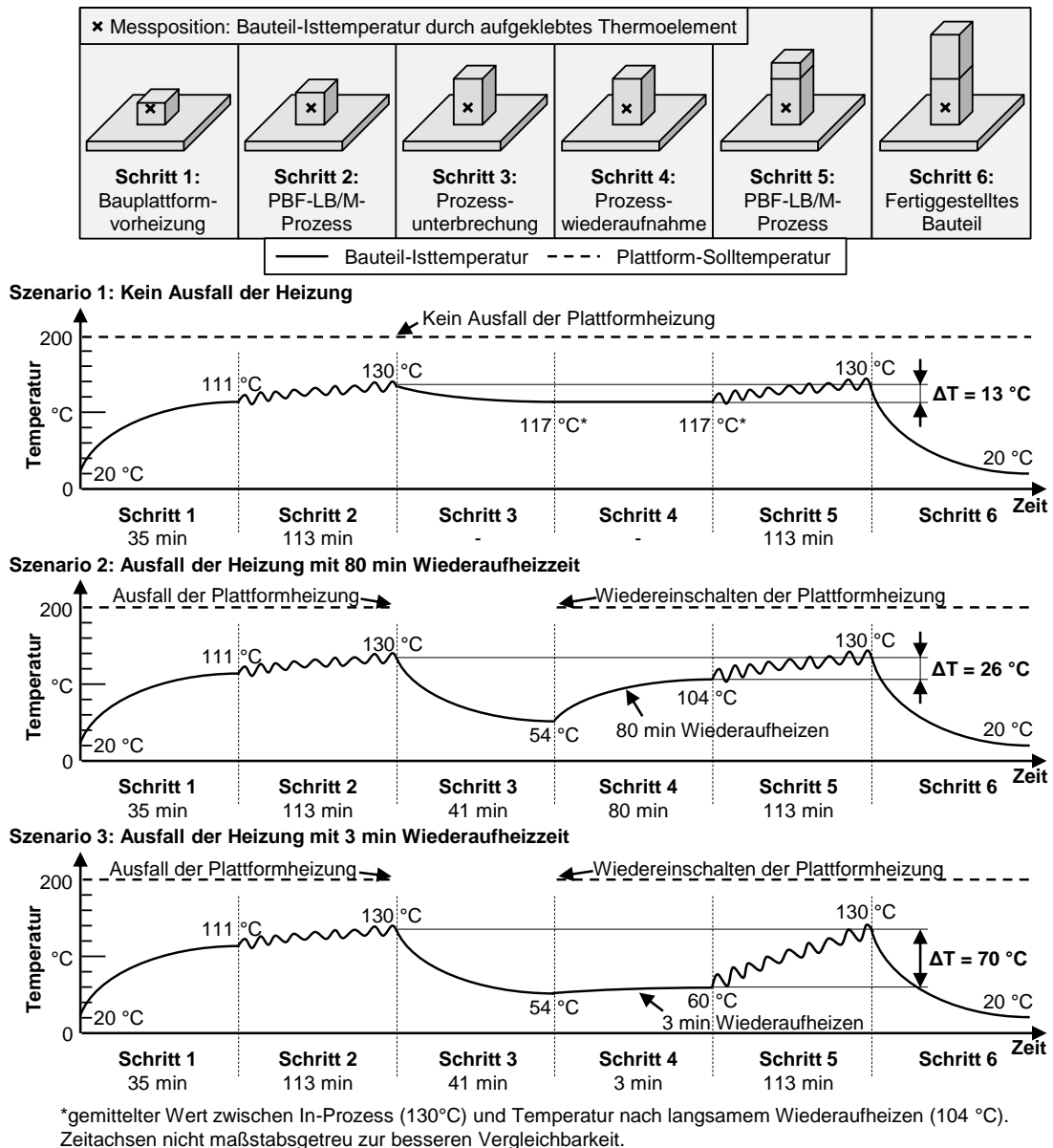


Abbildung 61: Vergleich der Temperaturveränderung von PBF-LB/M-gefertigten Bauteilen während einer Prozessunterbrechung in drei verschiedenen Szenarien.

Es wird ersichtlich, dass alle Baujobunterbrechungen eine Reduktion der Bauteiltemperatur nach sich ziehen. Ist diese mit einem Ausfall der Bauplattformheizung verbunden, kann die Temperaturänderung ΔT vom Prozessabbruch bis zur Wiederaufnahme zwischen 26 °C bis zu 70 °C betragen.

Theoretische Betrachtung

Aus den Analysen der Bauteiltemperatur resultiert, dass die Temperaturen in den gefertigten Bauteilen nicht konstant, sondern kontinuierlichen Schwankungen ausgesetzt sind. Während die kurzfristigen Temperaturschwankungen vor allem schicht- bzw. laserinduziert sind, steigt der Temperaturmittelwert kontinuierlich über den Prozess und findet in der Regel erst nach einigen Prozessstunden eine Gleichgewichtstemperatur. Dementsprechend ist die Bauprozessstartschicht von hoher Kritikalität, da zu diesem Zeitpunkt die Prozesstemperatur noch wesentlich geringer ausfällt. Während in einem PBF-LB/M-Fertigungsprozess die Temperatur stetig steigt, erfahren die Bauteile eine thermisch induzierte Längendehnung und vermeintlich konstante Bauteilschichten fallen, unter anderem bedingt durch die ansteigende Bauteiltemperatur, anfangs kleiner aus als später im Prozess. Findet nun eine Bauprozessunterbrechung statt, ist diese zeitabhängig mit einer Abwesenheit des Lasers, in extremen Fällen mit einer Abschaltung der Bauplattformheizung oder auch dem Öffnen der Prozesskammertüre verbunden. All diese Faktoren beeinflussen den thermischen Gleichgewichtszustand des Prozesses durch eine Abkühlung und damit einhergehende Bauteilschrumpfung. Damit unterliegen Prozessunterbrechungen einer hohen Kritikalität und sollen gemäß aktueller Empfehlungen vermieden werden (vgl. Unterabschnitt 3.1.4). Theoretische oder praktische Betrachtungen, inwieweit sich derartige Unterbrechungen auf die gefertigten Bauteile auswirken, liegen jedoch kaum vor.

Im Folgenden wird der Ansatz von SPIERINGS & LEVY (2009) bzw. MINDT ET AL. (2016) zur Schichtdickenänderung um die Theorie der Temperaturänderung bei Prozessunterbrechungen erweitert (Oberflächenrauigkeiten nicht berücksichtigt). In einem ersten Schritt wird ein konstanter Dichtefaktor k_{Dichte} bestimmt, der die Änderung der Schüttdichte des Pulvers δ_{Pulver} zur Volumendichte des erstarrten Materials des Bauteils $\delta_{Bauteil}$ angibt:

$$k_{Dichte} = 1 - (\delta_{Bauteil} - \delta_{Pulver}) \quad (5-7)$$

Unter der Annahme, dass $\delta_{Pulver} = 59\%$ (nach KARAPATIS ET AL. (1999) zwischen 55-63 %) und $\delta_{Bauteil} = 100\%$ ist, kann k_{Dichte} zu 59 % berechnet werden. Bei der Wiederaufnahme des Bauprozesses nach einer Unterbrechung kehrt das Bauteil

aufgrund der eingebrachten Laserenergie langsam auf seine Gleichgewichtstemperatur zurück (siehe Abbildung 61, Schritt 5). Dieser Faktor soll im Folgenden seine Berücksichtigung finden. Das Verhalten soll durch folgende lineare Näherung (Formel (5-8)) beschrieben werden, wobei $h_{ThSchicht}$ die thermisch bedingte Höhenänderung pro Schicht und s_{GGW} die Anzahl der Schichten bis zur Wiederherstellung des thermischen Gleichgewichts (GGW) beschreibt. Die Abkürzung m beschreibt die Anzahl der Schichten nach der Prozesswiederaufnahme, α den Wärmeausdehnungskoeffizient, h_b die aktuelle Aufbauhöhe inklusive Bauplattform und ΔT_U die Temperaturänderung im Bauteil durch Prozessunterbrechung:

$$h_{ThSchicht} = \begin{cases} \frac{-\alpha * h_b * \Delta T_U}{s_{GGW}}, & 0 < m \leq s_{GGW} \\ 0, & m \leq 0; s_{GGW} < m \end{cases} \quad (5-8)$$

Anhand der durchgeführten Temperaturmessungen lässt sich sagen, dass das Temperaturgleichgewicht von 130 °C, gemittelt über alle Szenarien aus Abbildung 61, nach ca. 15 min Prozesszeit wiederhergestellt ist. Die PBF-LB/M-Prozesszeit beträgt 23 s pro Schicht, sodass sich s_{GGW} zu 39 berechnen lässt. Die thermische Höhenänderung insgesamt h_{ThSum} kann zudem wie folgt berechnet werden:

$$h_{ThSum} = \begin{cases} -\alpha * h_b * \Delta T_U, & m = 1 \\ 0, & m \neq 1 \end{cases} \quad (5-9)$$

Unter der Annahme von $\alpha = 20,5 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ für AlSi10Mg (RENISHAW PLC 2015), $h_b = 27 \text{ mm}$ und $\Delta T_U = 49 \text{ K}$ wird h_{ThSum} nach der Unterbrechung ($m = 1$) zu $-27 \mu\text{m}$ berechnet. Die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, haben gezeigt, dass eine Prozessunterbrechung zur manuellen Sensorintegration ca. 40 min lang dauert. Durch lineare Interpolation zwischen den Extrem-Szenarien 2 und 3 (3 min: $\Delta T_U = 70 \text{ K}$; 80 min: $\Delta T_U = 26 \text{ K}$) berechnet sich ΔT_U zu 49 K. Daraus ergibt sich ein $h_{ThSchicht}$ von $0,7 \mu\text{m}$ pro Schicht. Diese berechneten Werte schlagen sich in der zusammenfassenden Formel (5-10) auf die aktuelle Höhe des additiv aufzubauenden Bauteils nieder ($h_{Part,n}$), der Index n steht für die aktuelle Schichtnummer (gezählt in Aufbaurichtung). $h_{Plattform,n}$ steht für die Position der Bauplattformoberseite im Bauschacht (Position Bauplattform bei Startschicht: 0,00 mm), abhängig von der aktuellen Schicht n .

$$h_{Part,n} = h_{Part,n-1} + (h_{Plattform,n} - h_{Part,n-1}) * k_{Dichte} + h_{ThSum} - h_{ThSchicht} \quad (5-11)$$

Somit entspricht die aktuelle Bauteilhöhe im Prozess ($h_{Part,n}$) der Bauteilhöhe in der vorherigen Schicht ($h_{Part,n-1}$) addiert mit der verfestigten Pulverschicht der aktuellen Schicht ($(h_{Plattform,n} - h_{Part,n-1}) * k_{Dichte}$). Dies wird verrechnet mit

dem durch die Unterbrechung bedingten thermischen Bauteilschwund (h_{ThSum}) und dessen Kompensation über die Folgeschichten ($h_{ThSchicht}$). Die effektive Schichtdicke t_{eff} kann somit für die jeweilige Schicht n berechnet werden:

$$t_{eff,n} = h_{Plattform,n} - h_{Part,n-1} \quad (5-12)$$

t_{eff} wird nun für jede Schicht n berechnet und ist in der folgenden Abbildung 62 dargestellt. Es ist zu erkennen, wie die effektive Schichtdicke zu Beginn innerhalb der ersten zehn Schichten auf ihren Gleichgewichtswert ansteigt. Ab der Prozessunterbrechung kommt es unter den gegebenen Parametern zu einem Anstieg der Schichtdicke um $27 \mu\text{m}$. Nach der ersten neuen Schicht geht diese Zunahme in eine Verringerung der Schichtdicke über, da sich das Bauteil durch den Wärmeintrag ausdehnt. Wenn, wie im Falle von Szenario 3 aus Abbildung 61, die Temperatur der Substratplattform erst mit kurzer Vorlaufzeit eingeschaltet wird, verstärkt sich dieser Effekt erheblich (vgl. Abbildung 62, b)).

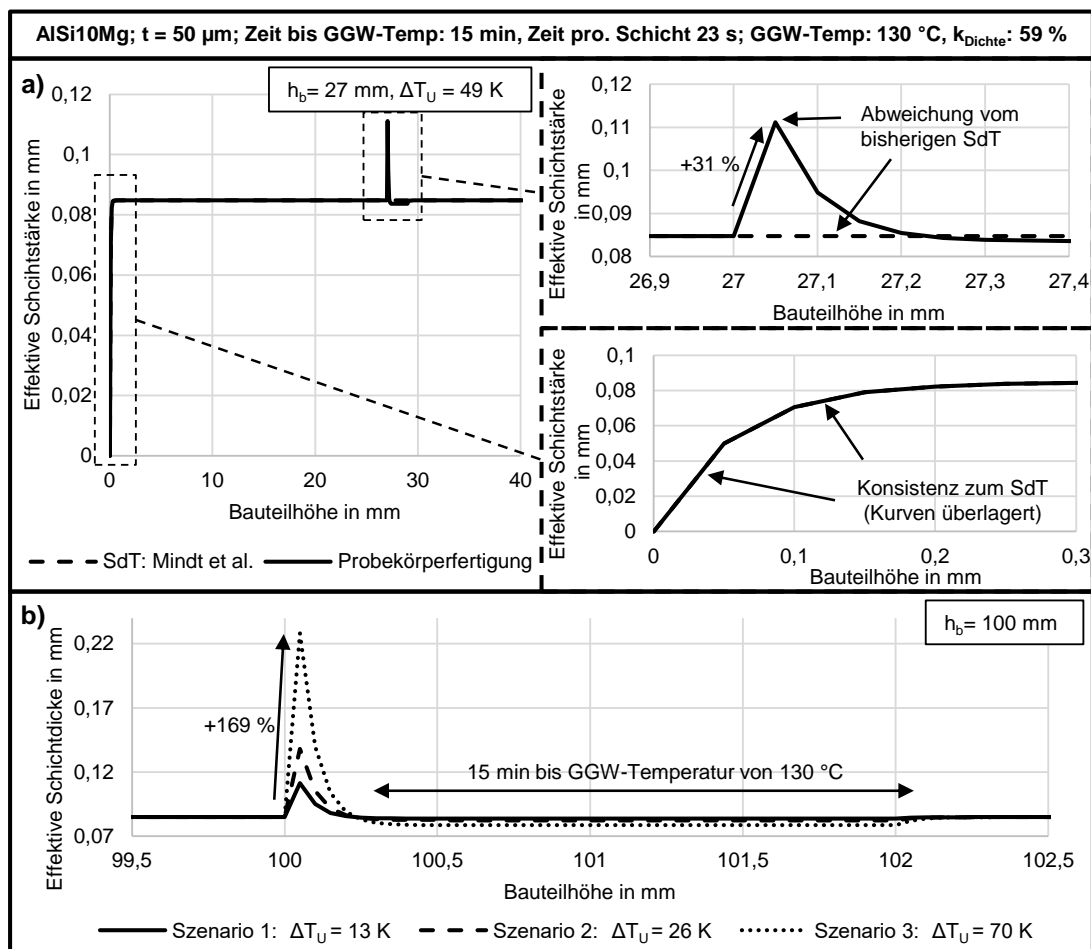


Abbildung 62: Effektive Schichtdicke nach Unterbrechung: a) Vergleich eigener Ansatz mit Stand der Technik; b) Vergleich der 3 Szenarien aus Abbildung 61.

In Abbildung 63 ist dargestellt, wie drastisch sich eine Prozessunterbrechung im Falle von extremen, aber realistischen, Szenarien auswirken kann, vor allem unter der Berücksichtigung steigender Baukammergrößen (> 400 mm) und steigender Bauplattformheiztemperaturen. Erhöhungen der Schichtdicke über einem Millimeter sind so denkbar und können in einem realen Szenario zum Prozessabbruch führen.

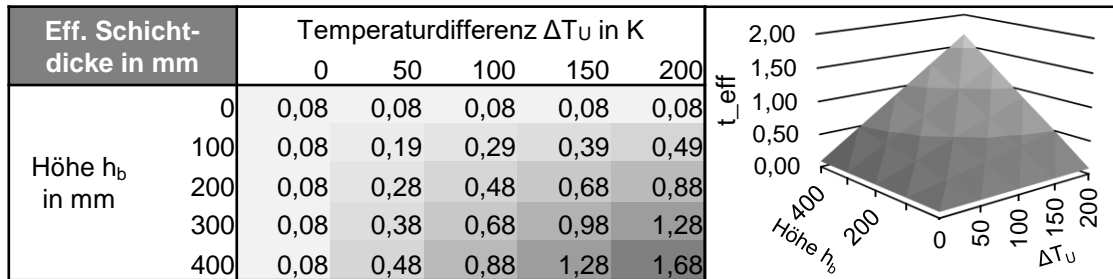


Abbildung 63: Übersicht der Auswirkungen verschiedener Szenarien auf die effektive Schichtdicke von AlSi10Mg (Schichtdicke $t = 50 \mu\text{m}$).

Nachweis von Prozessunterbrechungen im gefertigten Bauteil

Im Rahmen des experimentellen Nachweises der Baujobunterbrechungen (U), wurden AlSi10Mg-Probekörper (SLM125HL) betrachtet, welche in einer Höhe von 27 mm (inkl. Bauplattform) für 40 min eine Prozesspause erfahren. Die Prozesskammertür wurde in dieser Zeit geöffnet, sodass die Bauplattformheizung von ihrem Sollwert von 200 °C abkühlt. Anhand der vorhergegangenen Messungen wurde, in Anlehnung an die theoretischen Berechnungen (Abbildung 61), eine Temperaturänderung bis zur Fortsetzung von 49 °C angenommen. Die Rahmenbedingungen, welche in Abbildung 62 a) angenommen wurden, werden nun hier geprüft.

Zur besseren quantitativen Analyse sollen speziell definierte Kennwerte für die Schmelzpfade ermittelt werden. Die Werte wurden für ein Beobachtungsfenster mit einer Breite von ca. 2 mm (Breite der Abbildung 64) gemessen. In Bezug auf die Unterbrechungsschicht wird jede 4. Schicht (und deren Beziehungen zueinander) analysiert. Die jeweiligen Schmelzbäder wurden durch einen Musterdrehwinkel von 45° pro Schicht verdreht, sodass jede 4. Schicht planparallel zur Schliffebene liegt. Es wurde nur jede 4. Schicht im Verhältnis zur nächsten gemessen. Folgende Kennwerte wurden ermittelt (Messwerte immer in Aufbaurichtung erfasst, vgl. Abbildung 64):

- 1) Minimaler Abstand zwischen den Schmelzbädern: höchster Punkt des unteren Schmelzbads bis zum tiefsten Punkt des oberen Schmelzbads

- 2) Maximale Höhe des Schmelzbads: niedrigster Punkt des Schmelzbads bis zum obersten Punkt desselben Schmelzbads
- 3) Schmelzbadabstand (gemessen von oben): höchster Punkt des unteren Schmelzbads bis zum höchsten Punkt des oberen Schmelzbads
- 4) Schmelzbadabstand (von unten gemessen): tiefster Punkt des unteren Schmelzbads bis zum tiefsten Punkt des oberen Schmelzbads

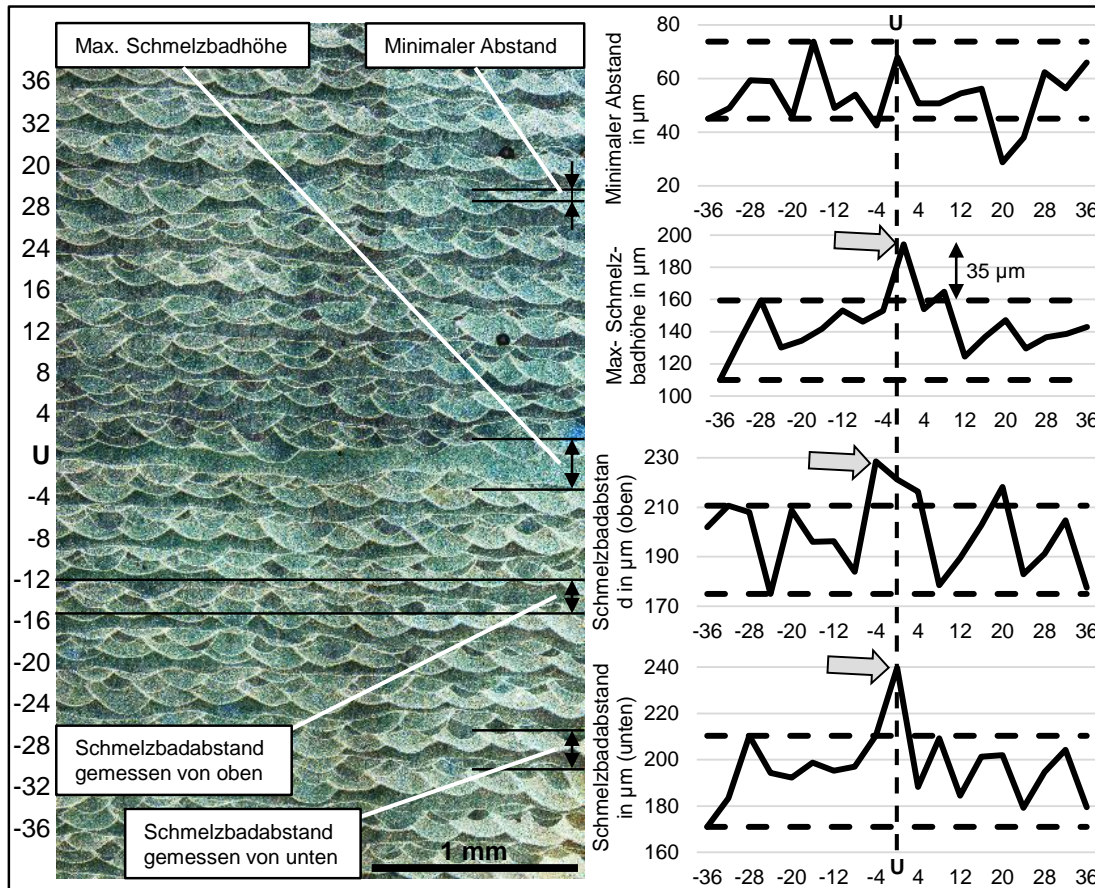


Abbildung 64: Geätztes Schliffbild einer AlSi10Mg-Probe, an welcher die vier verschiedenen Kennwerte erfasst werden. Die im Schliffbild eingezeichneten Positionen der Messgrößen sind nur exemplarisch dargestellt. Alle Messwerte werden für jede Schicht erfasst und in die rechtsliegenden Graphen übertragen.

Die Diagramme auf der rechten Seite in Abbildung 64 zeigen die Auswertungen für die erklärten vier Kennwerte. Insgesamt werden vier Schliffbilder in einer Betrachtungsfensterbreite von 2 mm dieser Unterbrechung analysiert und ausgewertet (insgesamt 288 Einzelmessungen), wodurch Ausreißer besser kompensiert werden können und die Analyse eine verbesserte statistische Belastbarkeit erhält. Die horizontalen gestrichelten Linien in den Diagrammen bilden das stabile Prozessfenster, in dem sich der jeweilige Kennwert bewegt, bis der Prozess unterbrochen wird. Für alle aufgezeichneten Kennwerte, mit Ausnahme des minimalen

Schmelzwegabstandes, ist eine deutliche Veränderung in der Unterbrechungsschicht zu erkennen.

Nach der in (5-11) vorgestellten Theorie ist es nachvollziehbar, dass der Schmelzpfad der Unterbrechung im Schliffbild am größten ist (35 μm über dem Prozessfenster für den maximalen Höhenunterschied). Eine thermisch induzierte Bauteillängenänderung durch eine Fertigungsunterbrechung ist also in der Veränderung der Schmelzbäder nachweisbar. Der experimentell ermittelte Wert weicht jedoch mit 35 μm um 8 μm vom theoretisch errechneten Wert ab. Dies deutet darauf hin, dass der Temperaturabfall durch die Unterbrechung im analysierten Fall noch größer ausgefallen ist, als es die theoretische Annäherung zulässt.

Nach Analyse der Schmelzbahnverläufe ist der theoretische Ansatz des thermisch bedingten Höhenversatzes bestätigt (vgl. Abbildung 64). Aufgrund der verhältnismäßig geringen Aufbauhöhe von 27 mm inkl. Bauplattform ist der Effekt noch moderat ausgeprägt. Gemäß den Berechnungen aus Abbildung 62 und Abbildung 63 ist bei einer Unterbrechung zu einer höheren Aufbauhöhe auch ein erhöhter Versatz zu erwarten, welcher ab einem bestimmten Wert Defekte in der Anbindequalität erzeugen wird.

Analyse von Zugfestigkeiten

Im folgenden Abschnitt wird ein Zugversuch (Universalprüfmaschine Z100) nach DIN EN ISO 6892-1 mit einer runden Probenform nach DIN 50125 - B4 x 20 durchgeführt. Es werden vertikale und horizontale Zugstäbe hergestellt. Um die Vergleichbarkeit der Werte zu ermöglichen, werden Bauteile mit und ohne Unterbrechung gefertigt. Auch in diesem Fall dauert eine Unterbrechung der Versuche 40 Minuten und ist mit dem Öffnen der Prozesskammertür verbunden. Die Heizung der Substratplattform wird während dieser Zeit abgeschaltet. Um mögliche negative Auswirkungen der Prozessunterbrechung auf die Festigkeit einiger Proben zu kompensieren, wird nach der Unterbrechung ein einfaches Remelting mit den gleichen Belichtungsparametern wie beim Aufbau auf einer neuen Pulverschicht durchgeführt.

Die Auswertung der Zugprüfung ist in Abbildung 65 dargestellt. Alle geprüften Proben sind spröde gebrochen. Die vertikalen Proben ohne Unterbrechung sind zu gleichen Teilen im 45°- und 90°-Winkel gebrochen, teilweise in der Mitte und teilweise außermittig. Vertikale Proben mit Unterbrechung hingegen haben in zwölf von 13 Fällen mittig (Unterbrechungsebene) und mit einer 90°-Bruchfläche versagt (vgl. auch Anhang A5, Abbildung 116). Horizontale Proben ohne Unter-

brechung zeigen 90°-Bruchflächen, während das Versagen bei Prüflingen mit Unterbrechung vermehrt in 45°-Bruchflächen übergeht. Die Bruchebenen der horizontalen Proben verteilt sich von den Bruchflächen aus von oben nach unten, ohne dass ein Trend erkennbar ist.

Abbildung 65 zeigt die Zugfestigkeiten, die Streckgrenze, das E-Modul und die Bruchdehnung der Proben. Es ist zu erkennen, dass die Unterbrechung kaum einen Einfluss auf die Zugfestigkeit hat. Ist diese jedoch verbunden mit einem Remelting, sinkt R_m um 34 % von 425,6 MPa im ununterbrochenen Zustand auf 285,1 MPa. Ansonsten sind die Kennwerte mit Angaben aus der Literatur gut vergleichbar (BINDER ET AL. 2020a). Beim E-Modul gibt es Steigerungen durch die Unterbrechung im Mittelwert. Die Veränderungen liegen jedoch zu den größten Teilen innerhalb der Standardabweichung. STOLL ET AL. (2019) kann für seine horizontalen 316L-Proben aber einen ähnlichen Effekt verzeichnen, sodass das E-Modul um ca. 15 % angestiegen ist. Auch den Anstieg der Bruchdehnung hat er bei den horizontalen Proben verzeichnet, welcher auch bei AlSi10Mg aufzutreten scheint. Bei höheren Unterbrechungen sollte dieser Effekt noch stärker auftreten (vgl. Abbildung 63). Bei den Analysen von STOLL ET AL. (2019) sind die Festigkeiten der Proben mit Unterbrechung verringert, was in den eigenen Analysen mit AlSi10Mg nicht nachgewiesen werden kann.

Es wird zudem ersichtlich, dass Unterbrechungen mit einem leichten Anstieg des Elastizitätsmoduls einhergehen, vor allem wenn diese mit einem Remelting der Schicht verbunden waren (vgl. Abbildung 65). Eine Abnahme von ϵ_f ist bei stehenden Proben mit Remelting im Vergleich zu stehenden Proben mit und ohne Unterbrechung zu erkennen.

Der von HAMMOND ET AL. (2019) berichtete negative Effekt einer Prozessunterbrechung konnte nicht reproduziert werden. Es liegt nahe, dass bei der Versuchsdurchführung durch HAMMOND ET AL. (2019) die Einflussfaktoren des Ausbaus der Bauplatzform aus der Kammer und eine höhere Aufbauhöhe zum Tragen kommen, welche in diesen Versuchen nicht vorliegen.

In früheren Versuchen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, wurde auch der Einfluss der Wärmenachbehandlung (Standard-T6-Zyklus) berücksichtigt. Abgesehen von den für die Wärmenachbehandlung typischen Festigkeitsänderungen, konnte kein Unterschied zwischen den Proben mit und ohne Unterbrechung festgestellt werden. (BINDER ET AL. 2020a)

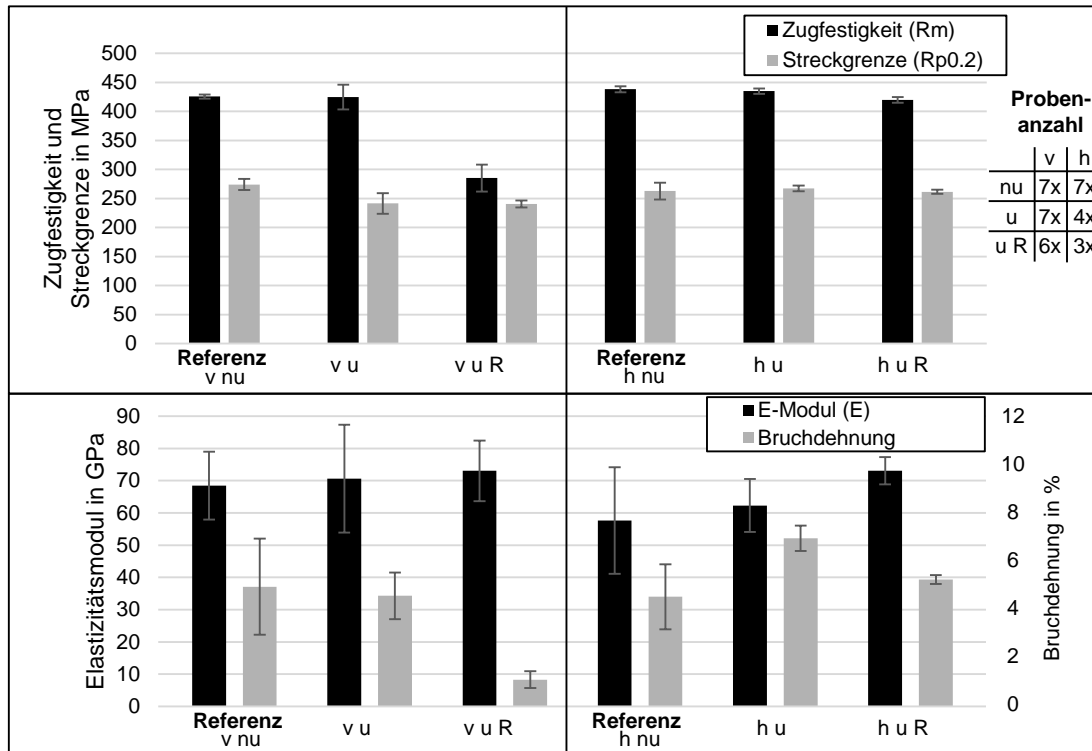


Abbildung 65: Analyse des Einflusses von Unterbrechungen und Unterbrechungen mit Remelting auf die mechanischen Eigenschaften von AlSi10Mg (v = vertikal h = horizontal, nu = nicht unterbrochen, u = unterbrochen, R = Remelting).

Allgemein kann berichtet werden, dass die Unterbrechungen leicht an einer unbehandelten Außenfläche der Versuchskörper zu erkennen sind. Im Falle von horizontal aufgebauten Körpern, lässt sich die Unterbrechung gut als Linie in der Bruchfläche erkennen. Vertikal aufgebaute Proben inkl. Unterbrechung und Remelting weisen in ihrer Bruchfläche einige Bereiche (ca. 30 %, analysiert mittels Bildauswertung) ohne Schichtanhaftung auf. Zudem lässt sich der Balling-Effekt verzeichnen (vgl. Anhang A5, Abbildung 117).

Auffällig ist bei der Baujobwiederaufnahme nach einer Prozessunterbrechung, welche verbunden ist mit dem Öffnen der Prozesskammertür, eine Veränderung der Spritzerbildung. Der subjektive Eindruck legt hierbei nahe, dass es, ähnlich wie beim Belichten einer Startschicht, zur verstärkten Spritzerbildung in dieser Schicht kommt. Ursächlich für dieses Erscheinungsbild kann eine erhöhte Schichtdicke durch thermischen Bauteilschwund während der Unterbrechungszeit, oder die verstärkte Anwesenheit von Sauerstoff in der Wiederaufnahmeschicht sein, welche eine verstärkte exotherme Oxidbildungsreaktion im Schmelzbad hervorruft. Diese Reaktion führt zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg und begünstigt Instabilitäten im Schmelzbad (ROMBOUTS ET AL. 2006), welche zur verstärkten Bildung von Prozessspritzern führen können. Eine Temperaturveränderung in

der optischen Bank (KÜSTERS ET AL. 2011) des Lasersystems ist jedoch ebenso eine mögliche Erklärung für eine veränderte Prozessführung.

5.2.6.2 Nachweis von Baujobunterbrechungen mittels Thermografie

Vergleicht man die Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt mit Untersuchungen aus der Literatur, scheinen Prozessunterbrechungen, abhängig von der Baujobhöhe, dem verwendeten Material, der Unterbrechungsdauer und vielen weiteren Einflüssen, teils kritisch und teils unkritisch zu sein. Idealerweise sollen Unterbrechungen jedoch vermieden werden. Da diese im Falle einer Sensorintegration aber nicht umgangen werden können, ist eine Prozessüberwachung, welche eine Einschätzung über die Kritikalität der Unterbrechung liefern kann, von großem Interesse. Die Temperaturdifferenz im Bauteil, sowie die zeitliche Länge der Unterbrechung (und der damit verbundenen Oxidation der Oberfläche) sind wesentliche Indikatoren dafür, inwieweit eine Baujobunterbrechung kritisch für das Bauteil gewesen ist (z. B. hilfreich für nachgelagerte Qualitätssicherung). Im Folgenden soll daher die Möglichkeit, Prozessunterbrechungen mittels Überwachung zu detektieren, erläutert werden. Zukünftig können mit diesem Vorgehen frühzeitig kritische Prozessunterbrechungen automatisiert erkannt werden.

Um berührungslos Temperatur-Kennwerte über einen Körper erfassen zu können, ist es der Stand der Technik, die Infrarotstrahlung des zu erfassenden Körpers zu analysieren und zu interpretieren (vgl. Unterabschnitt 2.1.3). In PBF-LB/M-Anlagen wird hierfür standardmäßig On-Axis-Pyrometrie verwendet. Da die Pyrometrie zu jedem Zeitpunkt nur eine punktuelle Temperatur erfassen kann, sind hochauflösende Thermografiekameras insofern opportun, da mit einer hohen Bildrate ein vollständiges Kamerabild von der gesamten Prozessfläche erfasst und analysiert werden kann. Das Prinzip der Thermografie soll daher für den Nachweis von Baujobunterbrechungen während dem Prozess verwendet werden.

Annahme: Durch die vorhergehende Analyse der Baujobunterbrechung ist bekannt, dass Unterbrechungen zum Abkühlen des Bauteils führen, unabhängig davon, ob eine Bauplattformheizung verwendet wird oder nicht.

Versuch: Eine Thermografiekamera (FLIR SC5650) wurde für den Versuch auf der Oberseite der Prozesskammer einer AconityOne montiert (vgl. HERZER ET AL. (2021)). Anschließend wurden zwölf zylindrische Stäbe aus dem Werkstoff AlSi10Mg mit einem Durchmesser von 1 cm aufgebaut. Es wurden in diesem Szenario Baujobunterbrechungen von 0,5 min und 60 min durchgeführt (Bauhöhe ca. 50 mm, keine Bauplattformheizung), ohne die Prozesskammer zu öffnen, und es

wurde die darauffolgende Belichtung mit einer Thermografiekamera erfasst. Abbildung 66 zeigt exemplarisch die jeweils erste Aufnahme der Thermografiekamera nach einer Unterbrechung zum selben Belichtungszeitpunkt für die Unterbrechungszeiten 0,5 min und 60 min. Zu erwähnen ist, dass die Bilder nur schwer miteinander verglichen werden können, da die Bildschärfe von Versuch zu Versuch variiert. Während eines Versuchs bleibt die Kalibrierung der Kamera jedoch gleich, sodass sich relative Aussagen über den Prozessverlauf treffen lassen.

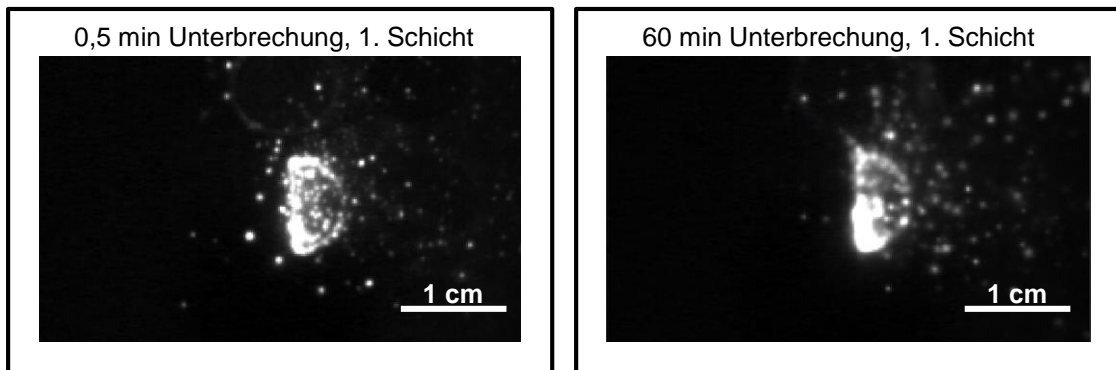


Abbildung 66: Thermografieaufnahmen nach 0,5 Minuten (links) und 60 Minuten (rechts) Unterbrechungszeit.

Ergebnis: Im Rahmen der Auswertung wurde der Fokus der Auswertung auf den Vergleich der längsten und kürzesten Prozessunterbrechung gelegt. Betrachtet man in Abbildung 67 den qualitativen Temperaturverlauf der 1. Schicht nach der Unterbrechung wird ersichtlich, dass sich das Prozessleuchten nahezu nicht über die Schichten verändert, sondern nur ein Temperaturanstieg während der prozessierten Schicht selbst auftritt. Der Prozess ist nahezu im Gleichgewicht, es lässt sich ein nur recht geringfügiger Temperaturanstieg von der ersten bis zur 9. Schicht nach der Unterbrechung konstatieren. Die verwendete Einheit Digital Level (DL) stellt einen digitalen Wert für die vom Detektor gesammelte Energie in Form von Photonen dar. Je mehr Energie auf den Detektor innerhalb seines Spektralbandes auftrifft, desto höher ist der Digitalwert. Ein höherer bzw. niedrigerer DL-Wert entspricht somit auch einer höheren bzw. niedrigeren Temperatur. Da die absolute Temperatur auf der Bauteiloberfläche nicht bekannt ist, können die DL-Werte nur zu einer relativen, aber nicht zu einer absoluten Temperaturasuwertung genutzt werden.

Vergleicht man nun diesen Eindruck mit den Analysen der einstündigen Unterbrechung (Abbildung 67, unten) ist der Eindruck grundlegend verschieden. Einerseits haben die Komponenten im nichtaktiven Zeitraum des Lasers (ganz links und rechts im Graph) nach neun Schichten eine deutlich erhöhte Temperatur

als direkt nach der Unterbrechung. Andererseits weist die 1. Schicht nach der Unterbrechung während der Belichtung ein wesentlich stärkeres Prozessleuchten auf, als nach neun Schichten. Dieser Eindruck deckt sich mit der These einer verstärkten Spritzerbildung nach einer Prozessunterbrechung, da diese das Leuchten im ausgewerteten Bild maßgeblich mit beeinflussen.

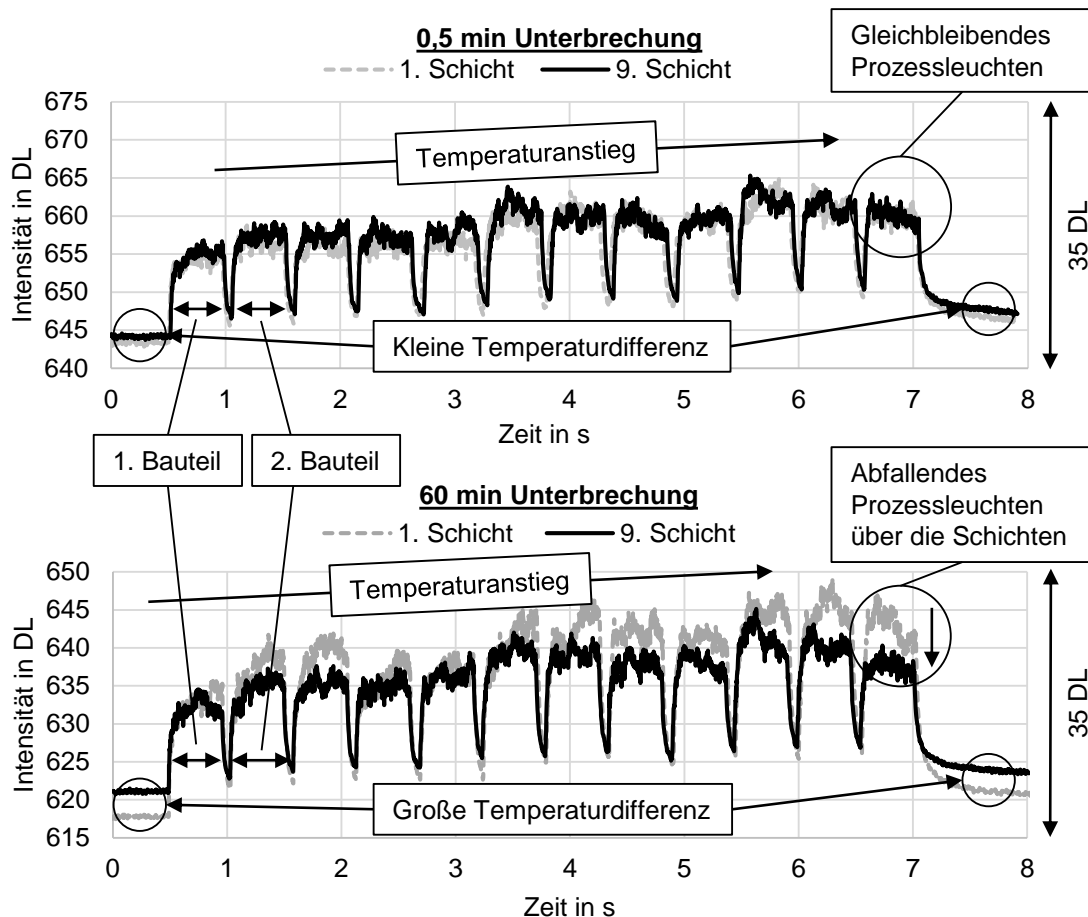


Abbildung 67: Veränderung des Prozessleuchtens (Durchschnittswert gemittelt über das gesamte Analysebild) von einer 0,5 min-Unterbrechung im Vergleich zu einer Unterbrechung von 60 min. Gezeigt ist jeweils ein Ausschnitt von 35 DL.

Interpretation: Die Veränderung der Spritzerbildung über die Schichten nach der Prozessunterbrechung hinweg, kann auf die langsame Reduktion der Schichtdicke zurückgeführt werden, da nach YANG ET AL. (2020) und REPOSSINI ET AL. (2017) die Spritzerbildung mit zunehmender Energiedichte (abhängig von der Schichtdicke gemäß Formel (5-11)) zunimmt. Zusätzlich verstärkt werden könnte dieses Phänomen durch eine Oxidation der Bauteiloberfläche während der Unterbrechung. So muss die eingebrachte Laserenergie nach der Unterbrechung eine ge-

wisse Oxidationsschicht durchbrechen. Der beschriebene Ballingeffekt und die damit verschlechterte thermische Anbindung an das Bauteil kann zusätzlich die Überhitzung der Oberfläche verursachen.

Der von ANWAR & PHAM (2018) berichtete Effekt der steigenden Spritzeranzahl, während der ersten zehn Schichten, kann somit unter Nutzung eines anderen Messmittels (Thermografie statt einfacher Lichtbildkamera) reproduziert werden. Die Interpretation dieses Effekts als Fehler der auf der Analyse von Grauwerten basierenden Bildverarbeitung kann unter Nutzung der Thermografie als Messmittel ausgeschlossen werden. Diese Deutung scheint damit auch im Falle von ANWAR & PHAM (2018) als unwahrscheinlicher.

5.2.6.3 Resümee

Das Ziel beim Umgang mit Unterbrechungen ist es, die Prozess-Ausgangsbedingungen (Temperatur, Schutzgasatmosphäre) vor der Unterbrechung bestmöglich stabil zu halten und vor der Baujobwiederaufnahme, den vorherigen Gleichgewichtszustand des Prozesses wiederherzustellen. Erfolgt dies nicht, besteht die Gefahr der Veränderung der mechanischen Eigenschaften in Verbindung mit der Bildung von Defekten im Bauteil bis hin zum Prozessabbruch. In den eigenen Experimenten war eine Bauprozessunterbrechung unter Verwendung von AlSi10Mg unkritisch. Gemäß Literatur (STOLL ET AL. 2019, HAMMOND ET AL. 2019, VDI 3405 BLATT 2.8 2021) und den eigenen theoretischen Analysen können Prozessunterbrechungen jedoch auch kritische Auswirkungen haben. Betrachtet man beispielsweise den CT-Scan eines defekten Probekörpers in Abbildung 68 (eigener Versuch) ist dort ein deutlicher Riss in der Anbindungsschicht zu erkennen. Dieser wird vermutlich verursacht durch Veränderungen in der Pulverschicht (Homogenität, Schichtdicke) oder durch eine verschlechterte Schmelzbadanbindung an das Bauteil (Ursache: thermische Veränderungen oder Oxidation). Es kann somit nicht abschließend gesagt werden, wann ein unkritischer und wann ein kritischer Zustand zu erwarten ist. Dies gilt es im Rahmen von zukünftigen Untersuchungen zu klären. Für die eigenen Arbeiten wird daher angenommen, dass der Einfluss einer Prozessunterbrechung minimiert werden sollte, bestenfalls durch Verkürzung der Unterbrechungszeit und durch Aufrechterhalten der Schutzgasatmosphäre. Durch die Verkürzung der Unterbrechungszeit minimiert sich auch die Temperaturveränderung in der optischen Bank (KÜSTERS ET AL. 2011), sowie die Abkühlung des Bauteils.

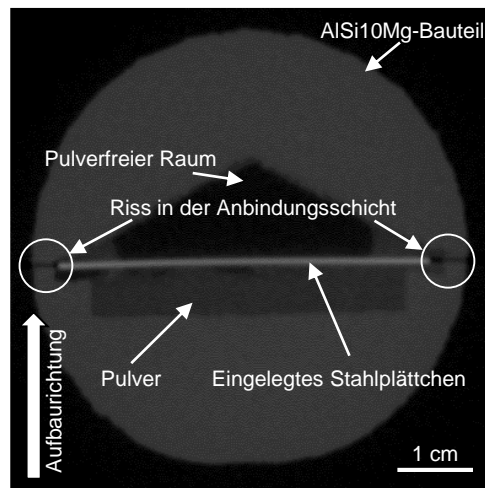


Abbildung 68: Aufgetretener Riss im Bauteil in Unterbrechungsschicht nach langer Unterbrechungszeit mit Verlust der Schutzgasatmosphäre (CT-Scan).

Maßnahmen zur Kompensation der Unterbrechung sind im In-Prozess, aber auch Post-Prozess (z. B. Reduktion von Poren durch anschließendes Sintern oder heißisostatisches Pressen) denkbar. Eine Kompensation im In-Prozess gilt es zu bevorzugen, um aufwendige nachfolgende Schritte vermeiden zu können. Im Folgenden ist eine Möglichkeit beschrieben, eine homogene Pulverschicht nach der Unterbrechung wiederherzustellen:

1) Pulverschicht:

a. Homogenität:

Durch die Kavität ist eine Leerstelle im Pulverbett entstanden, welche durch den Beschichter wieder mit Pulver aufgefüllt werden muss. Um den Prozess schnell weiterführen zu können, bietet es sich an, in einem Beschichtungsschritt wesentlich mehr Pulver zuzustellen als üblich (\gg Dosierfaktor). So kann die Anzahl der Beschichtungszyklen bis zur Baujobwiederaufnahme minimiert werden. Zur Erreichung einer optimalen Pulverschichthomogenität hat sich das folgende Vorgehen bewährt:

- i. Zustellen einer größeren Menge Pulver zum Auffüllen der Kavität und anderweitig abgesaugten Bereichen (\gg Dosierfaktor)
- ii. Homogenisierung der Pulveroberfläche: nach A) ist die Pulverschicht meist unregelmäßiger und unebener als üblich. Nun sollte ein geringerer Pulverdosierbetrag zugestellt werden (2-3x Dosierfaktor).

iii. Kompensation des Pulverbett-Federwegs: beim Auftrag von mehr Pulver als üblich (A) federt das Pulverbett im Dosierschacht nach unten weg und in den darauffolgenden Schichten wird sichtlich weniger (bis kein) Pulver zugestellt. Dies gilt es zu kompensieren durch 1-2 weitere Pulveraufträge, beim im Prozess standardmäßig verwendeten Dosierfaktor. Der selbige Effekt tritt auch bei längeren Prozessunterbrechungen auf. Das Pulverbett scheint in dieser Zeit abzusacken.

b. Schichtdicke:

Eine Abkühlung des Bauteils, wie in Unterabschnitt 5.2.6.1 beschrieben, kann im aktuellen Stand der Technik der Anlagensysteme nicht vermieden werden. Nach Möglichkeit kann daher der thermisch bedingte Bauteilschwund gemäß Formel (5-11) in Aufbaurichtung berechnet werden. Der ermittelte Betrag kann mit der Bauplattform nach oben gefahren werden, um den Unterschied zu kompensieren. Dies bietet sich vor allem bei Unterbrechungen an, welche bei einer großen Aufbauhöhe auftreten, da der prozentuale Schwindungseffekt bei steigender Bauteilhöhe in einem immer größeren Absolutwert resultiert (vgl. Abbildung 63).

Folgende weiteren Möglichkeiten der Kompensation sollen vorgestellt werden, konnten jedoch im Rahmen der eigenen Versuche nicht betrachtet werden:

2) Oxidation der Bauteiloberfläche:

Das Fortschreiten der Oxidation der Bauteiloberfläche ist abhängig von der Zeit welche das Bauteil Sauerstoff ausgesetzt ist und dem Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer. So bildet sich beispielsweise ein Oxidfilm auf einer Aluminiumoberfläche am stärksten innerhalb der ersten 250 s (JEURGENS ET AL. 2002). Daher bietet es sich neben der Verkürzung der Unterbrechungszeit an, während der Unterbrechung ein nochmals geringeres Sauerstoffniveau in der Kammer zu erzeugen (bspw. durch ein zusätzliches Fluten der Kammer während der Unterbrechungszeit mit Schutzgas). So kann das Risiko einer Schwachstelle des Bauteils in dieser Schicht, bedingt durch Oxidation, vermindert werden.

3) Anbindung an das Bauteil:

Zur verbesserten Anbindung und ggf. Überwindung einer gebildeten Oxidschicht kann ein Remelting der Wiederaufnahmeschicht sinnvoll sein, wie es auch STOLL ET AL. (2019) verwenden. Wie es in Abbildung 65 aber gezeigt werden konnte, kann ein Remelting auch negative Effekte auf Bauteileigenschaften bewirken.

4) Abkühlen des Bauteils:

Zur Minimierung des thermischen Schwunds im Bauteil ist im PBF-LB/M-Prozess allgemein der Erhalt einer gleichbleibenden Bauteiltemperatur wichtig. Dies kann aktuell durch eine von unten wirkende Bauplattformheizung nur eingeschränkt erreicht werden. Innovative Heizkonzepte von der Bauschachtseite oder der Prozesskammeroberseite könnten entsprechende Vorteile bringen (CAPRIO ET AL. 2018).

5) Thermische Veränderung der optischen Bank:

Gemäß LASKIN & VOLPP (2021) und BEAN ET AL. (2018) verändert sich die Temperatur in der optischen Bank und kann bei einer Prozessunterbrechung abkühlen. Dies hat eine thermische Veränderung der optischen Bank zur Folge und kann zu einer Verschiebung des Laserfokus führen, was sich wiederum in der Aufbaugüte widerspiegeln kann und einen Versatz im Bauteil erzeugt. Durch den Einsatz einer Opferkomponente, welche während der Unterbrechung zur Erhaltung der Optiktemperatur belichtet wird, ließe sich dieser Effekt möglicherweise eliminieren, da dann die Optik auch während der Prozessunterbrechung nicht abkühlt.

5.3 Partielle Validierung durch Dehnungsmessstreifen-Integration

Im Rahmen dieses Abschnitts sollen die gefundenen Konzepte für die Integration eines Dehnungsmessstreifens genutzt und erprobt werden. Im Vergleich zur strategischeren Validierung in Kapitel 7 liegt in diesem Abschnitt der Fokus auf technischen, anwendungsnahen und operativen Vorgängen. Hierfür wird ein anschweißbarer DMS des Typs LS 31 HAT (Werkstoff des anschweißbaren Metallplättchens: 1.4016) ausgewählt, welcher durch Schweißnähte mit dem Bauteil stoffschlüssig verbunden werden soll. Die Schweißnähte sollen durch das in der PBF-LB/M-Anlage verbaute Lasersystem erzeugt werden. In Anlehnung an Abschnitt 4.4 wird eine sensorspezifische Prozesskette für die Versuchsdurchführung aufgestellt (siehe Abbildung 69).

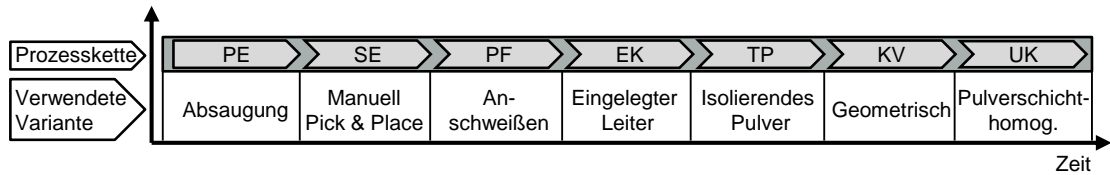


Abbildung 69: Spezifische Prozesskette für die Integration eines anschweißbaren DMS in einen Zugstab aus AlSi10Mg (SLM125HL).

Das Ziel dieses Abschnittes ist es eine stoffschlüssige Integration eines Dehnungsmessstreifens in einem Metallbauteil umzusetzen. In Abbildung 70 ist schematisch das Vorgehen dargestellt, um zwischen dem eingelegten DMS-Plättchen und dem AM-Bauteil mittels Lasersystem eine stoffschlüssige Verbindung erzeugen zu können. Die angestrebte favorisierte Lösung beinhaltet also das Anschweißen mittels Lasersystem, da dieses in PBF-LB/M-Anlagen standardmäßig vorhanden und gut zu automatisieren ist (vgl. auch Unterabschnitt 5.2.3.2).

In folgenden Abbildungen (Abbildung 70 und Abbildung 71) ist, gemäß BINDER ET AL. (2020c), ein abgeleitetes Vorgehen zur Umsetzung eines PBF-LB/M gefertigten Bauteils mit integriertem DMS dargelegt. Im Rahmen des Vorgehens wurden verschiedene Parameter variiert. Einerseits wurden als Anschweißkonzept einzelne Schweißnähte erprobt, eine umlaufende Naht sowie die Kombination aus beiden Alternativen. Andererseits wurde die Breite der Schweißnaht zwischen 0,4 und 0,8 mm und die Laserparameter in ihrer Belichtungsgeschwindigkeit (833 und 1250 mm/s) variiert, Remelting durchgeführt (1- bzw. 3-fach) und unterschiedliche Kavitätstiefen für den Dehnungsmessstreifen betrachtet (0,4 und 0,8 mm). Als ein weiterer wesentlicher Einfluss wurde die Belichtungsreihenfolge der einzelnen Schweißnähte systematisch verändert. Im Rahmen von drei Versuchsiterationen wurden Proben gefertigt und diese mittels Sichtkontrolle, der Festigkeit (Kraft) der stoffschlüssigen Anbindung und durch Schliffbilder bewertet (vgl. BINDER ET AL. (2020c)). Im Rahmen dieser Versuche kann eine Konfiguration gefunden werden (vgl. Abbildung 70), welche den Anforderungen bestmöglich genügt und eine zuverlässige stoffschlüssige Anbindung zwischen Bauteil und DMS gewährt.

Die Herausforderungen beim Anschweißen der DMS sind es, den DMS möglichst genau in der Unterbrechungsschicht einzulegen, um im bekannten Laserfokus das Anschweißen durchzuführen, aber gleichzeitig später nicht in den Eingriffsbereich des Beschichters zu geraten. In horizontaler Ebene gilt es genug seitlichen Platz in der Kavität zu lassen, um den Sensor zuverlässig einlegen zu können, aber andererseits den Abstand nicht zu weit zu wählen, da sonst die stoffschlüssige Anbindung zwischen Plättchen und Bauteil schwieriger umzusetzen ist.

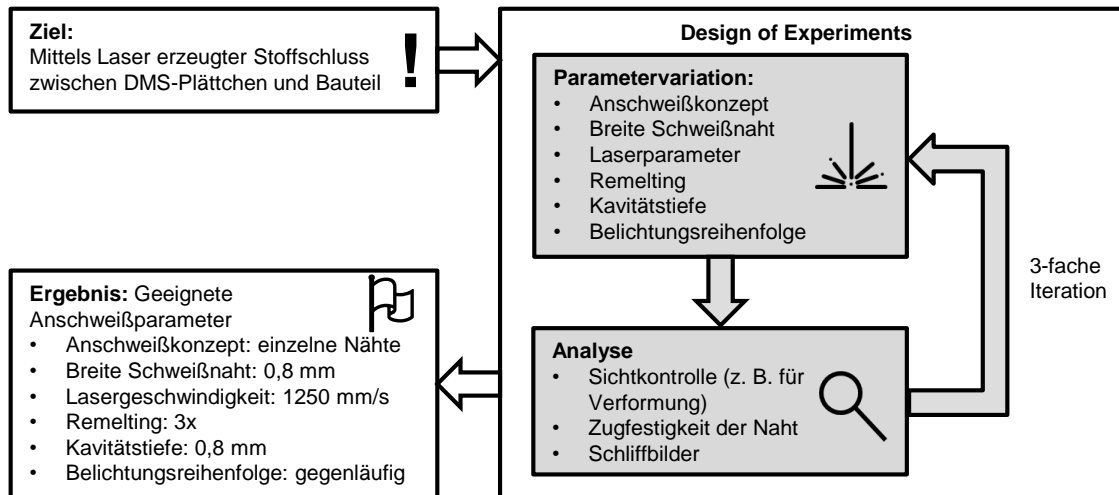


Abbildung 70: Vorgehen zur experimentellen Findung geeigneter Anschweißparameter zur Anbindung des DMS an das Bauteil.

In Abbildung 71 a) sind die Parameter und das prinzipielle Anschweißkonzept dargestellt. In a) ist das Konzept der einzelnen Nähte zusammen mit der gegenläufigen Belichtungsreihenfolge dargestellt. b) zeigt die eingelegten DMS in der Unterbrechungsschicht, c) den fertiggestellten und abgedrehten Zugstab, mit den nach links herausgeführten Kabeln.

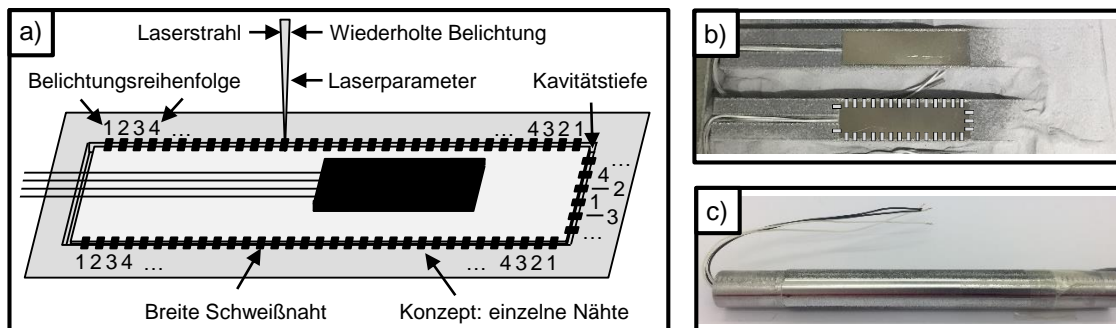


Abbildung 71: a) graphische Darstellung der Anschweißparameter; b) Integration des DMS während der Prozessunterbrechung, sowie fertiggestellter Zugstab c).

In Abbildung 72 a) ist die Anbindung des DMS im Schliff dargestellt. Durch die anschließende EDX-Analyse (b)) und den geätzten Schliff (c)) wird die Materialdurchmischung zwischen den Elementen Fe und Al gut ersichtlich. Teilweise liegen die beiden Materialbereiche noch getrennt vor, im Bereich der Schweißbahnen ist jedoch die Durchmischung gut zu erkennen.

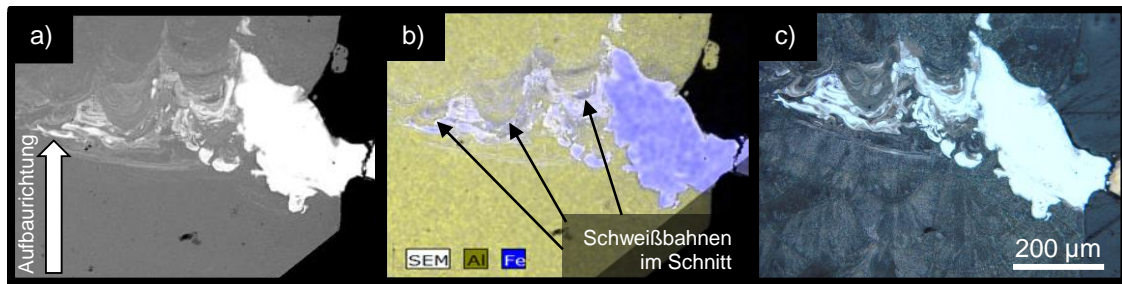


Abbildung 72: Analyse eines Schweißpunkts im Schliff: a) polierter Schliff im REM; b) EDX-Analyse; c) geätzter Schliff unter Auflichtmikroskop.

Auswertung

Die gemäß der Parameter aus Abbildung 70 gefertigten Zugstäbe wurden in einer Zugprüfmaschine getestet (vgl. Abbildung 73 a)). Die Belastung wurde so moderat gehalten, dass sich auftretende Verformungen ausschließlich im elastischen Bereich bewegen. So resultiert eine Gesamtlast von 15 kN auf den Zugstab in einem Dehnungsmittelwert von 0,165 % (St.-Abw.: 0,0005 %). In Abbildung 73 b) ist hierbei gut zu erkennen, dass sich die DMS-Daten auch bei mehrfacher Wiederholung gut reproduzieren lassen. In c) ist zudem gezeigt wie sich ein zyklisches Be- und Entlasten der Zugprüfmaschine von 15 kN auf den integrierten DMS auswirkt. Die Ausschläge der Kurven sind auch in diesem Falle gut miteinander vergleichbar. Eine Kalibrierung des DMS ist somit gut möglich, sodass durch die reine Kenntnis der DMS-Daten auf die außen anliegende Kraft geschlossen werden kann (z. B. 0,08 % DMS-Dehnung entspricht 7,5 kN).

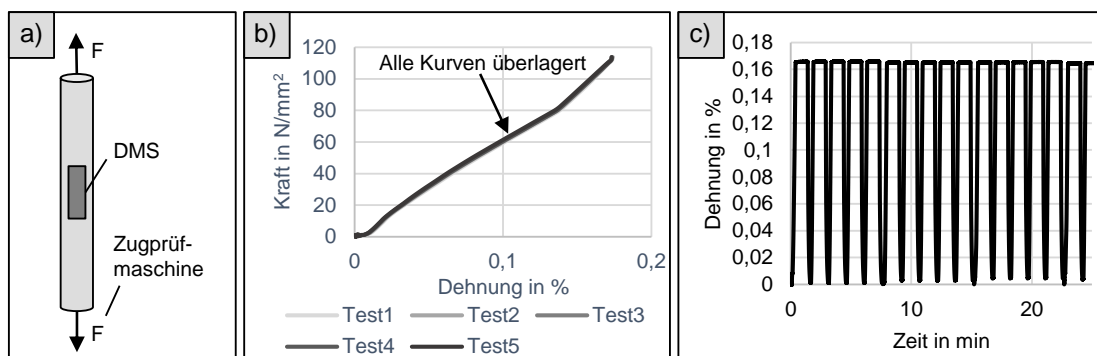


Abbildung 73: a) Zugprüfung der aufgebauten Zugstäbe mit integriertem DMS; b) Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der DMS-Ergebnisse (5 Wiederholungen); c) gemessene Dehnung bei zyklischer Be- und Entlastung des Zugstabs bis 15 kN.

Eine Schwierigkeit bei der Integration stellte das umständliche manuelle Kabelmanagement im Bauraum dar. Es bedarf viel Sorgfalt den Dehnungsmesstreifen sowie die mit Vorverformungen behafteten Kabel so im Bauteil zu orientieren,

dass alle Komponententeile an ihrer vorgesehenen Position liegen. Weitere Herausforderungen bei der Integration von DMS können Anhang A7 entnommen werden.

5.4 Fazit

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die Grundlagen und relevanten Einflussgrößen einer Sensorintegration beim PBF-LB/M-Prozess ermittelt und spezifische Lösungskonzepte in Anlehnung an einen morphologischen Kasten vorgestellt sowie detailliert evaluiert. Es konnten für alle sieben Schritte der allgemeinen Sensorintegrations-Prozesskette Analysen und Lösungsvorschläge vorgestellt werden. Zudem wurde der Einfluss von Prozessunterbrechungen diskutiert. Anschließend wurde das Vorgehen durch die Fertigung von Zugstäben mit integrierten Dehnungsmessstreifen validiert.

Durch die vorgestellte Möglichkeit der Fertigung von Leiterbahnen im Monomaterial-PBF-LB/M-Prozess konnte ein Werkzeug vorgestellt werden, durch welches Sensoren flexibler und uneingeschränkter integriert werden können. Kombiniert mit einem Prozess zur Multi-Materialverarbeitung (MMAM) können durch das Verfahren zukünftig auch Sensoren direkt im Bauteil gefertigt werden. Des Weiteren bietet die Kontaktierung mittels Lasersystem einen einfachen und zuverlässigen Weg der elektrischen Kontaktierung. Mit Hilfe der vorgestellten Möglichkeiten des Pulver- und Temperaturschutzes ist eine zuverlässige Integration von Sensoren möglich, ohne Schäden an den Komponenten erwarten zu müssen. Im Bereich der Prozessunterbrechungen sollten jedoch noch weitere Untersuchungen zu den zulässigen Grenzen durchgeführt werden. Es können zwar wesentliche Einflüsse theoretisch und experimentell aufgezeigt werden, allerdings fehlt noch eine gesamtheitliche werkstoffübergreifende Betrachtung, welche kritische Unterbrechungen von unkritischen eindeutig differenzieren kann.

Im Verlauf der durchgeführten Experimente in Kapitel 5 kommt es zu diversen Fehlerbildern im Prozess. Diese Erfahrungen sind im Anhang A6 in Form eines Fehlerkatalogs inklusive deren Ursache dokumentiert.

6 Automatisierung der Sensorintegration

Wie in Abschnitt 1.5 dargelegt, werden in Kapitel 6 der Ablauf der Prozesskette aus Kapitel 4 und die verifizierten manuellen Prozessschritte aus Kapitel 5 automatisiert. Hierzu müssen zu Beginn Anforderungen und Rahmenbedingungen der Automatisierung gesammelt werden (Abschnitt 6.1), bevor die Validierung des Vorgehens zum Systemaufbau durch die Umsetzung des Handhabungssystems (Abschnitt 6.2) durchgeführt werden kann. Die Fähigkeit des Systems wird im darauffolgenden Abschnitt 6.3 durch die Prozessvalidierung bestätigt (vgl. Abbildung 74).

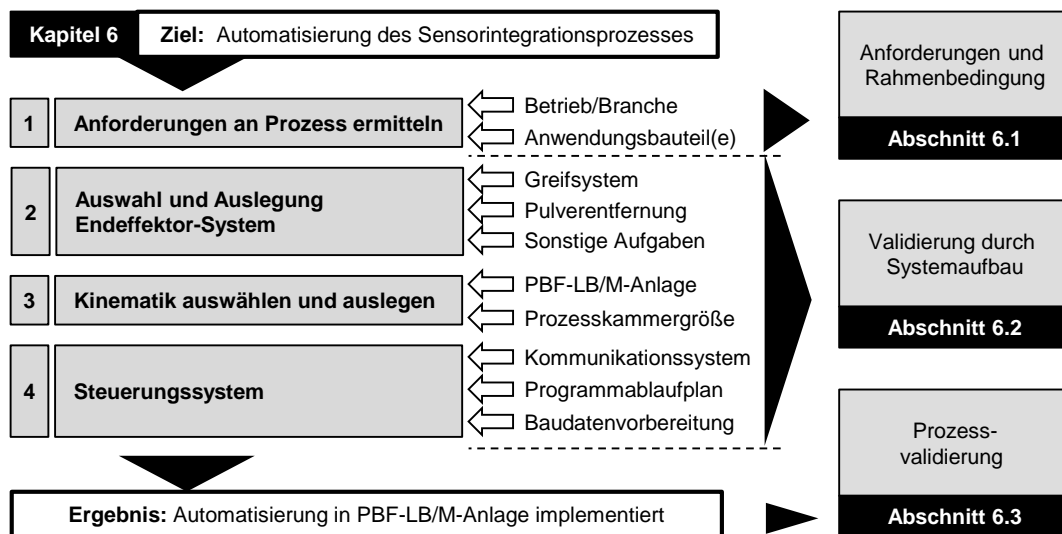


Abbildung 74: Ziel und methodisches Vorgehen in Kapitel 6.

In Abbildung 75 ist das Zielbild der automatisierten Sensorintegration im Prozessablauf der allgemeinen Fertigungsprozesskette (vgl. Abschnitt 4.2) dargestellt und steht im Kontrast zum aus dem Stand der Technik bekannten händischen Einlegeprozess (Abbildung 19). Das in Abbildung 75 gezeigte Vorgehen wird im Rahmen dieses Kapitels systemisch aufgebaut und der Automatisierungsprozess validiert.

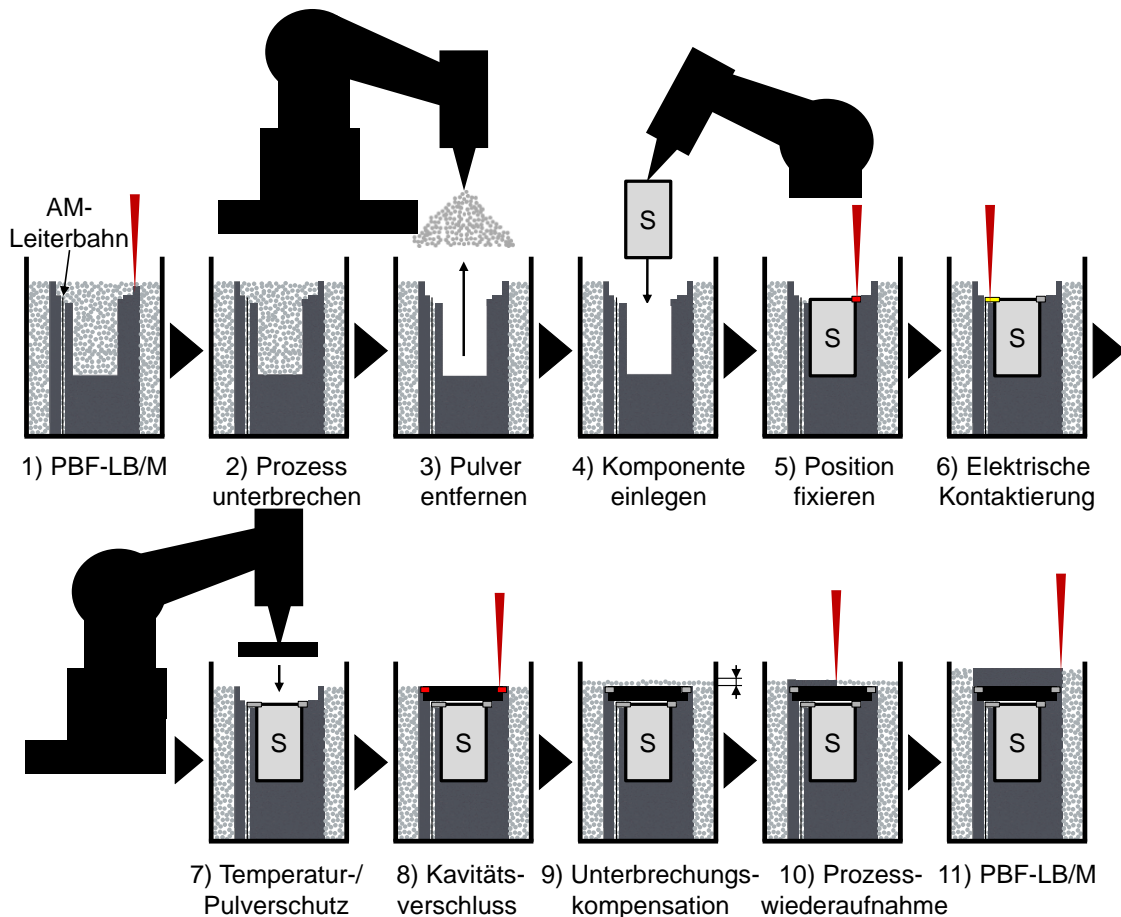


Abbildung 75: Schematische Darstellung der allgemeinen Fertigungsprozesskette zur automatisierten Sensorintegration ($S = \text{Sensor}$).

6.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden wesentliche Anforderungen an eine Automationseinheit in einer PBF-LB/M-Anlage gelistet.

Anforderungen an das Gesamtsystem

Die Schutzgasführung darf nicht gestört werden, sonst werden Prozessspritzer und Schmauch nicht mehr richtig abgetragen und es droht eine Erhöhung der Materialporosität. Zudem muss die Schutzgasatmosphäre erhalten bleiben, sodass nach der Unterbrechung eine schnelle Prozesswiederaufnahme gewährleistet ist (vgl. Abschnitt 5.2.4). Arbeiten mit Druckluft in der Prozesskammer sollten idealerweise substituiert werden durch Verwendung von Schutzgas.

Um sicherzustellen, dass die für einen Kinematikaufbau verwendeten Materialien den Temperaturen in einer PBF-LB/M-Kammer standhalten können, müssen die auftretenden Prozesstemperaturen berücksichtigt werden. In der Prozesskammer

von PBF-LB/M-Anlagen herrschen lokal im Schmelzbad hohe Temperaturen vor. In der Prozesskammer treten hingegen wesentlich niedrigere Temperaturen auf, die höchsten Werte wurden vor allem in der Nähe einer vorgeheizten Bauplattform gemessen (vgl. Abbildung 57). Dennoch kann gemäß der Bauraummessungen in der Prozesskammer von einer maximalen Temperatur von ~ 61 °C ausgegangen werden, sodass der Einsatz der meisten Kunststoffe möglich ist, ohne thermisch induzierte Deformationen erwarten zu müssen.

Das Metallpulver beim PBF-LB/M ist meist hochpreisig, ggf. abrasiv, sollte nicht durch fremdes Material kontaminiert werden und ist nach einem Bauprozess als dünne Partikelschicht überall in einer Prozesskammer vorzufinden. Daher ist es wichtig, dass die zusätzlich in einer Prozesskammer verbauten Komponenten einerseits der Interaktion mit dem Pulver standhalten können und es andererseits für die Wiederaufbereitung weder kontaminieren noch anderweitig in seiner Qualität negativ beeinflussen.

Eine Automationseinheit muss einen Sensor handhaben und alle erforderlichen Schritte einer Sensorintegration durchführen können. Die Automatisierungsabläufe und die Auslegung des Handhabungssystems werden wesentlich durch die aufgestellte Fertigungsprozesskette beeinflusst. So muss die Kinematik in der Lage sein, Sensoren aus einem Magazin zu greifen, zu bewegen und an definierter Stelle fest in das Bauteil zu integrieren.

Die Steuerung der Kinematik muss mit der PBF-LB/M-Anlagensteuerung Informationen von Anweisungen und Quittierungen austauschen können, um einen automatisierten Eingriff in der richtigen zeitlichen und inhaltlichen Abfolge sicherstellen zu können. Die Dimensionierung der Kinematik muss so gestaltet werden, dass alle Bereiche des Bauschachts mit den Manipulatoren angefahren werden können. Des Weiteren muss die Kinematik in der Prozesskammer Platz finden können, ohne die bestehenden Komponenten, wie bspw. die Schutzgasströmung oder auch den Strahlengang des Lasers negativ zu beeinflussen. Die Verfahrbewegungen der Kinematik müssen im Einklang mit den bisher verbauten Komponenten innerhalb der Anlagentechnik stehen. Hierbei ist vor allem auf die Pulverzuführung, den Bauschacht, den Überlaufschacht, die Schutzgasführung und den Strahlengang des Lasers zu achten. Bei der automatisierten Sensorintegration muss sichergestellt werden, dass die zu integrierenden Sensoren korrekt in die Kavität eingelegt werden, da ansonsten der Abbruch des gesamten Fertigungsprozesses droht. Der Sensoreinlegeprozess ist jedoch mit Toleranzen behaftet, welche es einerseits zu berücksichtigen und

andererseits zu minimieren gilt. Folgende Eigenschaften beeinflussen die Integrationspräzision:

- 1) Fertigungstoleranz des Sensors
- 2) Positioniergenauigkeit bei der Sensorbereitstellung
- 3) Anfahrgenauigkeit der Kinematik (Magazin)
- 4) Positionierungsversatz durch Sensoraufnahme (Magazin)
- 5) Anfahrgenauigkeit der Kinematik (Kavität)
- 6) Positionierungsversatz durch Sensorablage (Kavität)
- 7) PBF-LB/M-Fertigungsüber- und -untermaß

Anforderungen an Endeffektoren

Bei der Auswahl eines geeigneten Endeffektors (hier: Greifer) sollen die folgenden Anforderungen beachtet werden:

- **Temperaturresistenz:** Die Bauteiltemperatur kann bis zu 180 °C betragen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Der verwendete Greifer muss diese Temperatur unbeschadet überstehen können.
- **Größe:** Der Manipulator darf in seiner Geometrie den PBF-LB/M-Prozess nicht negativ beeinflussen.
- **Greifbares Gewicht:** Das Handhabungssystem muss das Sensorgewicht problemlos anheben können (vgl. Sensorauswahl aus Abschnitt 4.3).
- **Flexibilität:** Der Greifer muss in der Lage sein alle zu integrierenden Sensorarten aufheben und einlegen zu können (vgl. Sensorauswahl aus Abschnitt 4.3).
- **Greifereinfluss:** Der bewegte Sensor darf nicht verformt oder anderweitig geschädigt werden.
- **Präzision:** Das System muss in der Lage sein einen Sensor in einer engen Kavität zu platzieren.

6.2 Validierung durch Systemaufbau

Im Rahmen der Umsetzung des Handhabungssystems sollen die Versuchsergebnisse aus Kapitel 5 bestmöglich in der automatisierten Sensorintegrationseinheit implementiert und berücksichtigt werden können.

6.2.1 Auswahl und Auslegung Endeffektor-System

Zu Beginn sollen die Manipulatorentaufgaben nach VDI 2860 strukturiert werden. Der Ordnungszustand (OZ) des Systems ist durch den Quotienten Orientierungsgrad (OG) und Positionierungsgrad (PG) bestimmt (VDI 2860 1990):

$$OZ = OG/PG = 3/3 \quad (6-1)$$

Mit dem Ordnungszustand 3/3 ist das System völlig geordnet. Dies ist der Fall, da die Orientierung des zu platzierenden Sensors in allen drei Rotationsachsen bestimmt ist (3) und sich der Ursprung des körpereigenen Koordinatensystems an einem bestimmten Punkt befindet (3).

Gemäß VDI 2860 wird die Funktionsfolge für den Pulver- und Sensorfluss geplant und ausgelegt (vgl. Abbildung 76). Das Pulver aus der Kavität im Pulverbett wird abgesaugt und damit vom Rest des Pulverbetts geteilt. Anschließend wird das Pulver durch die Absaugung in einen Pulverbehälter gefördert und dort gespeichert. Im Anschluss daran wird ein Sensor aus seinem Magazin entnommen und an die Position der Kavität gefahren. Dort wird er abgelegt und fixiert.

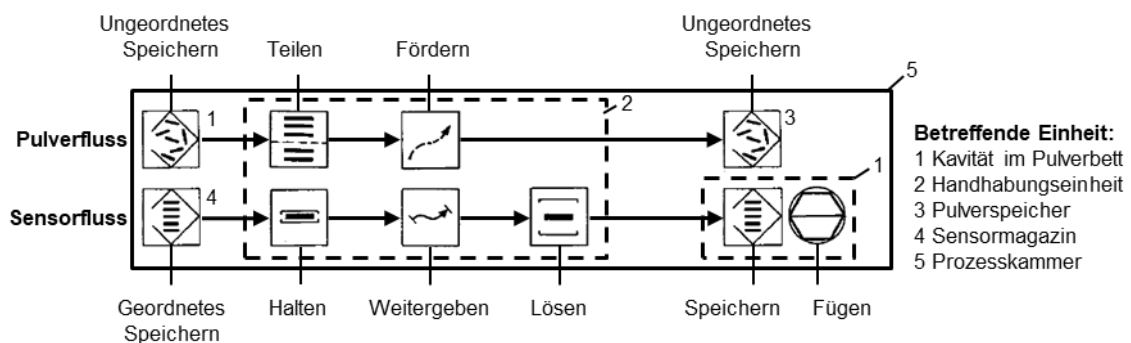


Abbildung 76: Funktionsfolge des Sensorintegrationsprozesses nach VDI 2860 für den Pulver- und Sensorfluss.

Auslegung der Endeffektoren (Greifer und Pulverabsaugung):

In diesem Unterabschnitt soll eine Greifkomponente ausgewählt werden. Die Anforderungen werden durch einen paarweisen Vergleich gewichtet. Anschließend werden mechanische, pneumatische, elektromagnetische und formschließende Greifer ausgewählt und anhand der Anforderungen gegeneinander evaluiert (vgl. Anhang A5, Tabelle 39). Anhand dieser Bewertung können Sauggreifer als die den Anforderungen am besten entsprechenden Endeffektoren ausgewählt werden.

Ausgelegt auf die einzulegenden Sensoren wird ein Sauggreifer dimensioniert. In diesem Beispiel wird der Sauggreifer für kleine Sensoren bis $m = 6 \text{ g}$ ausgelegt, wie es zum Beispiel beim verwendeten Pt100 Temperatursensor der Fall ist ($m = 1,5 \text{ g}$). Unter der Annahme einer maximalen kinematischen Beschleunigung a von 5 m/s^2 , horizontaler Bauteilaufnahme und horizontaler Verschiebung, einem Sicherheitsfaktor S von 1,5 und einem vorherrschenden Reibungskoeffizient von $\mu = 0,5$, ergeben sich folgende Werte ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) für die Lastfälle der Horizontalkraft F_H und Vertikalkraft F_V :

$$F_H = m * (g + a) * S = 0,133 \text{ N} \quad (6-2)$$

$$F_V = m * \left(g + \frac{a}{\mu}\right) * S = 0,178 \text{ N} \quad (6-3)$$

Das für die Reinigung der Kavität konzipierte, inertgasbetriebene Vakuumsystem (vgl. Abbildung 33) soll nun auch für die Funktion des Sauggreifers genutzt werden und bei Bedarf über ein Magnetventil aktiviert werden können (Umgebungsdruck $p_s = 1,05 \text{ bar}$, Unterdruck $p_{neg} = 0,35 \text{ bar}$). Es wird ein kleiner Sauggreifer gewählt, dessen Greiffläche A sich durch eine runde Saugfläche mit 2 mm Durchmesser berechnen lässt. Mit üblichen Annahmen zu Wirkungsgrad η der Saugdüse und dem Verformungskoeffizient k des Kunststoffgreifers, werden die Faktoren wie folgt abgeschätzt: $\eta = 0,9$; $k = 0,95$. Die Saugkraft F_G kann somit wie folgt abgeschätzt werden:

$$F_G = (p_s - p_{neg}) * A * \eta * k = 0,188 \text{ N} \quad (6-4)$$

Da damit $F_G > F_V$ und $F_G > F_H$, besitzt der Greifer ausreichend Kraft um die Handhabungsaufgaben durchführen zu können (vgl. BINDER ET AL. (2020d)).

Reduktion des Einflusses auf die Schutzgasströmung

Als Saugdüse soll, wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, eine Aufsetzdüse verwendet werden. Zur Absaugung des Pulvers im Prozess und zur Ausübung der Pick&Place-Vorgänge wird aufgrund der gewählten Prinzipien jeweils ein pneumatisches System benötigt. Der Betrieb derartiger Komponenten läuft üblicherweise mit (Druck-)Luft, soll aber im Rahmen dieser Arbeit durch die Nutzung von Argon substituiert werden. Dieses liegt auch mit Überdruck in einem Gastank vor. Dadurch soll die Schutzgasatmosphäre auch während dem Betrieb der Kinematik erhalten bleiben. So wird, wie im Schema in Abbildung 77 gezeigt, ein pneumatisches System aufgebaut. Die Argonversorgung wird in dem System auf 5 bar gedrosselt, bevor diese mit einer Verschlauchung in die Prozesskammer geführt wird. Dort wird die Versorgung durch zwei 2/2-Wegeventile in zwei Stränge aufgeteilt,

in welchen jeweils eine Venturidüse aus dem Überdruck einen Unterdruck erzeugt. An den Unterdruckerzeugern können nun die jeweiligen Manipulatoren angeschlossen werden, wobei im Falle der Saugdüse eine Pulverabscheidung notwendig wird. Diese wird in eine Pulvergrobabscheidung (Zyklonabscheider) und einen Feinfilter aufgeteilt, um den Pulverfluss im gesamten System kontrollieren zu können.

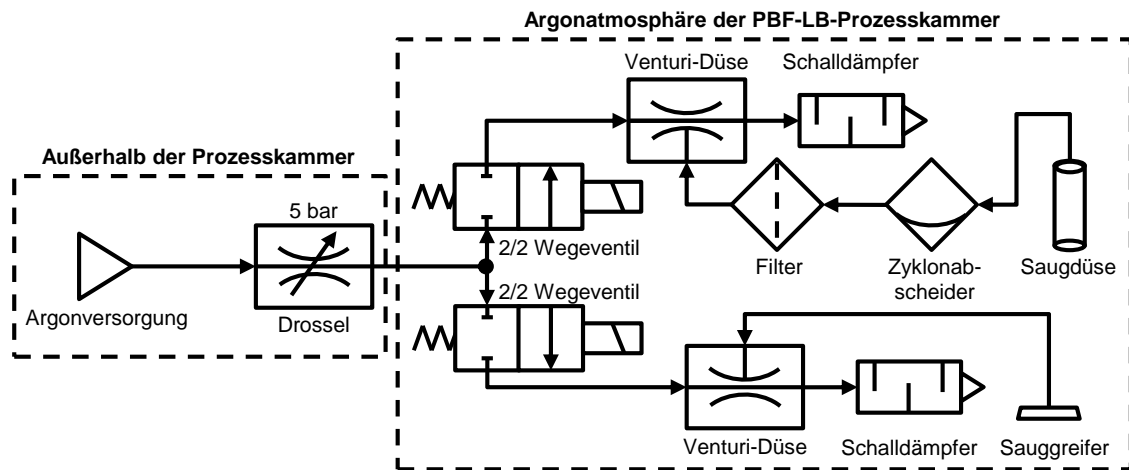


Abbildung 77: Pneumatisches Schaltbild der Absaugvorrichtung und des Pick&Place-Mechanismus gemäß DIN ISO 1219-1 (BINDER ET AL. 2018b).

6.2.2 Konfiguration der Kinematik

Die Kinematik soll in eine PBF-LB/M-Anlage des Typs AconityOne implementiert werden. Der Beschichter der AconityOne füllt in y-z-Richtung die gesamte Breite und Höhe der Prozesskammer aus (vgl. Abbildung 78 und Abbildung 118 (Anhang)), sodass an den Seitenrändern ein freier Raum von ca. 40 mm verbleibt. An den linken und rechten Außenseiten (x-Richtung) bestehen, unter Berücksichtigung des Verfahrenswegs des Beschichters, ca. 10 cm ungenutzter Bereich. Die Anlage soll zudem in ihren Grundfunktionen so wenig wie möglich verändert werden. Der verfügbare Platz ist bei einer maximalen Prozesskammerhöhe von 199 mm somit nicht ausreichend für ein konventionelles, stationäres Robotersystem, welches in den Seitenbereichen befestigt ist, die Schutzgasströmung nicht negativ beeinflusst und die nötigen Reichweiten aufweist. Daher soll das Beschichtersystem genutzt und durch weitere translatorische Achsen erweitert werden, um damit einen Portalroboter zu bilden. Hierdurch entstehen Vorteile, weil die Kinematik in der gesamten Baukammer verfahren kann. Herausfordernd ist jedoch die hohe Komplexität der Ansteuerung, da zwei Steuereinheiten (Anlagensteuerung und externe Steuerung) für die Bewegungsabläufe des Portalroboters genutzt werden müssen.

Als Handhabungseinheit soll somit eine serielle Kinematik (offene kinematische Kette) aufgebaut werden. Der Portalroboter soll vier translatorische Gelenke, also somit vier Freiheitsgrade, besitzen, die sich in Freiheitsgrade in x-, y- und z-Richtung (2x) aufteilen. Zwei Achsen in vertikaler Orientierung werden benötigt, um die Manipulatoraufgaben der Pulverentfernung und des Pick&Place-Vorgangs abbilden zu können.

In Abbildung 78 ist der realisierte Aufbau in der Prozesskammer der AconityOne dargestellt. Wie schematisch zu sehen, wird gemäß HESSE (2013) ein Palettenmagazin als Sensorspeicher in der Prozesskammer verwendet.

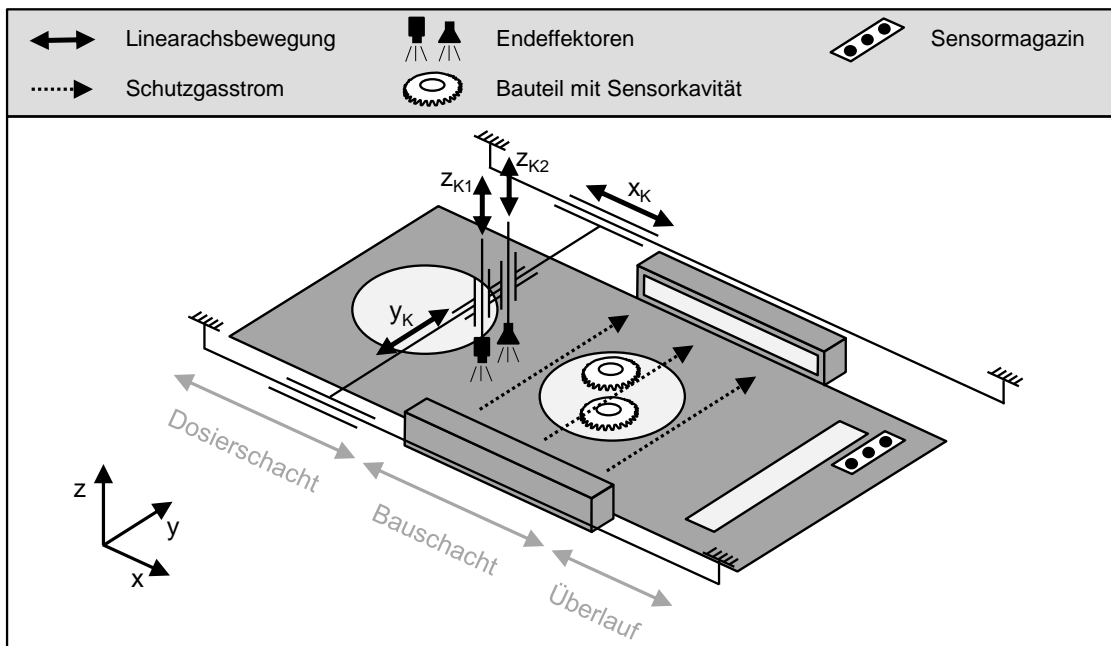


Abbildung 78: Schematische Ansicht des Handhabungssystems, welche in eine PBF-LB/M-Anlage des Typs AconityOne implementiert worden ist.

Im nächsten Schritt wurden die zusätzlichen Achsen sowie das pneumatische System auf dem Beschichter der Anlage verbaut. In Abbildung 79 ist der Hardwareaufbau der Kinematik innerhalb der Prozesskammer zu erkennen. Der Sauggreifer (z_{K1}), sowie die Absaugdüse (z_{K2}) sitzen nebeneinander auf ihren vertikalen Achsen, welche wiederum auf der y-Achse der Kinematik (y_K) verbaut sind. Bei dem Aufbau war es wichtig darauf zu achten, dass die Verschlauchung, aber auch die Verkabelung bei Bewegung der gesamten Kinematik sich nicht selbst hemmen oder einschränken. Wird dies nicht gewährleistet besteht aufgrund des eingeschränkt verfügbaren Platzes die Gefahr, dass Teile des Systems beschädigt werden. Weitere Abbildungen der Kinematik sowie eine Auflistung der verbauten Achsen sind in Abbildung 118 (Anhang A5) zu finden.

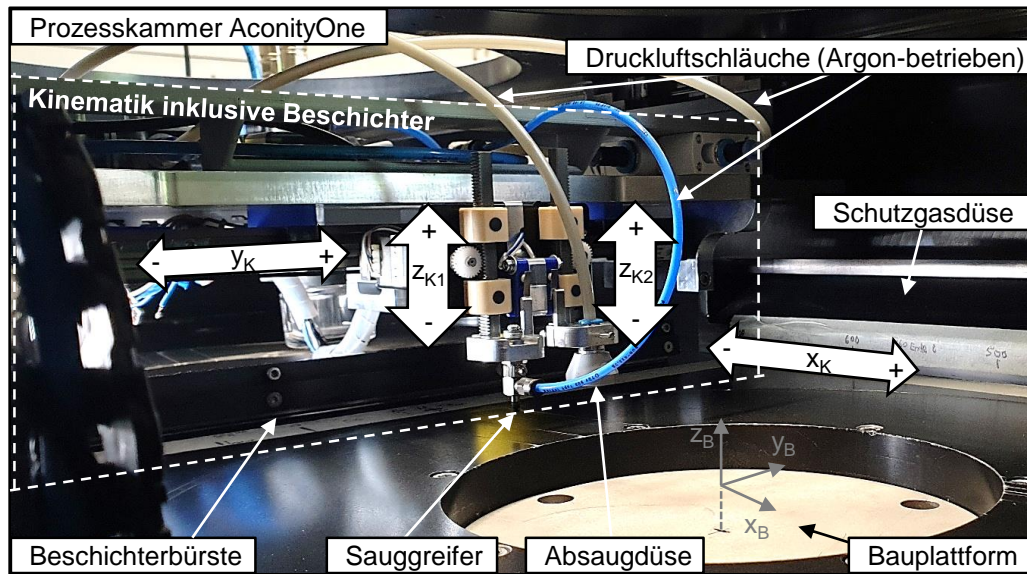


Abbildung 79: Auf Beschichter montierte Kinematik in der Prozesskammer einer AconityOne.

Nach VDI 2861 kann der Bewegungsraum einer Kinematik in Arbeits- und Kollisionsbereiche unterteilt werden. Diese Bereiche werden sinngemäß wie folgt definiert (vgl. Abbildung 80):

Arbeitsbereich: Von beiden Endeffektoren erreichbarer Raum innerhalb der Prozesskammer.

Eingeschränkter Arbeitsbereich: Von mindestens einem Endeffektor anfahrbarer Raum innerhalb der Prozesskammer. Durch die Positionierung zweier Manipulatoren auf einer Achse gelten für die Enden der beiden z-Achsen unterschiedliche Bewegungslimitationen.

Kollisionsbereich: Bereiche, in welchen die Kinematik mit der Prozesskammer kollidieren kann. Diese Bereiche sind in diesem Umsetzungsszenario ausschließlich in der z-Ebene zu finden. Diese Kollisionen können durch logische Verriegelungen umgangen werden. Wenn vor jeder Kinematikbewegung in x-y-Richtung die richtige Positionierung der Effektoren in z-Richtung sichergestellt wird, können die kritischen Kollisionen (Effektor im negativen z_K -Bereich mit anschließender Bewegung in x-y-Richtung) vermieden werden.

In der PBF-LB/M-Anlage müssen mehrere verschiedene Koordinatensysteme miteinander verknüpft werden, um eine einfache und reproduzierbare Anfahrbarkeit verschiedener Koordinaten sicherstellen zu können:

- Koordinatensystem der AconityOne (Abkürzung A): Notation, welche durch den Anlagenhersteller festgelegt und nicht veränderbar ist. Die Achsbewegungen von Beschichter, sowie von Dosierplattform und Bauplattform werden nach dieser Konvention bewegt.
- Koordinatensystem der (Bau-)Plattform (Abkürzung P): Das System hat seinen Ursprung im Zentrum der runden Bauplattform. Bauteile werden in Bezug auf dieses positioniert und Belichtungsvektoren festgelegt.
- Koordinatensystem der gefertigten Bauteile (Abkürzung B): Durch die CAD-Daten der zu fertigenden Bauteile besitzt jede Komponente ein eigenes Koordinatensystem. Die Bauteile werden in Relation zum Plattformkoordinatensystem (P) positioniert. Die Koordinaten der Sensorkavitäten werden in diesem Koordinatensystem ausgedrückt.
- Koordinatensystem der nachträglich integrierten Kinematik (Abkürzung K): die Kinematik hat im Vergleich zur Laserstrahlschmelzanlage eine andere Ausrichtung von x- und z-Richtung. Die Bewegung der Kinematik in x-Richtung wird aufgrund der Befestigung auf dem Beschichter dennoch durch die Laserstrahlschmelzanlage selbst durchgeführt.

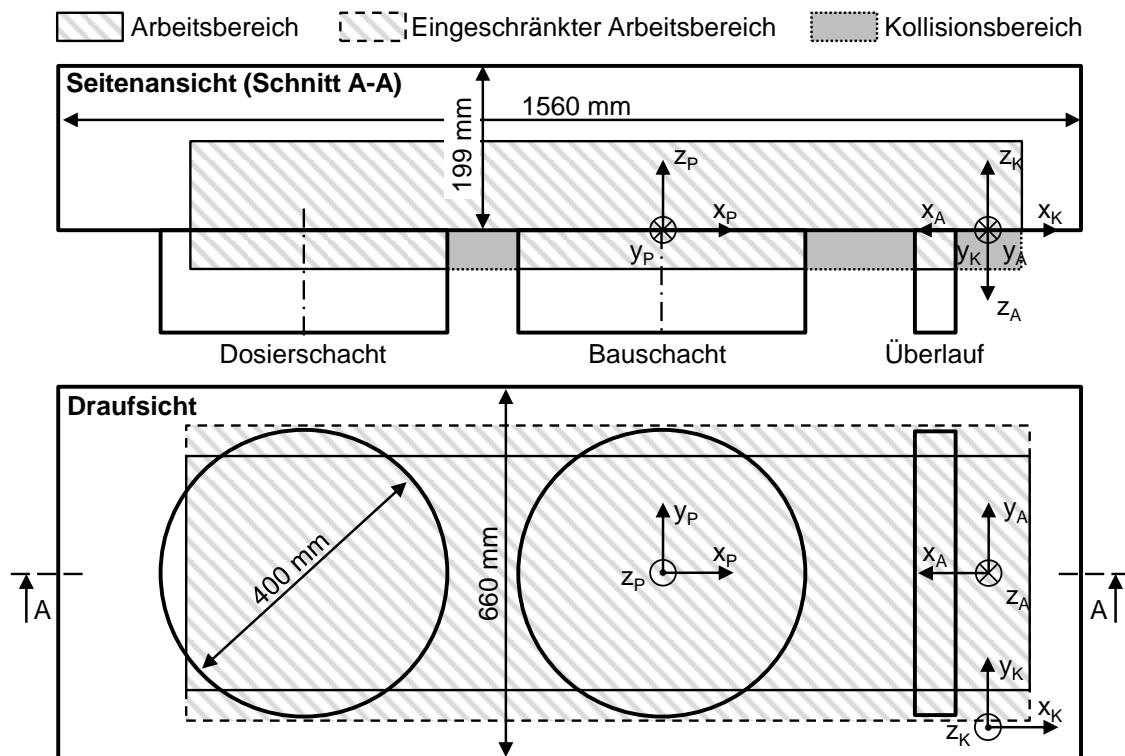


Abbildung 80: Arbeits- und Kollisionsbereiche der Kinematik innerhalb der AconityOne

- Koordinatensystem Sensorspeicher (Abkürzung S): Ähnlich wie die Bauteile, besitzt der Sensorspeicher ein eigenes Koordinatensystem. Die eingelagerten Sensoren entsprechen Koordinaten in diesem System.

Zur vereinfachten Erstellung von Baujobs wurde eine Softwarelösung erarbeitet, welches die verschiedenen Koordinatensysteme miteinander verknüpft und transformiert (vgl. Anhang A5, Abbildung 120). Durch das System kann der Bediener, ausgehend von der Positionierung eines zu fertigenden Bauteils, alle für die automatisierte Integration benötigten Koordinaten herauslesen und in die Prozessabfolge der Kinematik überführen.

6.2.3 Steuerungssystem

Gemäß BINDER ET AL. (2018a) gibt es drei verschiedene Level, um die Steuerung der Kinematik mit der der PBF-LB/M-Anlage zu verbinden:

- 1) **Seriell:** Kommunikation über digitale Inputs und Outputs (zwei SPS)
- 2) **Parallel:** Kommunikation via Feldbus (zwei SPS)
- 3) **Integriert:** Betrieb über eine Steuerung (eine SPS)

Da die Fälle 2) und 3) nicht umgesetzt werden können, ohne die Anlagensteuerung massiv modifizieren zu müssen, wird sich im Rahmen dieser Arbeit auf die Umsetzung von Variante 1) konzentriert. Hierfür werden freie Inputs und Outputs an der Anlagensteuerung genutzt, um Signale zwischen den beiden Systemen auszutauschen (vergleiche Abbildung 81).

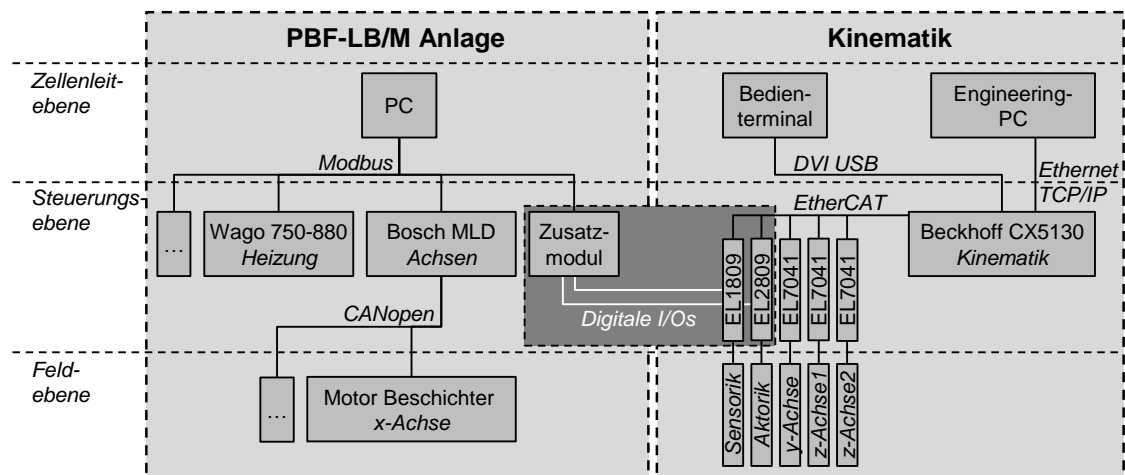


Abbildung 81: Kommunikationssystem zwischen PBF-LB/M-Anlage und Kinematik.

Im Falle einer industriellen Umsetzung des Kinematikkonzepts sind die Varianten 2 und 3 jedoch klar zu bevorzugen. In Abbildung 81 sind das umgesetzte Kommunikationssystem und die verwendeten Komponenten schematisch dargestellt.

Für den Start eines Bauprozesses inklusive automatisierter Sensorintegration wurde die Kinematik, wie in Abbildung 79 zu sehen, in der AconityOne platziert. Anschließend wurden die Koordinaten der Sensoren im Magazin sowie die Positionen der Kavitäten im Prozessablauf vorgesehen (vgl. Abbildung 82). Für eine erfolgreiche Integration ist es nötig, auch die Informationen zur Integrations-schichtebene in den Systemen zu hinterlegen. Im nächsten Schritt kann der Ablaufprozess der Kinematik gestartet werden, sodass diese in einen Wartemodus übergeht, in welchem sie auf ein Startsignal der PBF-LB/M-Anlage wartet (vgl. Abbildung 82). Wenn nun der Bauprozess an der AM-Anlage gestartet wird, ist die Kinematik jederzeit bereit für einen Integrationsprozess. Der Bauprozess wurde nun an der Anlage gestartet und baut, wie in einem konventionellen Prozess, Schicht-für Schicht die Bauteile auf. Das ablaufende Maschinenprogramm der AconityOne wurde im Vorfeld so modifiziert, dass die Anlage jede Schicht prüft, inwieweit eine Unterbrechungsschicht vorliegt. Sobald eine solche Schicht erreicht wird, stoppt der Bauprozess und der automatisierte Integrationsprozess beginnt (vgl. Abbildung 82). Aufgrund der Montage der Achsen auf dem Beschichter wird für die Sensorintegration stets zwischen Kinematik und PBF-LB/M-Anlage kommuniziert (Handshakes). So werden die x-Koordinaten zum jeweiligen Zeitpunkt durch die PBF-LB/M-Anlage angefahren, y- und z-Koordinaten hingegen durch die Kinematiksteuerung. Nach dem Erreichen der Unterbrechungsschicht fährt der Beschichter also die erste relevante Kavität an und übergibt der Kinematik ein Startsignal. Die Handhabungseinheit weiß damit, dass der Pulverabsaugprozess beginnen kann und fährt in y- und z-Richtung die erste Kavität an, um diese zu reinigen. Alle weiteren Einzelschritte zwischen Kinematik und Anlage erfolgen wie in Abbildung 82 dargestellt. Ist es nötig mehrere Sensoren in einer Schicht oder auch in verschiedenen Ebenen zu integrieren, ist dies, entsprechend Abbildung 82, ebenso realisierbar. Für den Betrieb der Kinematik wird zuerst der Programmablauf der Kinematik gestartet, anschließend der der PBF-LB/M-Anlage.

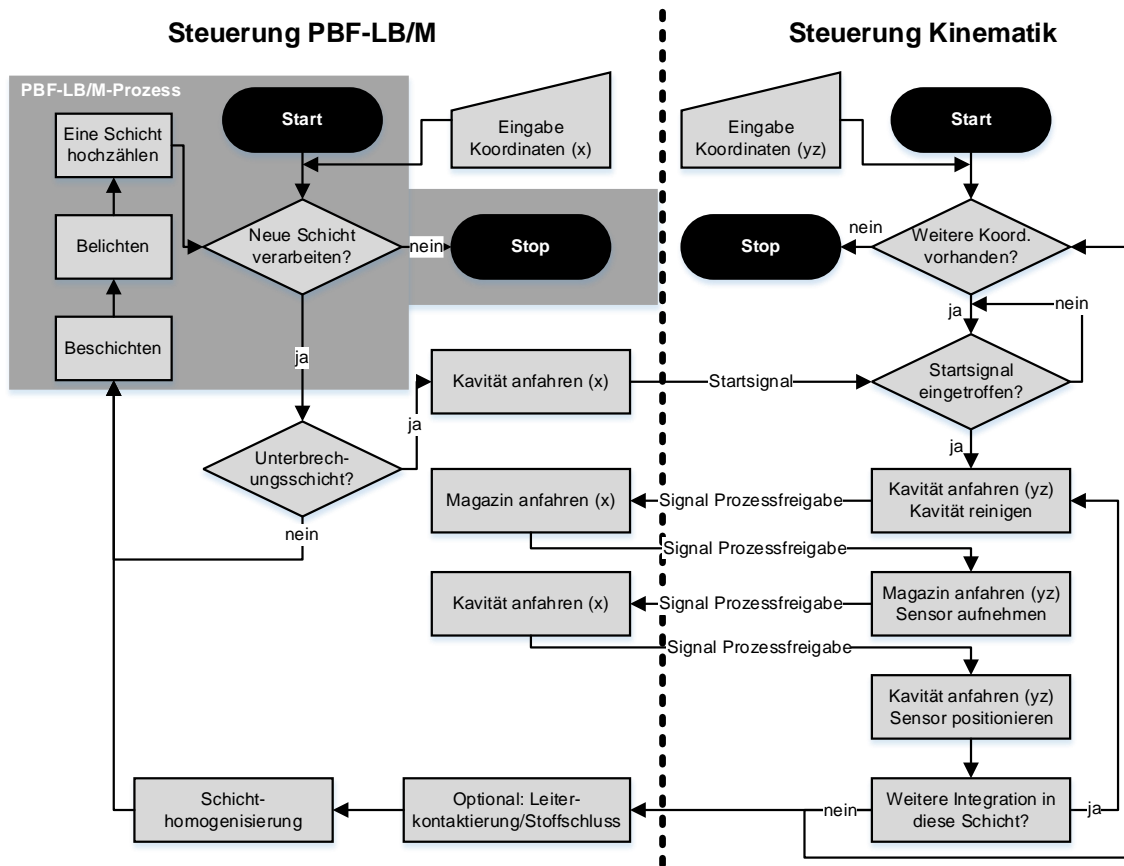


Abbildung 82: Theoretischer Ablauf zur automatisierten Sensorintegration (Programmablaufplan gemäß DIN 66001).

Durch den vorgestellten Ablaufplan wird klar, dass die Achsen seriell und nicht gleichzeitig bewegt werden (vgl. Anhang A5, Abbildung 119,). Durch die Kommunikation der Steuerungseinheiten untereinander kann es für die Erreichung einer jeweiligen x-y-z-Koordinate zu einer Verzögerung im Sekundenbereich kommen. In dieser Zeit übergibt die Steuerung der einen SPS die Freigabe an die andere und versetzt sich selbst in einen Wartemodus.

6.3 Prozessvalidierung

Im Folgenden soll das konzeptionierte System zur automatisierten Fertigung von sensorintegrierten Bauteilen erprobt werden. Hierfür werden die Positioniergenauigkeit und die Durchführbarkeit einer automatisierten Integration im Allgemeinen geprüft, die zeitlichen Vorteile des Systems gegenüber manuellen Handhabungsabläufen evaluiert und anschließend eine Komponente mittels automatisierter Integration aufgebaut, welche in Versuchen auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft wird.

6.3.1 Bestimmung der Positioniergenauigkeit

Nach VDI 2861 BLATT 3 wird die Positioniergenauigkeit der Kinematik untersucht. Demnach kann zwischen der absoluten Genauigkeit (Richtigkeit) und der Wiederholgenauigkeit (Präzision) unterschieden werden, welche im nachfolgenden ermittelt werden sollen. Zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit müssen die mittlere Positionsstreuung \bar{P}_s , die mittlere Umkehrspanne \bar{U} und die mittlere Orientierungsstreuung \bar{O}_s ermittelt werden. Da die verbaute Kinematik keinen rotatorischen Freiheitsgrad aufweist, kann auf die Bestimmung der Orientierungsstreuung verzichtet werden.

Für die Ermittlung der Kennwerte wurde eine digitale Messuhr (Typ: 1086 R Marcator, Firma Mahr) in x- und y-Orientierung auf der Kinematik platziert. Anschließend wurden verschiedene Positionen in x- und y-Orientierung angefahren und die Abweichung von der Sollposition ermittelt. Gemäß VDI 2861 ist der Roboter fest fixiert, ist im betriebsbereiten Zustand und es liegt eine konstante Umgebungstemperatur vor. Die Positionen wurden im Automatikbetrieb angefahren und es wurde mit kurzen Mess- und Aufnahmezeiten gearbeitet. In x- und y- Richtung wurden für die Bestimmung je vier Messreihen à vier Messpunkte aus zwei verschiedenen Richtungen angefahren, in z-Richtung zwei Messreihen à vier Messpunkte.

Die mittlere Positionsstreuung beschreibt ein statistisches Maß für die messrichtungsabhängige Abweichung der gemessenen Ist-Position von der Soll-Position. Währenddessen ist die mittlere Umkehrspanne definiert als mittlere Differenz der Messwerte aus beiden Anfahrrichtungen.

Positionsstreuung P_{sj} (Ort x_j), maximale Positionsstreuung $P_{s,max}$ (Ort x_j), mittlere Standardabweichung \bar{s}_j :

$$P_{sj} = 6\bar{s}_j \text{ und } P_{s,max} = \max P_{sj} \quad (6-5)$$

Mittlere Positionsstreuung \bar{P}_s :

$$\bar{P}_s = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{sj} \quad (6-6)$$

Umkehrspanne U_j und maximale Umkehrspanne U_{max} (Ort x_j):

$$U_j = |\bar{x}_j \uparrow - \bar{x}_{ij} \downarrow| \text{ sowie } U_{max} = \max U_j \quad (6-7)$$

Mittlere Umkehrspanne \bar{U} :

$$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_j \quad (6-8)$$

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Messungen aufgelistet. Es wird erkennbar, dass die Positionierungstreibereiten auf einem präzisen Niveau von unter 0,1 mm erreicht werden können.

Tabelle 7: Positioniergenauigkeit der Kinematik nach VDI 2861 BLATT 3.

	Orientierung		
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung
Mittlere Positionsstreuung \bar{P}_s	0,03 mm	0,04 mm	0,02 mm
Maximale Positionsstreuung $P_{s,max}$	0,08 mm	0,09 mm	0,03 mm
Mittlere Umkehrspanne \bar{U}	0,06 mm	0,25 mm	0,06 mm
Maximale Umkehrspanne U_{max}	0,09 mm	0,33 mm	0,07 mm

6.3.2 Automatisierter Integrationsablauf und zeitliche Evaluation

Der Kinematikaufbau und dessen Ansteuerung wurden im PBF-LB/M-Aufbauprozess erprobt. In Abbildung 83 ist ein Versuch visualisiert, welcher die automatisierte Integration von RFID-Tags im Prozess zeigt (vergleiche hierzu auch BINDER ET AL. (2020d)). 1) zeigt den PBF-LB/M-Prozess vor der Unterbrechung, 2) die Anfahrt der Kinematik zur Kavität, 3) den Absaugvorgang, 4) die anschließende Aufnahme des Tags, 5) die Positionierfahrt zur Kavität, 6) den Ablegevorgang in der Kavität, 7) das Schichtbild nach dem Verschluss der Kavität und der Schicht-homogenisierung und 8) den anschließend wieder aufgenommenen PBF-LB/M-Prozess.

Zur Bewertung werden die manuellen und die automatisierten Sensorintegrationszeiten miteinander verglichen. Um neben dem aktuellen Ist-Zustand auch zukünftige Verbesserungspotenziale der Kinematik mitbetrachten zu können, werden drei weitere Szenarien in die Betrachtung miteinbezogen. Die Szenarien stellen realistische und sinnvolle nächste Schritte einer Verbesserung des Handhabungssystems dar.

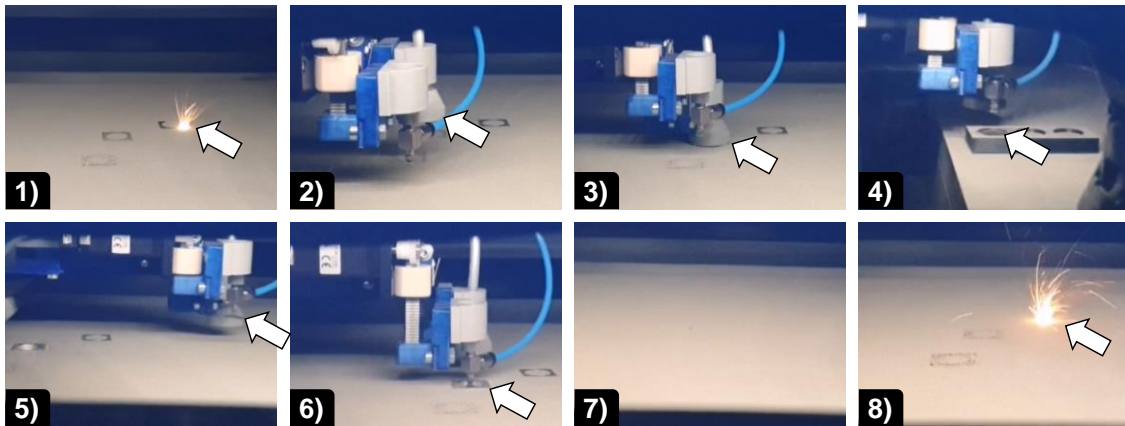


Abbildung 83: Automatisierter Einlegevorgang eines RFID-Tags während des PBF-LB/M-Prozesses unterteilt in seine Einzelschritte (BINDER ET AL. 2020d, BINDER & SEIDEL 2019).

I) Istzustand (ein Sensor): Unter diesem Punkt wird die Zeit zusammengefasst, welche die Kinematik benötigt, um einen Sensor des jeweiligen Typs während einer Prozessunterbrechung zu integrieren.

II) Verbesserte Ansteuerung: Die verbesserte Ansteuerung basiert auf dem Ist-Zustand der Kinematik und der Annahme, dass in einem industriellen Szenario Wartezeiten der Kinematik vermieden und x-y-Bewegungen der Kinematik synchronisiert werden könnten. Zudem entfällt durch die Nutzung von Encodern die Referenzierungszeit.

III) Doppelte Bewegungsgeschwindigkeit: Zusätzlich zur verbesserten Ansteuerung wird davon ausgegangen, dass die Verfahrgeschwindigkeiten in Summe doppelt so schnell durchgeführt werden können, ohne Einbußen in der Integrationsqualität zu erzeugen.

IV) Schnell & skaliert (zehn Sensoren): Die Optimierungsmaßnahmen der Ansteuerung und Bewegungsgeschwindigkeiten werden um eine 10-fache Sensorintegration in einer Schicht ergänzt, anstelle der einfachen. Dadurch reduziert sich die anteilige Integrationszeit pro Sensor.

In Abbildung 84 ist der Vergleich zwischen einer manuellen und automatisierten Sensorintegration aufgezeigt. Alle Integrationszeiten werden während der Fertigung entsprechender Versuchskomponenten ermittelt (**I**) und zudem zeitliche Skalierungseffekte dargestellt (**V**). Es wird ersichtlich, dass die automatisierte Sensorintegration auch dann wesentliche zeitliche Vorteile bringt, wenn die manuelle Sensorintegration als idealisiert angenommen wird (idealisiert = keine Fehler beim Einlegen, keine Wartezeiten, hohe Mitarbeiterexpertise, ...). Beim Vergleich der

manuellen und automatisierten Integration muss jedoch beachtet werden, dass Prozessunterbrechungen, verbunden mit einem Öffnen der Prozesskammertür, unbedingt vermieden werden sollten (vgl. Unterabschnitt 5.2.6.3).

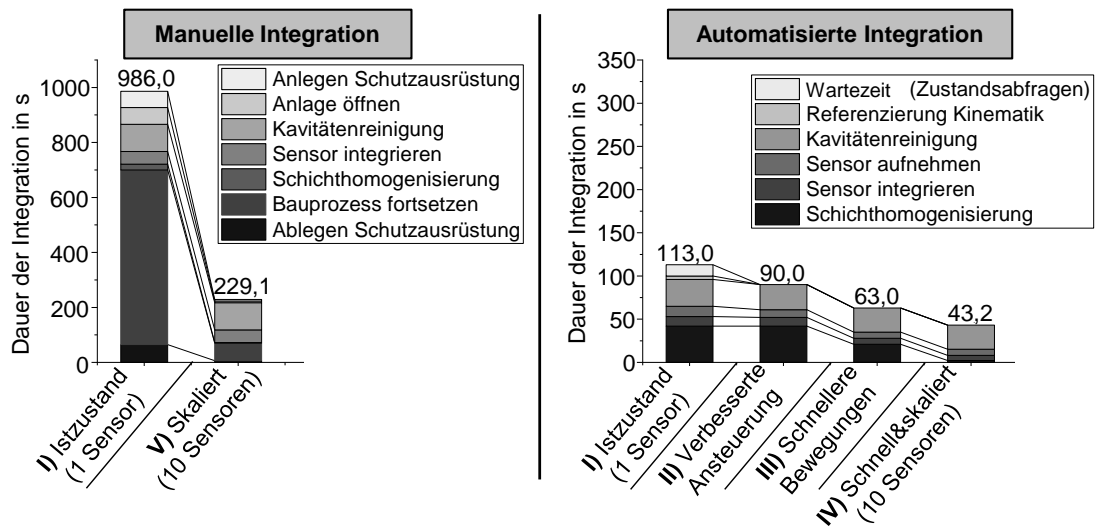


Abbildung 84: Integrationszeit pro Sensor in manuellen und automatisierten Szenarien.

In Abbildung 85 werden zudem die Integrationszeiten von RFID-Tag, Pt100 und DMS miteinander verglichen. Wie aus der Abbildung hervorgeht, gibt es im Ist-Zustand Wartezeiten (bedingt durch Handshakes mit Lasersystem), die sich in einer industriellen Automatisierungslösung leicht vermeiden ließen. Dies ist durch den Wechsel von der seriellen Integration auf den Zustand „Integriert“ umsetzbar (vgl. Abschnitt 6.2.3). Dadurch lassen sich skriptabhängige Signalübergaben und Wartezeiten vermindern. Den zweiten großen zeitlichen Faktor bildet die Reinigung der Kavitäten, welche im aktuellen System nicht weiter optimiert werden kann. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Verkürzung der Integrationszeiten in allen drei Szenarien um 61 % bis zu 83 % möglich ist. In optimierten Aufbauten, unter der Nutzung angepasster Systeme, lässt sich die notwendige Zeit zur Kavitätenreinigung also verkürzen. Diese Prozessverkürzung ist vor allem aus qualitätsorientierten Gründen von Interesse (vgl. Unterabschnitt 5.2.6.3), aber auch aus wirtschaftlichen.

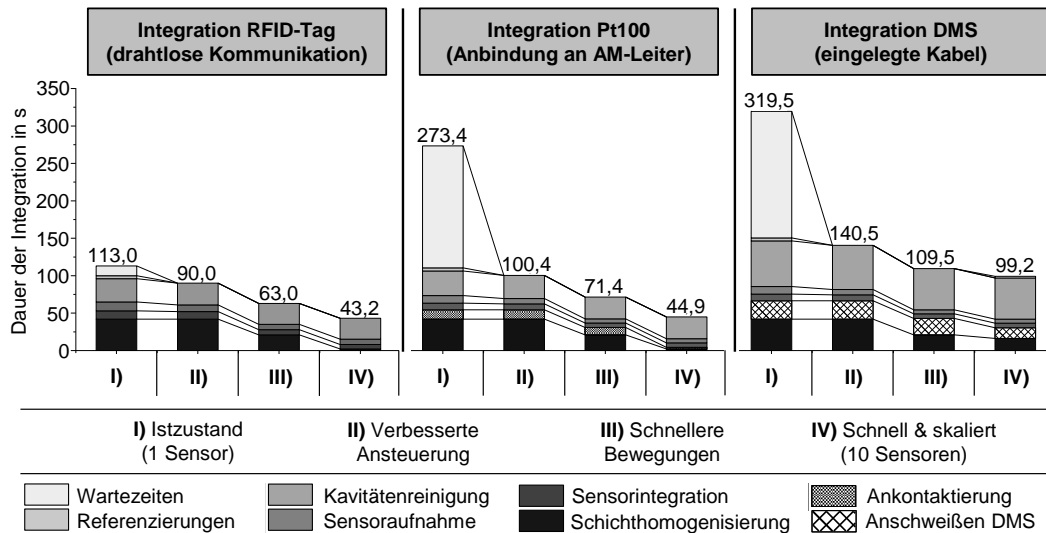


Abbildung 85: Integrationszeit für RFID-Tags, Pt100 und DMS mittels Kinematik im Istzustand und unter optimierten Bedingungen (Dauer der Integration pro Sensor).

6.3.3 Umsetzung eines temperaturüberwachten Werkzeugdemonstrators

Zur Validierung der aufgebauten Automationseinheit wurde ein Prüfkörper gefertigt, welcher neben der reinen Integration eines Sensors auch dessen Ankontaktierung an additiv gefertigte Leiterbahnen benötigt. Der aufgebaute Testkörper hat einen Temperaturfühler des Typs Pt100 integriert und stellt den Ausschnitt eines hypothetischen Spritzguss-/Druckgusswerkzeugs mit integriertem Kühlkanal (Tropfenform) dar (vgl. Abbildung 87).

Das Bauteil wurde aus der Stahllegierung 316L auf dem AconityOne-System mittels automatisierter Sensorintegration gefertigt. Die Ankontaktierung an die additiv gefertigten Leiterbahnen erfolgte durch das Laser-Scanner-System, welches für das Anschweißen automatisch nach unten gefahren werden kann, um den Laserfokus in der Arbeitsebene gleich zu halten. Für die Ankontaktierung der eingelegten Leiter an die additiv gefertigten Leiterbahnen wird die Laserbelichtung drei Mal repetiert. Die spezifische Prozesskette ist in Abbildung 86 abgebildet.

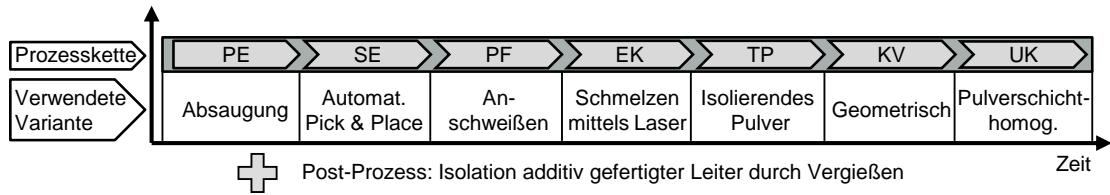


Abbildung 86: Spezifische Prozesskette der automatisierten Integration von Pt100-Sensoren in Werkzeug-Prüfkörper.

Für den automatisierten Integrationsvorgang wurden verschiedene Aufmaße vorgesehen, um einen zuverlässigen Einlegevorgang sicherstellen zu können. So wird zur Sicherstellung einer Ankontaktierung der Ankontaktierungsbereich in x- und y-Richtung vergrößert, um Varianzen in der Positioniergenauigkeit ausgleichen zu können (vgl. Abbildung 87).

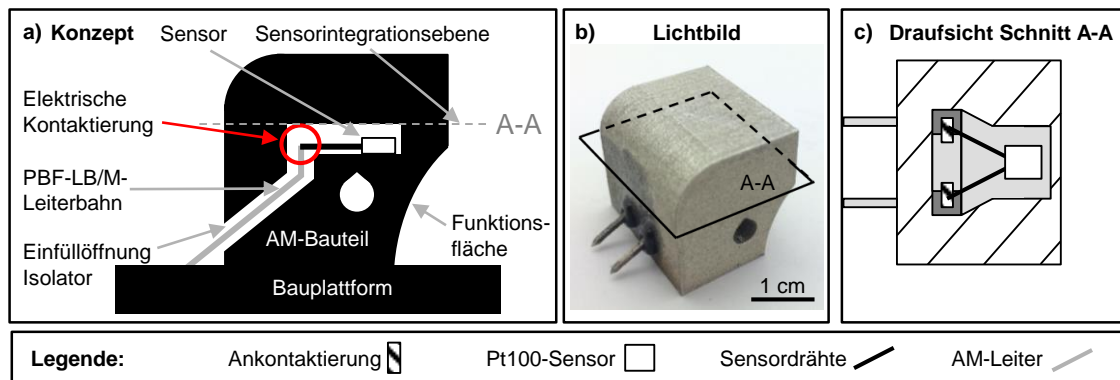


Abbildung 87: a) schematische Darstellung des Prüfkörpers, b) Lichtbild des gefertigten Körpers mit abgegossenem Leiter) c) Schnitt A-A zur Veranschaulichung der Innenstruktur.

Analyse der Funktionsfähigkeit des Systems

Gemäß VDI/VDE 3522 Blatt 1 wurde das dynamische Messverhalten des eingebetteten Pt100 Thermometers bestimmt. Hierzu wurde ein Wasserbad zum Kochen gebracht und dessen Temperatur erfasst ($T_M = 98 \text{ }^\circ\text{C}$). Anschließend wurde der bei Raumtemperatur ($T_S = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) gelagerte Prüfkörper in das kochende Wasser eingelegt und die messbare Temperaturveränderung des Pt100-Sensors erfasst (vgl. Abbildung 88). An dem kurzen Abfall der Wassertemperatur ist erkennbar, dass der Versuchskörper ins Wasser eingelegt worden ist und nun als Temperatursenke wirkt, sodass sich das Wasser abkühlt. Dieser Abfall liegt bei $4 \text{ }^\circ\text{C}$ und ist nach wenigen Sekunden ausgeglichen. An den Zeitprozentkennwerten t_{50} , t_{63} und t_{90} lässt sich erkennen nach welcher Zeit 50 %, 63 % und 90 % der Wassertemperatur durch den integrierten Pt100-Sensor erfasst worden sind.

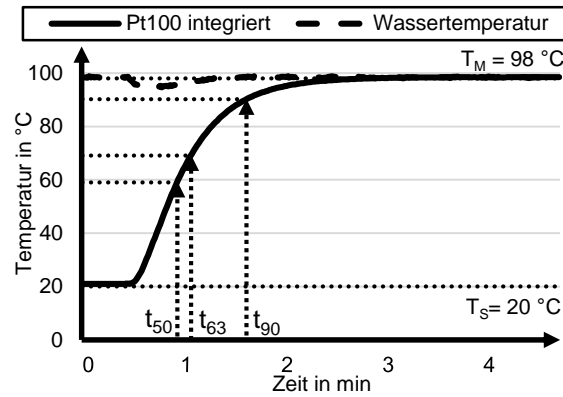


Abbildung 88: Bestimmung der Sprungantwort des eingebetteten Pt100-Sensors und der Zeitprozentkennwerte t_{50} , t_{63} und t_{90} für ein Aufheizen von 20 °C auf 98 °C , ausgewertet mit einem QuantumX-Messgerät.

Analyse der Positioniergenauigkeit der Pt100-Drähte

Im zweiten Schritt gilt es die Positioniergenauigkeit der eingelegten Drähte zu prüfen. Hierfür wurde vom Prüfling ein CT-Scan angefertigt, um insbesondere die Ankontaktierungsbereiche analysieren zu können. Abbildung 89 zeigt die relevanten Bereiche in den verschiedenen Schnittansichten. Die dunkelgrauen Flächen entsprechen dem AM-Bauteil / den AM-Leiterbahnen, die weißen Punkte dem Sensordraht. Da im CT-Scan immer nur eine Ebene dargestellt werden kann sind sowohl AM-Draht als auch Sensordraht als Klötze/Punkte zu erkennen, da der Rest der Leiter außerhalb der abgebildeten Ebene liegt. Der Sensorkörper selbst liegt ebenso außerhalb der betrachteten Ebene. Durch geometrische Analyse der Schweißpunkte können leichte Abweichungen von der eigentlichen Soll-Ankontaktierung gut festgestellt werden: der Abstand der Litzen hätte im Soll bei 5 mm liegen müssen und liegt real bei 5,2 mm. Zudem ist geplant gewesen, die Litzen mittig an die Leiterbahnen anzukontaktieren. In der Analyse zeigen sich jedoch Abweichungen zwischen 0,6 und 1,0 mm. Da die Litzen leicht verbiegbare sind und die Kinematik nicht im direkten Kontakt mit den Litzen stand, ist davon auszugehen, dass die Abweichungen im Abstand der Litzen bereits vor der Integration vorlagen.

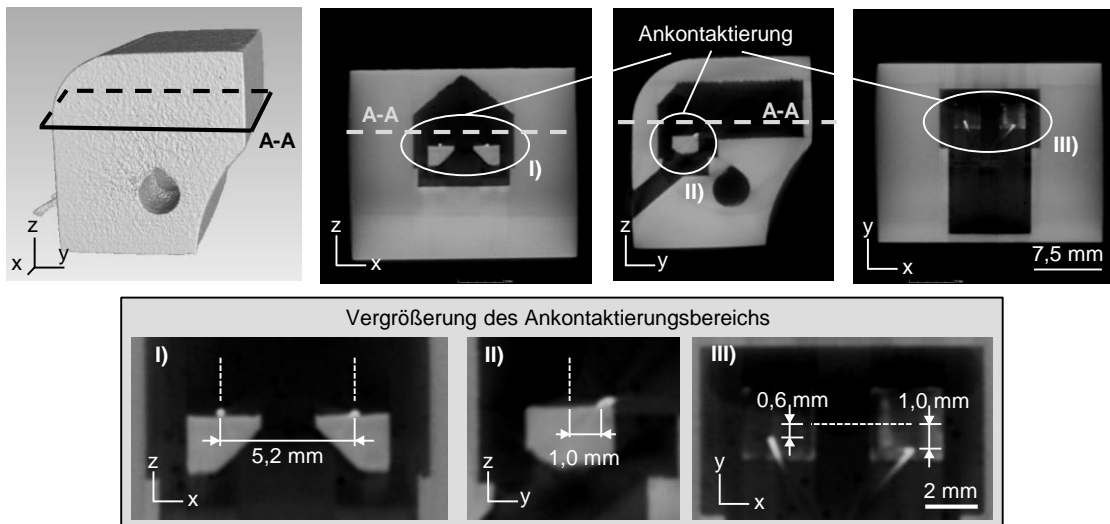


Abbildung 89: CT-Scan des gefertigten Probekörpers in verschiedenen Ansichten, mit dem Fokus auf den Ankontaktierungsbereich.

Analyse der automatisierten Ankontaktierungsgüte

In Abbildung 90 ist eine Fügezone im Schliff zu sehen. Gut zu erkennen ist, dass das eingegossene Polyurethanharz die Bereiche um die Fügezone gut umfließen hat und die Verbindung damit stabilisiert und in Form hält. Der Ankontaktierungsbereich scheint daher ausreichend groß, da keine mechanischen Lasten auftreten, bzw. diese durch die Abgussmasse kompensiert werden. Einer äußeren Last konnte dadurch bereits beim Abtrennen des Körpers von der Bauplattform erfolgreich widerstanden werden.

Bei dem in Abbildung 90 gezeigten Anschlussdraht handelt es sich um einen Ni/Pt-Manteldraht (Platin auf der Außenseite). Der Platinbereich ist hierbei gut vom Nickel-Bereich durch die unterschiedlichen Grautöne zu differenzieren (Pt außen, Ni innen). Des Weiteren ist die Durchmischung des Ni/Pt-Bereichs auf der Oberseite des Leiters zu erkennen. Diese Vermischung ist auf den Energieeintrag des Lasers bei der Ankontaktierung zurückzuführen.

Resümee: Abschließend kann gesagt werden, dass die automatisierte Integration eines Pt100-Sensors, inklusive der additiven Fertigung von Leiterbahnen und Ankontaktierung via Lasersystem, erfolgreich durchführbar ist. Dennoch gibt es Optimierungspotenzial bei der Ankontaktierungspräzision und beim Wärmeübergang des integrierten Temperaturfühlers. Die Präzision der Ankontaktierung lässt sich beispielsweise durch eine Reduktion des Übermaßes im Sensormagazin umsetzen, sodass der Sensor mit einer geringeren Toleranz aufgenommen werden kann.

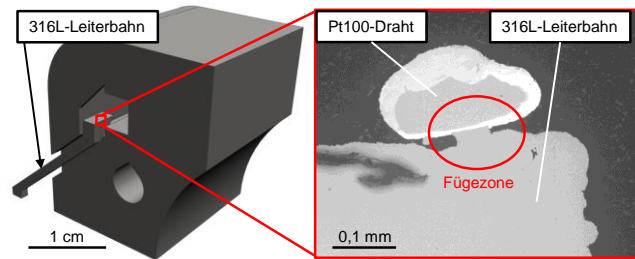


Abbildung 90: Ankontaktierung des Pt100-Drahts an die Leiterbahn aus 316L im Schliff.

Zudem könnte durch eine geometrische Optimierung des AM-Leiters (z. B. U-**Re-sümee:** Abschließend kann gesagt werden, dass die automatisierte Integration eines Pt100-Sensors, inklusive der additiven Fertigung von Leiterbahnen und Ankontaktierung via Lasersystem, erfolgreich durchführbar ist. Dennoch gibt es Optimierungspotenzial bei der Ankontaktierungspräzision und beim Wärmeübergang des integrierten Temperaturfühlers. Die Präzision der Ankontaktierung lässt sich beispielsweise durch eine Reduktion des Übermaßes im Sensormagazin umsetzen, sodass der Sensor mit einer geringeren Toleranz aufgenommen werden kann. Form bei Drahtaufnahme) die Fügezone (vgl. Abbildung 90) noch weiter vergrößert und verbessert werden. Zur Optimierung sollte außerdem in weiteren Versuchen ein besserer Wärmeübergang zwischen Sensor und Bauteil erzielt werden (z. B. durch die Verwendung von Wärmeleitpaste). Außerdem kann den Messdaten eine Korrekturfunktion hinterlegt werden, sodass über die Beschleunigung der Temperaturveränderung auf die eigentlich vorherrschende Temperatur geschlossen werden kann.

6.3.4 Prozessmonitoring und Qualitätssicherung

Das Ziel der automatisierten Sensorintegration ist es, bereits während des Fertigungsprozesses sicherzustellen, dass ein integrierter Sensor richtig in das Bauteil eingebunden worden ist. Ist der Sensor falsch ankontaktiert worden, durch thermischen Energieeintrag zerstört worden oder liegt ein anderer Fehler vor, ist es hilfreich diesen Defekt zeitnah, bereits während der Fertigung zu detektieren. Abhängig vom Fehlerbild können dann Maßnahmen durchgeführt werden wie:

- Nachbesserung (durch z. B. wiederholte Belichtung),
- Bauteilentfernung aus dem Fertigungsauftrag oder
- Abbruch des gesamten Bauauftrags.

Durch derartige Schritte kann einerseits die Qualität des Bauteils sichergestellt werden, aber auch im Falle einer nicht behebbaren Fehlstelle, Fertigungszeit und Material eingespart werden. So ergeben sich folgende Ziele:

- Basisziel: Sicherstellung der korrekten Sensorintegration und -anbindung (elektrisch wie positionsgetreu) an das Bauteil.
- Erweitertes Ziel: Der Sensor kann bereits während der Bauteilfertigung ausgelesen werden, sodass Prozessdaten generiert und ausgewertet werden können.

Lösungsansatz: Eine konventionelle Bauplattform wurde in mehrere Bereiche getrennt (bspw. durch Zersägen) und mit Hilfe eines isolierenden Materials wieder so zusammengefügt, dass die Grundabmaße der Bauplattform gleich bleiben. Man erhält nun eine Bauplattform mit elektrisch voneinander abgeschirmten Bereichen (vgl. Abbildung 91). Die vertikalen Seitenwände der Bauplattform wurden mit isolierendem Lack benetzt, welcher Kurzschlüsse zwischen der Anlage und der Bauplattform verhindert. Auf der Bauplattform konnte nun ein Bauteil aufgebaut werden, in die, nach dem im Unterabschnitt 5.2.3.2 erklärten Prinzip, additiv gefertigte, elektrische Leiterbahnen hineinwachsen können. Jede Leiterbahn ist an einem eigenen isolierten Plattformbereich angebunden und verläuft anschließend in das Bauteil hinein. Da das den Leiter umgebende Metallpulver gut elektrisch isolierend ist (es besteht theoretisch nur ein infinitesimal kleiner Kontakt zwischen zwei Pulverkörnern), wird ein Kurzschluss zwischen Leiter und Bauteil verhindert. Zum geplanten Zeitpunkt wurde der Prozess unterbrochen und ein Sensor in das Bauteil eingelegt. Die Kontaktstellen von Sensor und Leiterbahn werden, bspw. mittels Laser, elektrisch miteinander verbunden (vgl. Abbildung 91). War diese Ankontaktierung erfolgreich, ist eine Auswerteeinheit, welche an die Bauplattform angeschlossen ist, in der Lage, den Widerstand des Stromkreises zu messen (vgl. Abbildung 92). Können trotz abgeschlossener Kontaktierung keine Messwerte generiert werden, ist dies der Hinweis auf eine fehlerhafte Kontaktstelle oder einen defekten Sensor. Können die Sensordaten korrekt erfasst werden, ist die Funktion der elektrischen Baugruppe sichergestellt und es können mit Hilfe des Sensors bereits Daten zum Verlauf des Herstellungsprozesses generiert und ausgewertet werden.

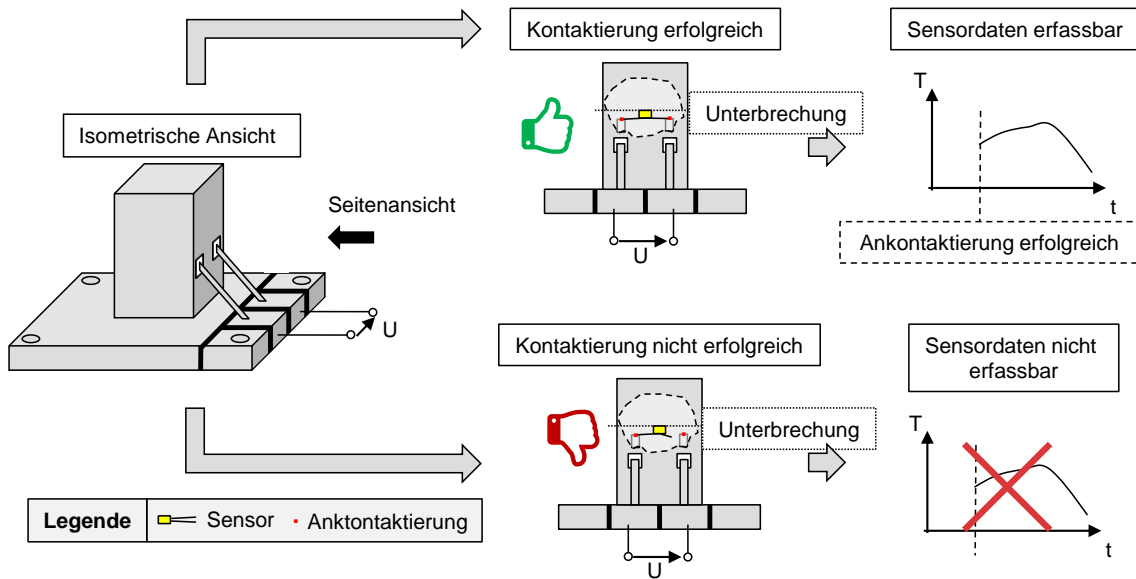


Abbildung 91: In-Prozess-Funktionsprüfung eines integrierten Temperatursensors mittels in mehrere voneinander isolierte Bauplattformbereiche.

Achtung: Die Kontaktstelle kann theoretisch aber weiterhin so filigran und labil sein, dass sie beim Ausgießen oder bei ihrer Inbetriebnahme brechen kann.

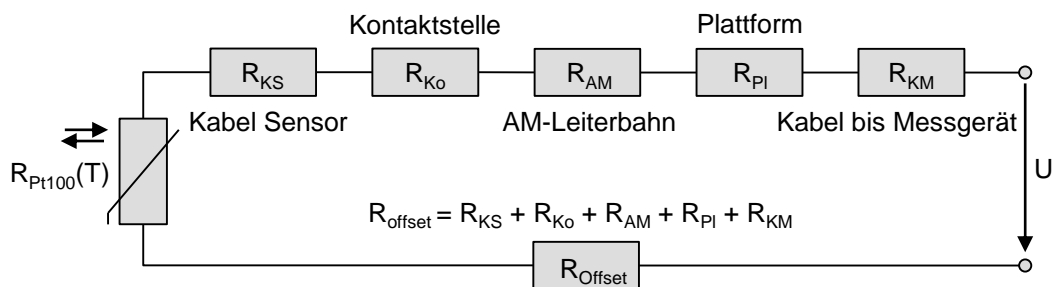


Abbildung 92: Schaltbild des Prüfaufbaus und Berechnung des Ersatzwiderstands R_{Offset} .

Der Versuch wurde wie beschrieben für einen Baujob aus AlSi10Mg an einer SLM125-Anlage ohne Bauplattformheizung durchgeführt. Nach einer Unterbrechung wurde, wie in Abbildung 89 zuvor gezeigt, ein Pt100-Sensor eingelegt und ankontaktiert. Direkt nach der Ankontaktierung konnte durch ein Widerstandsmessgerät an der Sensorposition die Temperatur erfasst werden (siehe Abbildung 93, a)). So ließ sich über den gesamten Zeitraum des Baujobs die Temperatursteigerung in der mit Pulver verschlossenen Kavität messen. Nach dem Baujobende kühlte das Bauteil ab (vgl. Abbildung 93, b)).

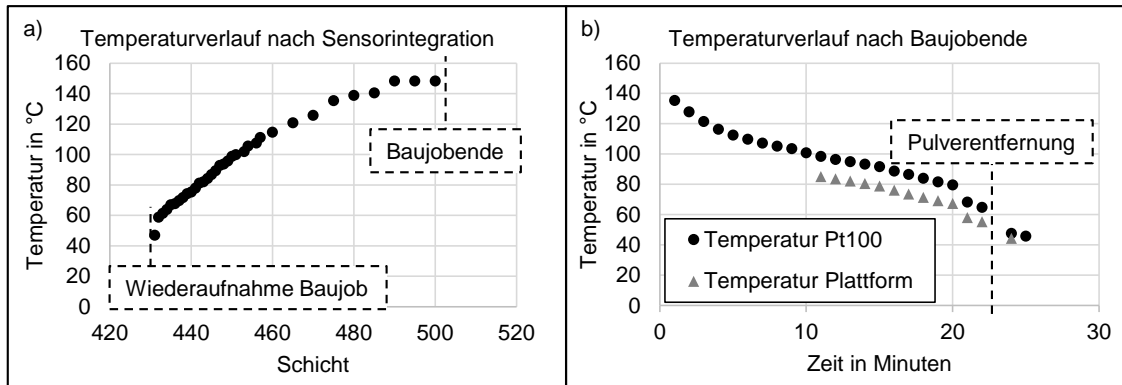


Abbildung 93: Messwerte, welche mit dem eingelegten und ankontaktierten Pt100-Sensor generiert werden konnten (gemessen mit MCR-4TC).

Resümee: Für eine Serienfertigung von Komponenten mit additiv gefertigten Leitern kann standardmäßig eine Bauplattform verwendet werden, welche voneinander isolierte Segmente enthält. Wenn auf diesen Plattformen für eine Serienfertigung stets die gleichen Bauteile gefertigt werden, ist dies eine gute und einfache Möglichkeit durch eine In-Prozess-Qualitätssicherung die korrekte Einbindung des Sensors sicherzustellen. Das Prinzip lässt sich auch beliebig auf andere Sensorarten (z. B. Körperschallsensoren) übertragen.

6.4 Fazit

Es wurde gezeigt, wie der manuelle Sensorintegrationsprozess in einer PBF-LB/M-Anlage automatisiert durchgeführt werden kann und durch das Verfahren funktionsfähige Bauteile mit integriertem Sensor gefertigt werden können. Dennoch bedarf die Automatisierung manueller Vor- und Nachbereitungstätigkeiten, welche beispielsweise die Befüllung eines Magazins mit Sensoren oder das Entleeren eines mit Pulver gefüllten Auffangbehälters beinhaltet. Des Weiteren wird veranschaulicht, dass das Prinzip der Leiterbahnfertigung und das Anschweißen eines eingelegten Sensors an diese automatisiert umsetzbar ist. Die Kombination von AM-Leiter und Sensor kann außerdem dafür genutzt werden, um automatisiert und bereits während des Prozesses, ein Prozessmonitoring und eine Qualitätssicherung zu realisieren.

7 Anwendung und Validierung

Dieses Kapitel soll die in den vorhergehenden Kapiteln erarbeiteten Erkenntnisse evaluieren (vgl. Abbildung 94). Im Vergleich zu den technischen, anwendungsnahe und operativen Validierungen in den vorhergehenden Abschnitten, liegt in diesem Kapitel die strategische und übergeordnete Systematik im Fokus. Die vorgestellte Methode aus Kapitel 1.5 wird für den gewählten Betrachtungsrahmen durch die Umsetzung von vier Anwendungsbauteilen validiert, welche unter Einbeziehung der manuellen und automatisierten Sensorintegration gefertigt werden.

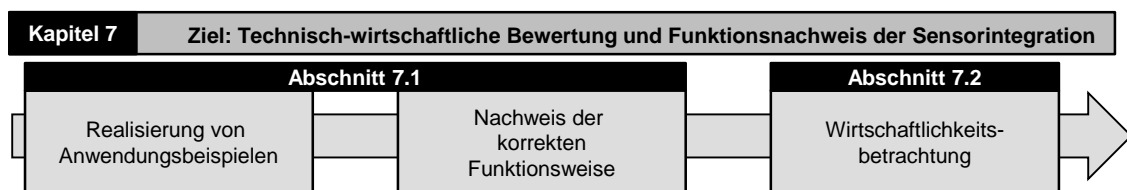


Abbildung 94: Vorgehen und Inhalte dieses Kapitels (für Gültigkeitsbereich der Methode vgl. Anhang A5, Abbildung 109).

Im folgenden Abschnitt 7.1 werden für die Anwendungsbauteile RFID-Ring, Gaspedal, Strömungsrechen und Zahnrad das Anwendungsszenario näher vorgestellt, die Umsetzung erklärt und das jeweilige Bauteil anschließend bezüglich seiner Funktion und Qualität bewertet, bevor es in Abschnitt 7.2 hinsichtlich der Kosten analysiert wird. Jedes Anwendungsbeispiel soll in dem Kapitel eine unterschiedliche Fragestellung adressieren:

- RFID-Ring: Lässt sich die LF-RFID-Technologie auch in einem realen Anwendungsszenario vollständig in Metall integrieren und in ausreichendem Maße auslesen?
- Gaspedal: Können die Prinzipien der Leiterbahnfertigung, der Leiterkontaktierung und DMS-Verschweißung in einem funktionalen Umsetzungsbeispiel vereinigt werden?
- Strömungsrechen: Kann das Konzept des ankontaktierten DMS auch zur Schwingungsüberwachung einer Komponente genutzt werden?
- Zahnrad: Kann das Konzept der Leiterbahnfertigung für die Fertigung einer Antenne genutzt werden und mit einem batterieles betriebenen Lage- und Vibrationssensor verknüpft werden?

7.1 Realisierung von Anwendungsbeispielen

7.1.1 Ring mit integriertem RFID-Tag

Anwendung: Ein Ring mit einem integrierten RFID-Tag kann als Datenspeicher, Bezahlungsmöglichkeit, Identifikationsmöglichkeit oder zur Entriegelung von Schlössern verwendet werden. Der Tag ist nur durch Zerstörung des Rings aus diesem zu entfernen und von außen nicht sichtbar. Der Vorteil des Rings liegt darin, immer am Körper getragen werden zu können, wodurch die Chance eines Verlusts gering ist. Das Anwendungsbeispiel des RFID-Rings erhielt viel öffentliches Interesse und wurde in mehreren breitenwirksamen Veröffentlichungen kommuniziert (vgl. auch Anhang A5, Abbildung 121). (PROSIEBEN 2021, SCHEIDL ET AL. 2021, VAN BOCXLAER & BINDER 2021, EINTER ET AL. 2021).

Umsetzung: Die Herstellung des Rings aus 316L erfolgte gemäß der spezifischen Prozesskette (vgl. Abbildung 95) mittels automatisierter Sensorintegration (AconityOne).

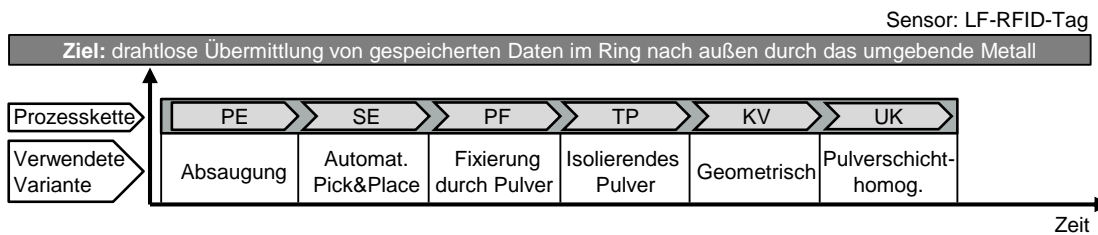


Abbildung 95: Spezifische Prozesskette RFID-Ring.

In Abbildung 96, a) ist der gefertigte Ring dargestellt und in b) die Auslesereichweite des Tags im normalen und integrierten Zustand visualisiert. Die maximale Auslesereichweite wird experimentell in 1 mm Schritten in x-, y- und z-Richtung ermittelt. Es wird ersichtlich, dass der Tag im integrierten Zustand an Kommunikationsreichweite verliert, jedoch weiterhin ab einem Abstand von ca.

8,1 mm ausgelesen und beschrieben werden kann (nicht integriert 12,1 mm). Diese Signalschwächung ist durch die abschirmende Wirkung des Metalls begründet.

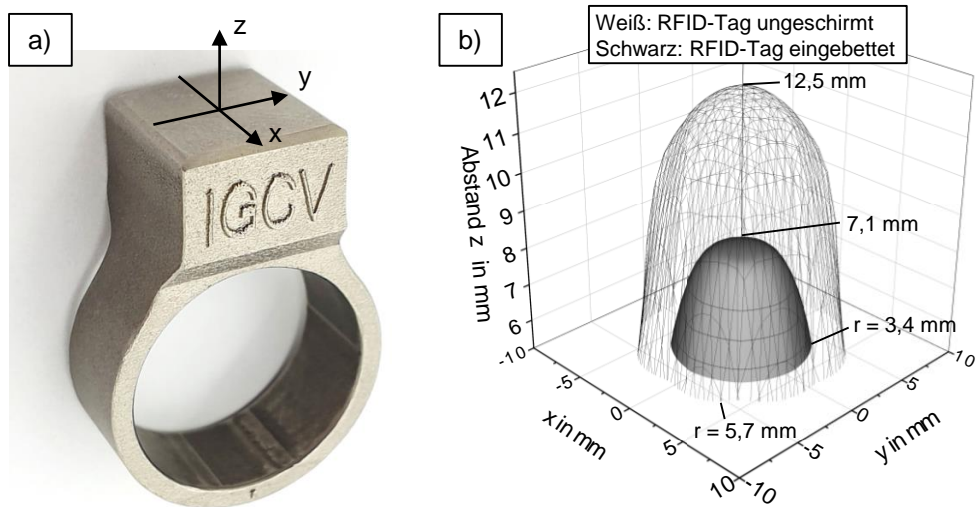
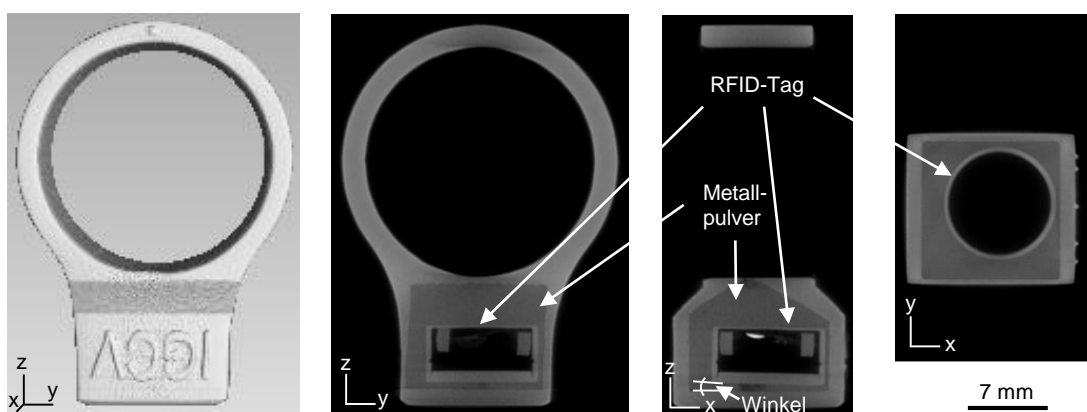


Abbildung 96: a) gefertigter RFID-Ring; b) Veränderung der Auslesereichweite des eingebetteten Sensors im Vergleich zum nicht-integrierten RFID-Tag.

Bewertung: Zwei gefertigte Ringe wurden im CT-Scan analysiert, um die Positionierung der RFID-Tags ermitteln zu können. Die Tags liegen, durch Pulver fixiert, in der Kavität und weichen in x- und y-Richtung von der geplanten Sollposition um einige Zehntel Millimeter ab (vgl. Abbildung 97). Diese Abweichung tritt auf, da es bei der Aufnahme und Ablage des Sensors zu Positionierungsungenauigkeiten kommt und das nach der Sensorintegration wieder eingefüllte Metallpulver in der Kavität den RFID-Tag verschieben kann.



	Abweichung x	Abweichung y	Abweichung z	Winkel
Ring 1	0,64 mm	0,33 mm	1,19 mm	6,9°
Ring 2	0,85 mm	0,61 mm	0,57 mm	1,4°
Mittelwert:	0,74 mm	0,47 mm	0,88 mm	4,2°

Abbildung 97: CT-Analyse zweier gefertigter RFID-Ringe.

7.1.2 Gaspedal mit integrierter Temperatur- und Kraftsensorik

Anwendung: Die additive Fertigung von Gaspedalen für die Automobilbranche wurde bereits in verschiedenen Arbeiten betrachtet. (SARGINI ET AL. 2021, ABDI ET AL. 2018, SLM SOLUTIONS 2021) In diesem Ansatz wurde die additive Fertigung eines Gaspedals für die Automobilbranche um die Integration von Sensoren erweitert. Die Idee war es, dass durch die Integration eines Dehnungsmessstreifens in das Pedal Komponenten wie Dämpfer oder Druckleitungen entfallen können, da die Fahrerintention über ein elektrisches Signal erfasst wird. Um temperaturbedingte Längendehnungen (Annahme: wetterbedingte Veränderung der Temperatur bei Nutzung zwischen maximal +80 °C und mindestens -40 °C möglich) ausschließen und eine Kraftaufbringung präzise erfassen zu können, wurden Pt100-Temperaturfühler in das Bauteil mitintegriert.

Umsetzung: Die Herstellung des Pedals erfolgte gemäß der spezifischen Prozesskette (vgl. Abbildung 98) mittels manueller Sensorintegration. Das Pedal wurde aus dem Werkstoff AlSi10Mg gefertigt, des Weiteren werden zwei Temperatursensoren und ein Dehnungsmessstreifen im Bauteil vorgesehen.

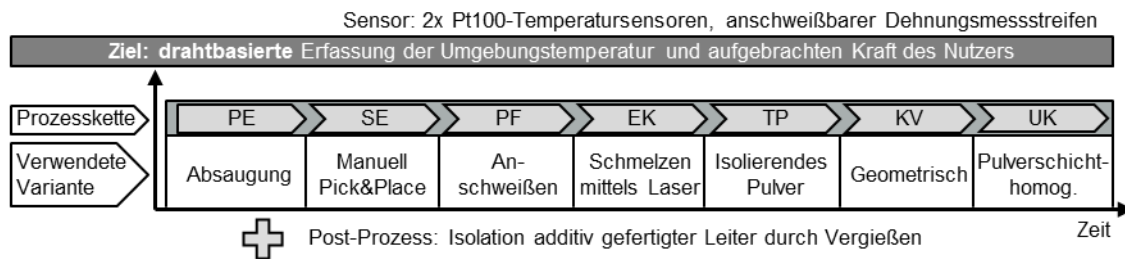


Abbildung 98: Spezifische Prozesskette Gaspedal.

Bewertung: Wie in Abbildung 99 zu erkennen, wurde das Gaspedal aufgebaut und die im Bauteilinneren liegenden Sensoren mit den additiv gefertigten Leiterbahnen durch das PBF-LB/M-Lasersystem verschweißt. Alle elektrischen Kontaktstellen konnten erfolgreich erzeugt werden, sodass sich Pt100-Sensoren und DMS erfolgreich auslesen lassen.

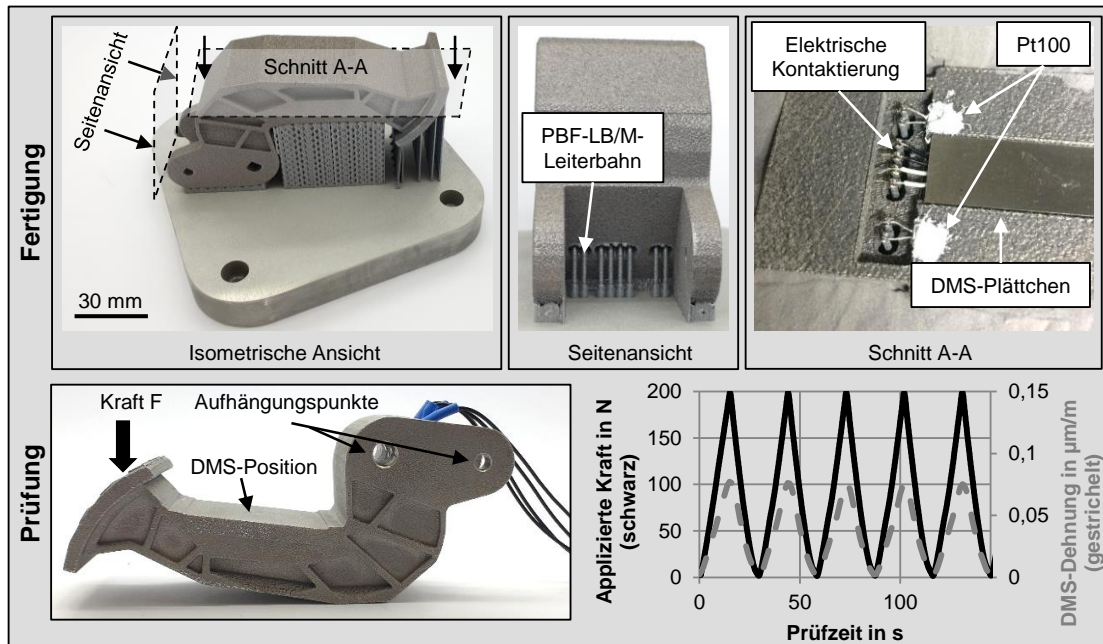


Abbildung 99: Herstellung des Anwendungsbeispiels Gaspedal auf einer SLM125 aus dem Werkstoff AlSi10Mg. Im Schnitt A-A ist die Prozessunterbrechung gezeigt, welche das Einlegen zweier Pt100-Sensoren und eines DMS ermöglicht, die anschließend mittels Laser an die elektrischen Leiterbahnen kontaktiert werden konnten.

7.1.3 Schwingungsüberwacher Strömungsrechen

Anwendung: Bei dem Strömungsrechen (Rake) handelt es sich um ein System für fluiddynamische Messungen, z. B. für den Turbomaschinenbereich, ausgelegt von der Firma Vectoflow. Da bei Strömungsmessungen häufig hohe Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten auftreten können, wird die Sonde standardmäßig aus einer Nickelbasislegierung gefertigt (IN718). Das Ziel in diesem Ansatz war, einen Dehnungsmessstreifen in das Bauteil zu integrieren, um Informationen über das Schwingungsverhalten und anliegende Kräfte im Inneren der Sonde generieren zu können. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf eine potenzielle Verschleißanfälligkeit und Materialermüdung. Zudem lassen sich bei Bedarf präventive Maßnahmen einleiten, um ein Bauteilversagen verhindern zu können.

Umsetzung: Das Bauteil wurde aus dem Werkstoff IN718 gefertigt. Für die Fertigung wurde die in Abbildung 100 gezeigte Prozesskette verwendet. Der Prozess des Anschweißens eines Dehnungsmessstreifens wurde hierbei, entsprechend zu Unterabschnitt 5.3 auf den Werkstoff IN718 übertragen.

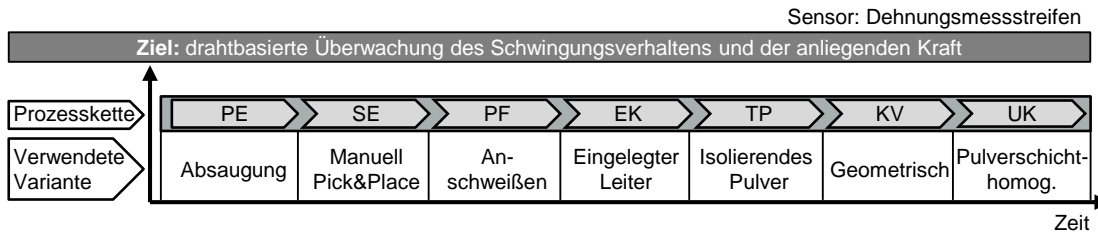


Abbildung 100: Spezifische Prozesskette Strömungsrechen.

Um die Fertigbarkeit des Strömungsrechens sicherstellen zu können, wurden diverse Parameterstudien (DoE) durchgeführt, bis eine erfolgreiche Verschweißbarkeit von DMS und IN718 gewährleistet werden konnte (vgl. BINDER ET AL. (2022b)). Wie in Abbildung 101 a) zu erkennen, wurden zu Beginn einzelne Schweißbahnen unter Variation der Laserparameter im geätzten Schliff analysiert. Anschließend wurde die Parameterauswahl verfeinert, bis die metallischen Trägerplättchen des Dehnmessstreifens erfolgreich ankontaktiert werden können (vgl. Abbildung 101 b). Die stoffschlüssige Verbindung zwischen den beiden Körpern ist in Abbildung 101, c) zu erkennen.

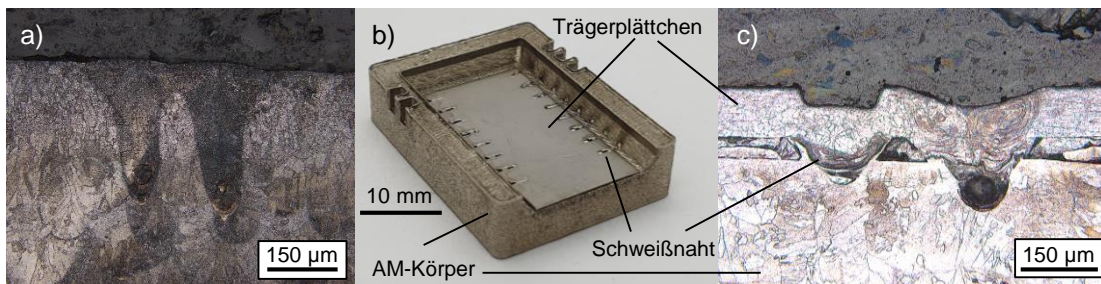


Abbildung 101: Vorversuche zur Sicherstellung der Anschweißbarkeit des DMS an IN718 (Laserleistung 150 W, Lasergeschwindigkeit 200 mm/s).

Wie in Abbildung 102 zu erkennen ist, konnte der besagte Strömungsrechen im nächsten Schritt erfolgreich gefertigt werden.

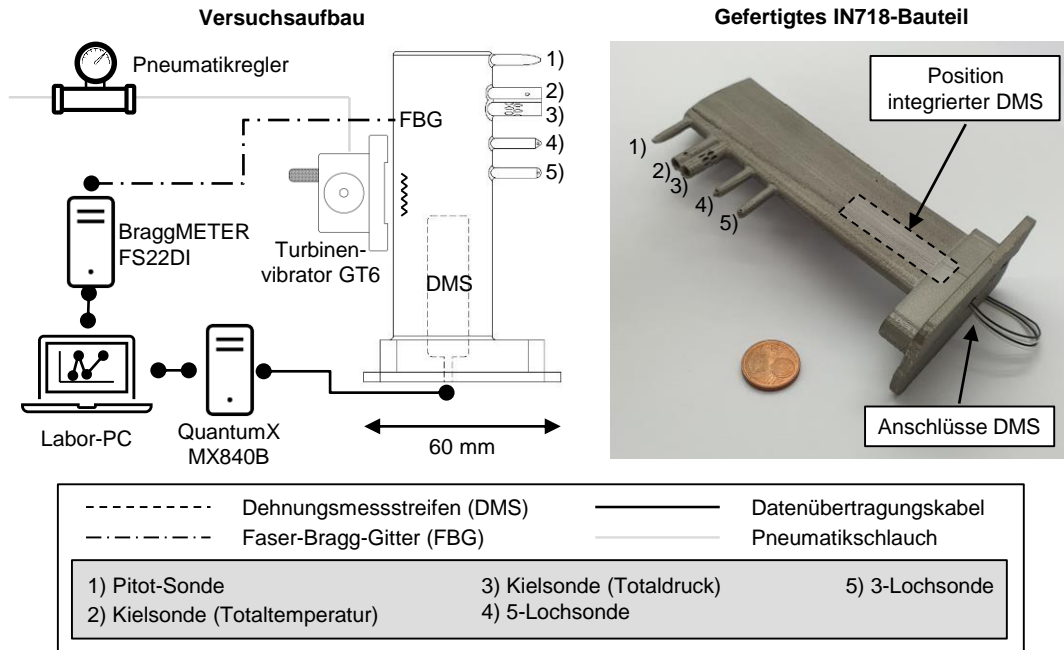


Abbildung 102: Prüfaufbau zur Ermittlung der korrekten Schwingungserfassung am Strömungsrechen (links) und Bild des additiv gefertigten Strömungsrechens der Vectroflow GmbH, zur Messung von Strömungen in Turbinen, mit integriertem Dehnmessstreifen (rechts).

Bewertung: Der DMS in der Strömungssonde sollte nun in der Lage sein die Vibration des Systems messen zu können. Zur Bewertung der Funktionsweise der integrierten Sensorik im Strömungsrechen wurde eine Schwingungsprüfung durch von außen aufgebrachte Vibration in Anlehnung an den amerikanischen Military Standard MIL STD 810 H durchgeführt. Der Prüfaufbau gestaltete sich hierbei wie in Abbildung 102 gezeigt, unter Verwendung eines Messverstärkers MX840B mit Viertelbrückenschaltung (350 Ohm), bei einer Abtastfrequenz von 1200 Hz.

Der Strömungsrechen wurde in Anlehnung an MIL STD 810 H mit einer definierten Frequenz von 350 Hz durch einen Turbinenvibrator beaufschlagt. Dieser wurde fest mit dem Rechen verschraubt. Die Korrektheit des Schwingungsverhaltens wurde durch einen extern aufgebrachten Fibre-Bragg-Grating-Sensor sichergestellt, welcher auf den Rechen aufgeklebt wurde. In diesem Zustand wurden nun die vom Dehnmessstreifen detektierten Schwingungen ausgewertet und mit denen des FBG-Sensors verglichen. In Abbildung 103 ist gezeigt, dass die Leistungsmaxima von FBG und DMS gleichermaßen bei 350 Hz auftreten. Die korrekte Funktionsweise des Konzepts wurde dadurch bestätigt. Die Leistungsunterschiede zwischen den beiden Kurven treten durch eine dämpfende Wirkung des Bauteils auf.

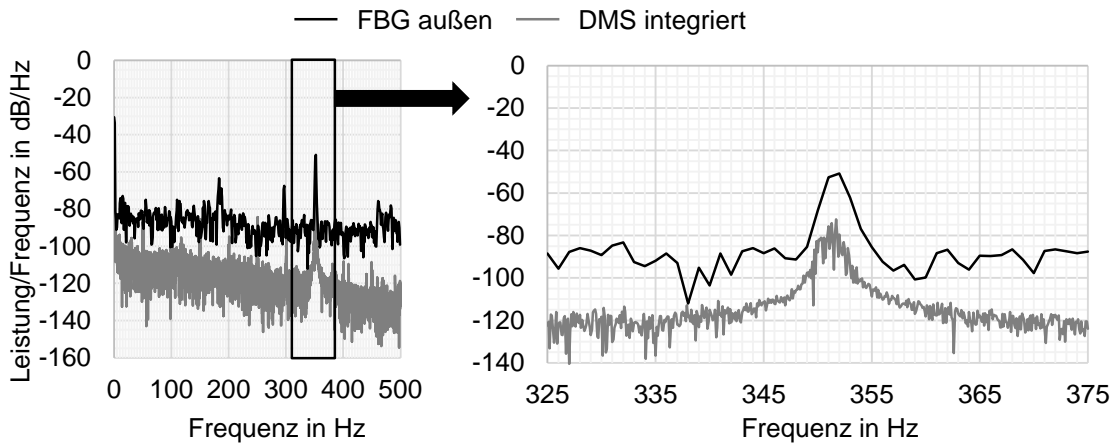


Abbildung 103: Spektrale Leistungsdichten des FBG-Sensors und des im Strömungsrechen integrierten DMS im Prüfaufbau unter einer beaufschlagten Schwingung von 350 Hz.

Weitere Details zum Anwendungsbeispiel Strömungsrechen können BINDER ET AL. (2022b) entnommen werden.

7.1.4 Sensorüberwachtes Zahnrad

Als weiteres Anwendungsbeispiel wird ein sensorüberwachtes Zahnrad konzipiert und gefertigt (vgl. spezifische Prozesskette in Abbildung 104).

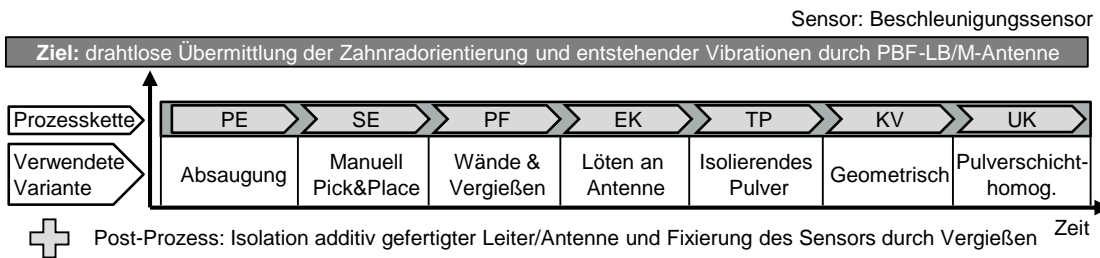


Abbildung 104: Spezifische Prozesskette des sensorüberwachten Zahnrads.

Anwendung: Bei dem Anwendungsfall handelt es sich um ein geradzahntes Zahnrad vom Typ C mit einem Kopfdurchmesser von 118 mm, einem Bohrungsdurchmesser von 40 mm, 24 Zähnen und einem Normalmodul von 4,5. Das Zahnrad ist eine typische Zahnradprüfgeometrie und für eine Belastung von 250 Nm bei 3000 U/min ausgelegt. (SCHMITT ET AL. 2019) Dieses Zahnrad sollte erweitert werden, um in dessen Inneren Schwingungs- und Lagedaten durch einen Sensor batterieless generieren zu können und mittels einer additiv aufgebauten RFID-Antenne an einen externen Empfänger zu senden.

Umsetzung: Eine außen am Zahnrad angebrachte Dipolantenne sollte mit einer gut geschützten Sensoreinheit im Inneren des Zahnrads kombiniert werden. Auf diese Weise lassen sich negative Abschirmungseffekte auf die elektromagnetischen Wellen reduzieren und die leistungsfähigere UHF-RFID-Technologie (größere Reichweite und schnellere Übertragungsrate als LF) genutzt werden. (BINDER ET AL. 2022a)

Die Zahnradfertigung wurde auf einer PBF-LB/M-Maschine vom Typ EOS M290 unter Verwendung des Pulvermaterials 16MnCr5 durchgeführt. Zur Umsetzung und Validierung des Konzepts wurden ein UHF-Reader PulsarMX, ein KX122-Drei-Achsen-Beschleunigungsmesser und ein UHF-RFID-IC-Rocky100-Chip verwendet. Die verwendete, auch im PBF-LB/M-Prozess aufgebaute, UHF-Antenne wurde, unter Berücksichtigung der entsprechenden metallischen Umgebungsbedingungen, simuliert und konzeptioniert.

Um die Beschleunigungsdaten im Inneren des Zahnrads erzeugen zu können und die elektronische Leiterplatte vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit oder Öl zu schützen, wurde ein Hohlraum für die Sensorintegration entworfen. Die Elektronik konnte während einer Unterbrechung des PBF-LB/M-Prozesses in den Hohlraum eingelegt werden (vgl. Abbildung 105 b)). Die Leiterplatte ist so gestaltet, dass sie während der Prozessunterbrechung mit der additiv aufgebauten Antenne elektrisch verbunden werden kann (siehe auch BINDER ET AL. (2022a)).

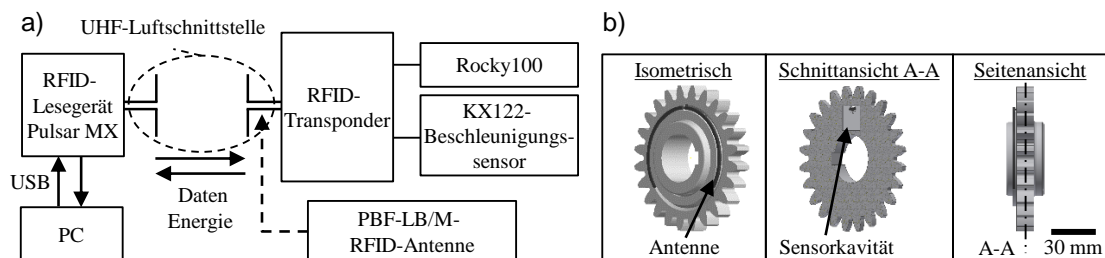


Abbildung 105: a) Skizze der geplanten RFID-Kommunikation zwischen Lesegerät und dem im Zahnrad integrierten RFID-Transponder b) Umsetzungskonzept des Zahnrads mit extern liegender Antenne in Kombination mit der internen Sensor-kavität.

Zur Herstellung des Zahnrads wurde der PBF-LB/M-Prozess gestartet und an definierter Stelle unterbrochen (Abbildung 106, a)). In dem zuvor aufgebauten Teil wurde durch Entfernen von Pulver ein Hohlraum geschaffen (b) und die Leiterplatte eingesetzt (c). Die additiv gefertigte Antenne wurde manuell mit der Sensorplatte im Hohlraum verlötet (c). Anschließend wurde der Hohlraum wieder

mit Pulver verschlossen (d) und die Herstellung des Zahnrads war abgeschlossen (siehe auch Anhang, Abbildung 122).

Nach dem Fertigungsprozess wurde das fest mit der Bauplattform verschweißte Getriebeteil zur Restpulverentfernung in eine Entpulverungsmaschine (SFM-AT200) gelegt. Nach diesem Prozessschritt sind die Stützstrukturen und die die Antenne umgebenden Aussparungen im Zahnrad frei von Metallpulver. Durch eine Gießöffnung wurde Isoliermasse (Epoxidharz) in das Zahnrad gegossen und somit die Antenne, die Leiterbahnen und die Leiterplatte vom umgebenden Metall isoliert (vergleiche auch Skizzen: Anhang, Abbildung 122 bzw. Abbildung 38). Nach 24 Stunden war die Masse ausgehärtet und fixierte nun auch die elektrischen Teile an ihrer Position. Nachdem der Isolator ausgehärtet war, wurde das gesamte Bauteil durch Drahterodieren von der Bauplattform getrennt. Die Antenne ist nun nicht mehr über die Bauplattform elektrisch mit dem Zahnrad verbunden, sondern zusammen mit den anderen elektrischen Komponenten des Bauteils isoliert (vgl. Abbildung 106).

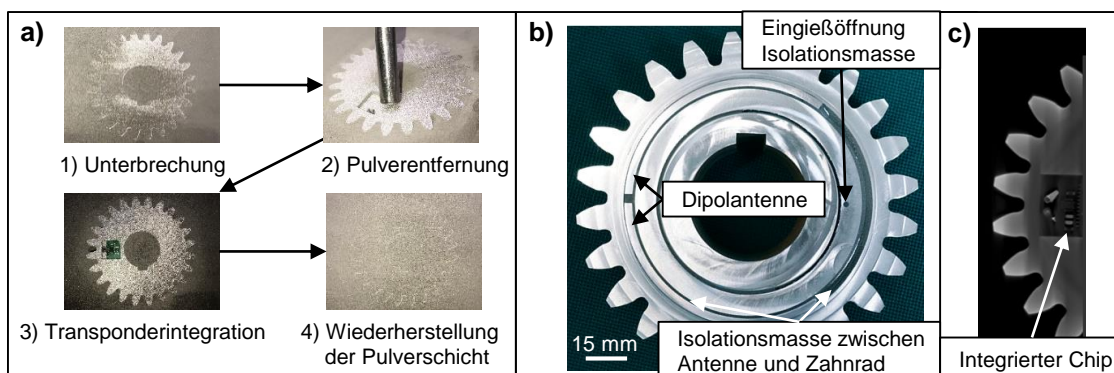


Abbildung 106: a) Schrittweise Fertigung zur Integration des PCB während der Prozessunterbrechung; b) Fertiggestelltes Zahnrad mit additiv gefertigter Antenne und eingegossener Isolation; c) CT-Scan zur Verifikation der richtigen Lage des integrierten Chips.

Bewertung: Die Funktion des sensorüberwachten Zahnrads wurde durch Überprüfung der Auslesbarkeit der Daten sichergestellt. Bei einem Abstand von 1 cm zwischen Antenne und Zahnrad können die Daten zuverlässig ausgelesen werden, auch wenn sich das Zahnrad dreht (siehe Abbildung 107, a)). Das Zahnrad wurde mit einer Geschwindigkeit von ca. 360°/Minute gedreht und die daraus resultierenden, drahtlos übertragenen Werte ausgelesen. Wie in Abbildung 107 b) zu sehen ist, wurden für die Beschleunigung in x- und y-Richtung unter Rotation zwei

um $\pi/2$ gegeneinander verschobene Sinuskurven erzeugt, während die Beschleunigung in z-Richtung bei 0 stagniert. Diese Werte sind plausibel und entsprechen den Erwartungen an ein rotierendes Zahnrad, womit die korrekte Funktion des Systems bestätigt wird. Die Auswertefrequenz der Daten ist jedoch systembedingt recht gering, sodass eine Erprobung bei höheren Drehzahlen nicht möglich ist.

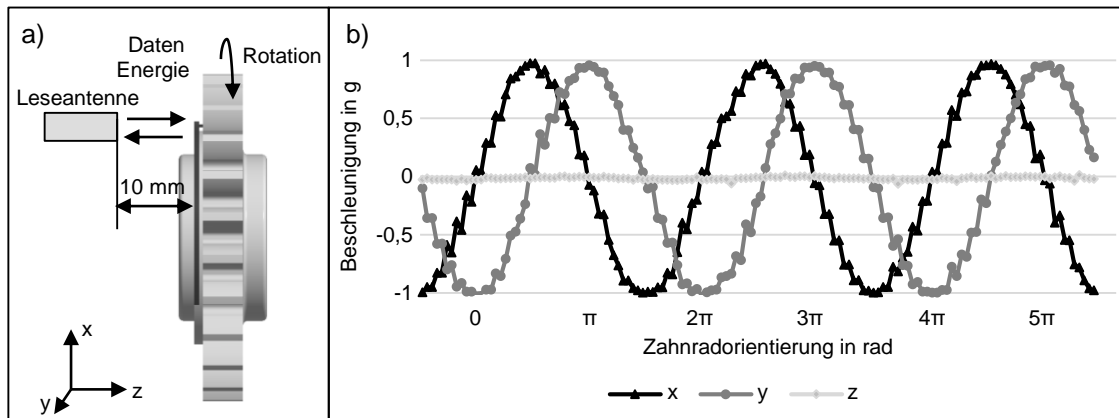


Abbildung 107: a) Schematische Darstellung des Prüfaufbaus mit statischer Leseantenne; b) drahtlos übermittelte Sensordaten des KX122 Beschleunigungssensors (Werte der Beschleunigung in $g = 9,61 \text{ m/s}^2$ in Abhängigkeit des Zahnradrehwinkels in rad).

Um in Zukunft eine Schwingungsüberwachung des Bauteils zu ermöglichen und die Daten zu Genüge bei hohen Zahnradrehzahlen erfassen zu können, müssen die Schwingungen jedoch mit einer höheren Frequenz erfasst und übertragen werden. Das in dieser Arbeit vorgestellte System ist zwar in der Lage, Daten mit einer Frequenz von 1-2 Hz zu übertragen, allerdings ist es für die Schwingungs-/Drehzahlmessung wünschenswert $> 1000 \text{ Hz}$ auflösen zu können, da sonst die relevanten und hochfrequenten Schwingungen nicht aufgelöst werden. Erste Ansätze zur Bewältigung dieser Herausforderung sind bereits vorhanden und beinhalten die Verwendung eines Transponders mit interner Steuerung (HEINIG 2020). So können 1 kHz-Schwingungsdaten auf dem Transponder aufgezeichnet und in einem Rhythmus von 10 s (nicht kontinuierlich) an einen externen Empfänger gesendet werden oder die Auswertung kann dezentral im Transponder erfolgen. Weitere Details zur Konzeptionierung und Herstellung des sensorüberwachten Zahnrad können BINDER ET AL. (2022a) entnommen werden.

7.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse

In diesem Abschnitt soll in den verschiedenen Szenarien der sensorintegrierten Anwendungsbauteile die Herstellung monetär bewertet werden. Gemäß Abschnitt 1.5 konzentriert sich diese Arbeit ausschließlich auf Anwendungsbeispiele, in welchen sich die Anwenderin aus verschiedensten möglichen Beweggründen für die additive Fertigung und gegen eine konventionelle Herstellung entschieden hat. Daher konzentriert sich der wirtschaftliche Vergleich auf den Einsatz der manuellen und der automatisierten Sensorintegration. Im Konkreten soll auf die folgenden Fragen eine Antwort gefunden werden:

- 1) Welche zusätzlichen Kosten sind durch die Sensorintegration zu erwarten im Vergleich zum reinen AM-Bauteil?
- 2) Wie unterscheiden sich die manuelle und automatisierte Integration wirtschaftlich?
- 3) Ab welcher Stückzahl rechnet sich die automatisierte Sensorintegration im Vergleich zur manuellen?

In Tabelle 8 sind Angaben hinterlegt, welche die Basis der Berechnungen bilden. Für die Kosten der Sensoren (K_{Sensor}) ist jeweils nur ein Anbieter angefragt worden, da es sich um spezielle Sensorsysteme handelt und diese nur schwer mit anderen Produkten vergleichbar sind. Für die Metallpulver hingegen ist jeweils ein aus mindestens drei Angebotspreise gebildeter Mittelwert angegeben. Es werden die durch KAMPS (2018) angegebenen Kosten für Maschinenstundensatz und Schutzgaskosten verwendet. PBF-LB/M-Systeme konnten eine Kostensenkung erfahren durch günstigere zur Verfügung stehende Lasersysteme oder neue Anlagenanbieter aus Asien. Zudem ist es mittlerweile üblich Schutzgas (Stickstoff) kostengünstig durch Generatoren in ausreichender Güte herzustellen. Die Werte sind weiterhin plausibel, wenn man die verringerten Kosten mit einer Teuerungswirkung durch Inflation aufwiegt.

Tabelle 8: Basisdaten aus Angeboten und Literatur.

Allgemeine Angaben	Wert	Einheit	Quelle
Sensoren			
Kosten LF-RFID-Tag	55,97	€	Angebot
Kosten DMS	58,90	€	Angebot
Kosten Pt100	3,80	€	Angebot
Kosten Rocky-Chip	25,07	€	Angebot
Pulverkosten			
AlSi10Mg	82,96	€/kg	Angebote
316L	46,84	€/kg	Angebote
IN718	99,08	€/kg	Angebote
16MnCr5 / 20MnCr5	35,24	€/kg	Angebote
Materialdichten			
AlSi10Mg	2,68	g/cm ³	Datenblatt
316L	8,00	g/cm ³	Datenblatt
IN718	8,19	g/cm ³	Datenblatt
16MnCr5 / 20MnCr5	7,85	g/cm ³	Datenblatt
Anlagenbetrieb			
Kosten Anlagenbediener	91,50	€/h	Angebot
Maschinenstundensatz	26,90	€/h	Kamps 2018
Kosten Schutzgas	2,14	€/m ³	Kamps 2018

Um möglichst belastbare Preise für die Herstellung von metallischen AM-Bauteilen liefern zu können, werden, wie auch durch SCHNECK ET AL. (2020) und SCHNECK (2021) empfohlen, als Beurteilungsbasis Dienstleister-Angebote eingeholt und für jedes Bauteil gemittelt angegeben. So kann eine möglichst hohe Validität der realen Kosten sichergestellt werden. Die Angebote werden anhand der CAD-Daten und des verwendeten Materials erstellt und sind in Tabelle 9 gelistet. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass bei einer unternehmensinternen Fertigung sich laufende Kosten und die Anlagenauslastung der Systeme gleich verhalten, wie bei einer externen Produktion. Daher kann angenommen werden, dass AM-Bauteile intern kostengünstiger produziert werden können, da Gewinnmargen, administrative Kosten und Logistikkosten entfallen. In einer Make-or-Buy-Analyse wurden durch SCHNECK (2021) für ein AM-Injektionsbauteil im Schnitt um 47 % geringere anfallende Kosten ermittelt, als bei einem Kauf (Buy) beim externen Dienstleister. Da die extern angeforderten Angebote, auf welchen die Kostenkalkulation dieser Arbeit beruht, ohne Rabatte oder etablierte Geschäftsbeziehungen erstellt wurden, sind um 47 % geringer ausfallende Kosten plausibel und werden daher auf dieses Szenario übertragen (vgl. Tabelle 9). Hierbei wird davon ausgegangen, dass im Falle Make eine Anlage genauso ausgelastet werden kann wie bei einem Dienstleister. Bezüglich zu berücksichtigender Skalierungseffekte für die additive Fertigung geht die Literatur von keiner bzw. von nur

einer geringeren Kostensenkung bei steigenden produzierten Stückzahlen aus (NIKOLAY & KOLLENBERG 2020, BALDINGER 2016, RUFFO ET AL. 2006). Da dennoch Skalierungseffekte für personelle Aufwände (Routineeffekte) und Materialkosten erwartbar sind wird ein geringer Skalierungseffekt angenommen. Jede Erhöhung der Anzahl der produzierten Bauteile um den Faktor 10, folgt eine angenommene Reduktion der Kosten von 10 % (Kosten pro Teil).

Tabelle 9: Gemittelte Preise zur additiven Herstellung der genannten Bauteile durch Dienstleister für die Stückzahl 1 (nur additive Fertigung, keine Sensorintegration).

Komponente	Material	Volumen	AM-Bauteil (1-Stück)	
			Basis: Kosten Buy	Kosten Make (-47 %)
RFID-Ring	316L	3,09 cm ³	215,13 €	114,76 €
Strömungsrechen	IN718	24,89 cm ³	1.051,00 €	560,65 €
Gaspedal	AlSi10Mg	75,99 cm ³	495,71 €	264,43 €
Zahnrad	16MnCr5 / 20MnCr5	175,62 cm ³	2.052,44 €	1.094,86 €

Im nächsten Schritt werden im Rahmen einer Baujobanalyse die Ist-Zeiten für Einzelschritte der manuellen Sensorintegration bestimmt (vgl. Tabelle 10). Im Falle einer routinierten Mitarbeiterin, welche die Integration durchführt, werden 17 min und 11 s für die Sensorintegration benötigt (experimentell gestoppte Zeit). Es wird in dem Szenario davon ausgegangen, dass die Mitarbeiterin, sobald die Unterbrechungsschicht erreicht wird, sofort zur Verfügung steht und es zu keinen Wartezeiten kommt. Es wird zudem angenommen, dass bei der Sensorintegration ein Pulver-Nassabscheider zum Einsatz kommt, sodass es zu zusätzlichen Pulververlusten von 4 cm³ pro Kavität im Bauteil kommt. In Tabelle 10 ist gezeigt wie sich die Erhöhung von einer Sensorintegration auf zehn Sensoren im Baujob (eine Unterbrechungsebene) auf die Integrationszeit pro Bauteil auswirkt. Die Datenbasis hierfür wird durch die Analysen aus Abschnitt 6.3 gebildet.

Tabelle 10: Abschätzung der Aufwände bei einer manuellen Sensorintegration für ein und zehn sensorintegrierte Bauteile pro Baujob.

Manuelle Integration	Basis	1x Bauteil pro Job	10x Bauteile pro Job
Personalbedarf/Anlagenzeit (Summe Baujob)		17 min 11 s	40 min 53 s
Anlegen Schutzausrüstung	59 s	1x	1x
Anlage öffnen	1 min 1 s	1x	1x
PE	1 min 39 s	1x	10x
SE, PF	46 s	1x	10x
EK	13 s	1x	10x
TP, KV, UK	53 s	1x	1x
Bauprozess fortsetzen	10 min 35	1x	1x
Schutzausrüstung ablegen	1 min 5 s	1x	1x
Personalbedarf/Anlagenzeit pro Bauteil		17 min 11 s	4 min 5 s
Pulververlust	4 cm ³ /Kavität	1x	10x

Legende: PE Pulverentfernung, SE Sensor einlegen, PF Position fixieren, EK Elektrische Kontaktierung, TP Temperatur- und Pulverschutz, KV Kavitätsverschluss, UK Unterbrechungskompensation

In Tabelle 11 sind Basisdaten für die automatisierte Fertigung der RFID-Ringe hinterlegt. Auch hier werden die Zeiten des Personalbedarfs bzw. der Maschinenstundensätze bestimmt. Es wird in diesem Falle davon ausgegangen, dass das Pulver bei einer automatisierten Sensorintegration zurückgewonnen werden kann (vgl. Kapitel 7).

Bei der automatisierten Sensorintegration fallen Skalierungseffekte hinsichtlich der Integrationszeit innerhalb eines Baujobs geringer aus als bei händischer Arbeit. Während sich bei der manuellen Integration die Kosten des Schutzgases $K_{\text{Schutzgas}}$ zum Fluten der Prozesskammer auf die gefertigten Bauteile aufteilen lässt, entfällt ein solcher Effekt durch Automatisierung. Im Falle der Automatisierungslösung ist es aus wirtschaftlicher Sicht zudem sinnvoll, möglichst viele sensorintegrierte Bauteile zu fertigen, um die hohen Investitionskosten für die Kinematik verteilen und abschreiben zu können. Gemäß Tabelle 11 sind, alleine für die Sensorintegration, im Falle von zehn produzierten Bauteilen pro Jahr $K_{\text{AM-Sensorbauteil}} = 650 \text{ €} / \text{Bauteil}$ an Fertigungskosten zu erwarten. Inwieweit Skalierungseffekte die zeitlichen Aufwände pro Bauteil reduzieren, wird in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Abschätzung der Aufwände bei einer automatisierten Sensorintegration für ein und zehn sensorintegrierte Bauteile pro Baujob (jeweilige Annahme: zehn Bauteile werden pro Jahr gefertigt).

Automatisierte Integration	Basis	1x Bauteil pro Job	10x Bauteile pro Job
Personalbedarf/Anlagenzeit (Summe Baujob)		2 min 10 s	12 min 40 s
Sensormagazin befüllen	10 s	1x	10x
Sensorkoordinaten festlegen	1 min	1x	10x
Abrüsten Anlage Extrazeit	1 min	1x	1x
Sachkosten			
Investkosten Kinematik	30 000 €		
Softwareeinbindung	5 000 €		
Wartung Kinematik	5 %		
Abschreibungszeitraum	7 Jahre		
Durchführung Sensorintegration (Anlagenzeit)			
PE	29 s	1x	10x
SE, PF	12 s	1x	10x
EK	10 s	1x	10x
TP, KV, UK	21 s	1x	1x
Sachkosten pro Bauteil		650 €	650 €
Anlagenzeit pro Bauteil		2 min 22 s	2 min 3 s
Personalzeit pro Bauteil		2 min 10 s	2 min 10 s

Auf Basis der in Tabelle 11 angenommenen Daten lassen sich die Fertigungskosten in den verschiedenen Szenarien bestimmen (vgl. Anhang A5, Tabelle 41). Es wird angenommen, dass es nicht sinnvoll ist, weniger als zehn RFID-Ringe pro Jahr zu fertigen und maximal 10 000 Ringe pro Jahr auf einer Anlage gefertigt werden könnten.

Kosten der Anwendungsbeispiele: Gemäß Formel (7-1) setzen sich die Kosten für das gesamte Bauteil $K_{AM_Sensorbauteil}$ aus den Kosten für das AM-Bauteil $K_{AM_Bauteil}$, dem Sensor und den Aufwänden der Integration $K_{Integration}$ zusammen. $K_{Integration}$ wird wiederum gebildet aus den zeitabhängigen Personalkosten $K_{Personal}$ und Maschinenkosten $K_{Maschine}$, den zusätzlichen Kosten für Schutzgas $K_{Schutzgas}$ und Pulver K_{Pulver} , sowie den anteiligen Kosten der Kinematikinvestition $K_{Kinematik}$ (Formel (7-2)). In den Kosten der Kinematik werden Abschreibungszeitraum sowie Wartungskosten und Softwarekosten mitberücksichtigt.

$$K_{AM_Sensorbauteil} = K_{AM_Bauteil} + K_{Sensor} + K_{Integration} \quad (7-1)$$

$$K_{Integration} = K_{Personal} + K_{Maschine} + K_{Schutzgas} + K_{Pulver} + K_{Kinematik} \quad (7-2)$$

In Abbildung 108 ist dargestellt, wie sich die Kostenstruktur des AM-Bauteils RFID-Ring für Stückzahlen von zehn bis 10 000 pro Jahr verhalten (vgl. Anhang A5, Tabelle 41). Während bei der manuellen Sensorintegration die Kosten des AM-Bauteils stets über 50 % der Gesamtkosten betragen, fallen bei niedrigen

Stückzahlen bei der automatisierten Sensorintegration die Investitionskosten für die Kinematik ins Gewicht. In diesem Szenario ist ab einer Stückzahl von 986 RFID-Ringen pro Jahr die automatisierte Sensorintegration wirtschaftlicher als der manuelle Prozess. Zudem wird erkennbar, wie wesentlich die Kosten des Sensors und des AM-Bauteils ins Gewicht fallen. Da der Ring in einem realen Szenario individuell und wesentlich filigraner ausgelegt werden könnte, wird davon ausgegangen, dass die Fertigungskosten für das Teil noch einmal reduziert werden könnten (geschätzt -30 % bis -50 %). Auch für die RFID-Tags lassen sich noch wesentlich kostenreduziertere Lösungen finden (geschätzt -70 %), da nach Angaben des Herstellers aufgrund der niedrigen beschafften Stückzahl an Tags ein erheblicher Preisaufschlag veranschlagt wird.

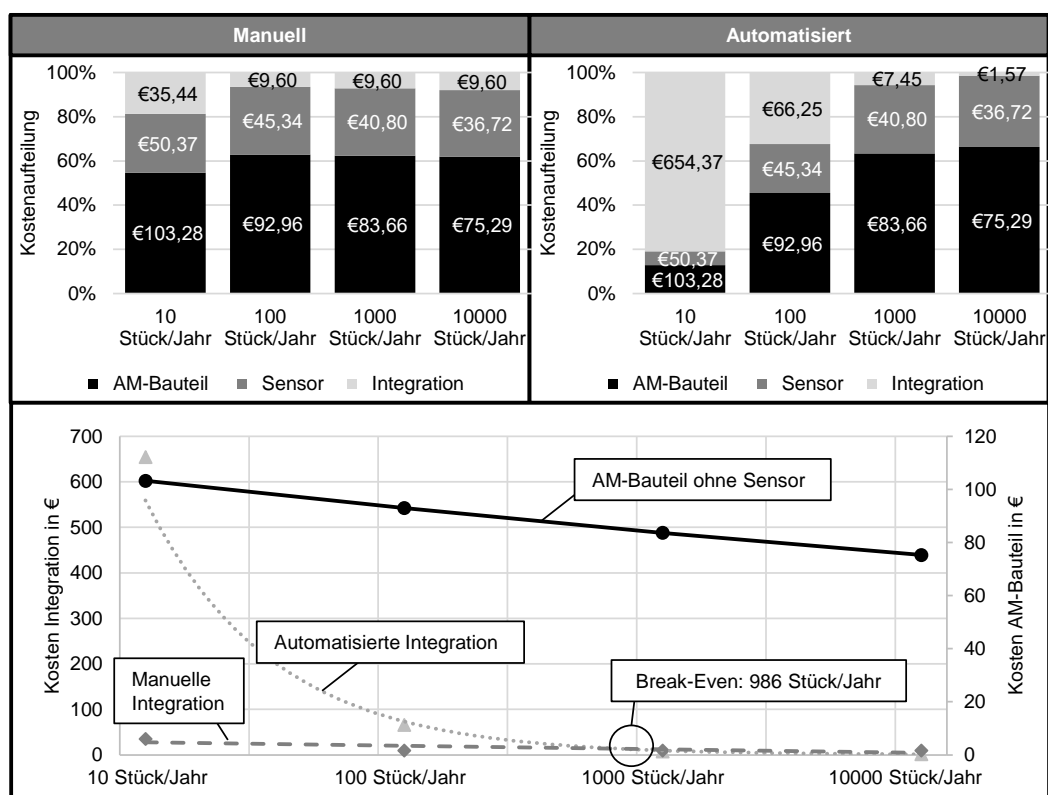


Abbildung 108: Visualisierung der Kostenstruktur der sensorintegrierten Bauteile für die manuelle und automatisierte Sensorintegration exemplarisch dargestellt für die Fertigung des RFID-Rings.

In Tabelle 12 sind die unter den genannten Annahmen berechnete Kosten aller Anwendungsbeispiele gelistet. Die Verteilung der Kostenarten verhält sich bei den Beispielen Strömungsrechen, Gaspedal und Zahnrad vergleichbar mit denen des RFID-Rings (vgl. Abbildung 108).

Tabelle 12: Skalierungseffekte auf die Bauteilkosten für die manuelle und automatisierte Sensorintegration.

Kosten AM-Bauteil mit integriertem Sensor (pro Bauteil)								
Komponente	10 Stück/Jahr		100 Stück/Jahr		1000 Stück/Jahr		10000 Stück/Jahr	
	Manuell	Automatisiert	Manuell	Automatisiert	Manuell	Automatisiert	Manuell	Automatisiert
RFID-Ring	189,10 €	808,02 €	147,89 €	204,54 €	134,06 €	131,92 €	121,61 €	113,59 €
Rake	593,64 €	1.211,96 €	512,04 €	568,09 €	461,86 €	459,11 €	416,70 €	408,06 €
Gaspedal	336,40 €	952,96 €	229,22 €	283,52 €	207,50 €	202,99 €	187,94 €	177,56 €
Zahnrad	1.043,59 €	1.662,30 €	916,96 €	973,39 €	826,25 €	823,88 €	744,60 €	736,36 €

Vergleich mit konventioneller Fertigung

Um die AM-Bauteilkosten auch mit einer konventionellen Herstellung durch Fräsen vergleichen zu können, wurden auch diese Kosten in Abbildung 108 dargestellt (vgl. auch Anhang, Tabelle 42). Bei dem Vergleich wird schnell ersichtlich, dass die Herstellung durch 3D-Druck für das Bauteil ohne Sensorik um ein Vielfaches teurer ist als durch ein konventionelles Verfahren (6- bis 11-facher Preis, abhängig von Stückzahl). Schwerer abbildbar sind in einem konventionellen Verfahren jedoch die Herstellung von Kavitäten und Hinterschnitten im Metallteil. Eine Sensorintegration dieser Art durch konventionelle Verfahren muss noch intensiver untersucht werden, um eine valide Abschätzung der Machbarkeit und vollumfänglichen Kostenstruktur geben zu können. Aufgrund der hohen Kostendifferenz des Bauteils ohne Sensor ist jedoch anzunehmen, dass sich ein kostengünstigerer Herstellungsprozess mit konventionellen Verfahren umsetzen lässt als durch additive Fertigung. Es sollte daher, wie auch bereits in der Einleitung erklärt, nur dann ein additives Fertigungsverfahren angewendet werden, wenn dieses wesentliche Mehrwerte im Vergleich zu konventionellen Verfahren bietet, welche die genannten Mehrkosten aufwiegen (vgl. Abbildung 3).

Resümee

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung spiegelt idealisierte Zustände der manuellen Integration wieder. Eine stetige Verfügbarkeit von Personal, welche ohne Verzögerungen an der Anlage den Vorgang durchführt, wird vorausgesetzt. Zudem ist das Risiko von **menschlichen Einflüssen** (z. B. personenabhängige Differenzen in der Qualität) nicht mit betrachtet. In der Realität muss mit erheblich mehr Planungsaufwand gerechnet werden, um Totzeiten an der Anlage zu vermeiden. Des Weiteren lassen sich die Kapazitäten an der Anlage nur eingeschränkter nutzen, wenn beispielsweise eine Fertigung über das Wochenende, bei manueller Sensorintegration, keine Baujobunterbrechung enthalten darf, da sonst die Anlagenkapazitäten nicht genutzt werden kann. Im Gegenzug wird auch das Risiko eines Ausfalls der Kinematik nicht berücksichtigt. Eine Verschiebung des Break-Even-

Punkts, ab welchem die automatisierte Fertigung die manuelle kostentechnisch unterschreitet, zu geringeren Stückzahlen ist damit erwartbar.

Neben der wirtschaftlichen Fertigung spielt auch das Kriterium **Qualität** eine weiterhin wichtige Rolle. Gleichbleibende Prozesse mit wenig Risiko oder Prozessschwankungen sind unabdingbar für die rigiden Regelungen der Bauteilzertifizierung für Branchen wie der Luftfahrt oder der Medizintechnik. In diesem Fall steht das Argument der Wirtschaftlichkeit weniger im Vordergrund als es beispielsweise von einem Konsumersegment wie der Schmuckindustrie zu erwarten wäre. Negative Effekte durch eine Prozessunterbrechung, welche sich von Baujob zu Baujob verändern und schwer quantifizierbar sind, sollten demnach für viele Branchen nach Möglichkeit vermieden werden.

Die größten Hebel zur Senkung der **Kosten** liegen im AM-Bauteil selbst (vgl. Abbildung 108). Es wird erwartet, dass durch eine gezieltere Auswahl und Verhandlung mit Zulieferern der Preis pro Teil, vor allem für die Sensoren, aber auch das Metallpulver, noch einmal nach unten korrigiert werden kann. Zusätzliche Kosten durch Nachbearbeitungsschritte sind häufig zu erwarten und wurden im Rahmen der Analyse nicht betrachtet.

7.3 Fazit

Es wurde für vier Anwendungsbeispiele gezeigt, dass durch manuelle und automatisierte Sensorintegration funktionsfähige „Smart Parts“ aus relevanten Anwendungsbereichen gefertigt werden können. Zeitgleich wurden jedoch auch die aktuellen Limitationen des Sensorintegrationsprozesses ersichtlich: Die integrierten Sensoren können nur mit Positionierungsgenauigkeiten im Zehntel-Millimeterbereich integriert werden, da der AM- und der Sensoreinlegeprozess toleranzbehaftet sind. Die Ankontaktierung der Sensordrähte an AM-Leiterbahnen mittels PBF-LB/M-Lasersystem ist möglich. Jedoch schafft auch hier die Einlegetoleranz Unsicherheiten bei den Kontaktstellen, sodass im Worst-Case Sensor- und AM-Leiterbahnen nicht erfolgreich verschaltet werden können. Des Weiteren bedarf es noch Optimierungen bei batterielosen, funkbasierten Sensorsystemen, sodass mit hohen Frequenzen (=hoher Datenübertragungsrate) Daten aus Bauteilen gesendet werden können. Dies ist zum aktuellen Stand der Technik ein Problem für die gezeigte Zahnradanwendung aus Unterabschnitt 7.1.4, da eine höhere Datenauflösung für das Anwendungsbeispiel notwendig ist, derartige technische Lösungen jedoch nicht bekannt sind.

Des Weiteren konnten die Unterschiede der Wirtschaftlichkeit von manueller und automatisierter Sensorintegration dargestellt werden. Durch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde ersichtlich, dass der automatisierte Prozess für alle betrachteten Bauteile bei einer ungefähren Stückzahl von 1000 Teilen monetäre Vorteile gegenüber der manuellen Integration bringt. Dem ist der Fall, da für alle Bauteile der gleiche Kostenskalierungseffekt bei einer erhöhten Produktionsstückzahl angenommen wurde und die unterschiedlichen Integrationszeiten für die Anwendungsszenarien kostenseitig verhältnismäßig gering ins Gewicht fallen. Betrachtet man also unter den genannten Rahmenbedingungen ein weiteres, neues AM-Bauteil für die Sensorintegration, so ist auch hier ein Break-even von ca. 1000 Stück zu erwarten. Unter der Berücksichtigung der Kriterien Bauteilqualität und Personalverfügbarkeit/Anlagenauslastung, ist es jedoch sinnvoll, bereits auch bei kleineren Stückzahlen eine automatisierte Sensorintegration in Betracht zu ziehen und für dessen Herstellung zu nutzen.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Die Fertigungstechnik befindet sich aktuell im Wandel, sodass der Bedarf nach individualisierten, digitalen und multifunktionellen Komponenten im Fokus steht. So sollen Bauteile idealerweise durch flexible Fertigungsverfahren produziert werden, automatisiert hergestellt werden und in der Lage sein Sensordaten zu erfassen. Der aktuelle Stand der Technik lässt die Umsetzung dieses idealisierten Szenarios jedoch nur eingeschränkt zu. Produzierende Unternehmen fertigen weiterhin mit hohem Personaleinsatz und konventionellen Fertigungsverfahren und kombinieren lasttragende Bauteile nur zu einem begrenzten Level mit elektronischen Komponenten. Daher hatte diese Arbeit das Ziel, ein Vorgehen zu entwickeln, welches die Herstellung sogenannter Smart Parts durch elektrische Funktionsintegration unter Nutzung der Additiven Fertigung (AM) ermöglicht und so dem aktuellen technischen Innovationsbedarf in der Industrie begegnen kann. In diesem Rahmen wurde deshalb ein Prozessablauf für die Integration von Sensoren beim industriell weit verbreiteten pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) erarbeitet. Im Fokus lagen hierbei sowohl die Sensorauswahl, die Ermittlung und die Analyse kritischer Einflussgrößen, als auch die Qualifizierung von Prozessschritten durch Experimente. Anschließend wurden die gefundenen Lösungsschritte durch manuelle und durch automatisierte Sensorintegration validiert, sowie vier Anwendungsbauteile gefertigt und evaluiert. Durch die Vorstellung dieser Forschungsergebnisse wird dem Leser eine anwendungsunabhängige Möglichkeit aufgezeigt, wie lasttragende Bauteile um integrierte Sensorik erweitert werden können.

Vorangegangene Forschungsarbeiten beschäftigten sich bislang nur mit einzelnen anwendungsbezogenen Fragestellungen und konnten die Sensorintegration beim PBF-LB/M noch nicht gesamtheitlich in ein übergeordnetes Vorgehen einordnen. Daher wurde in dieser Arbeit eine holistische Sensorintegrationsprozesskette für das PBF-LB/M aufgestellt, welche die Fertigungsschritte systematisch und grundlegend analysiert und einordnet. Veranschaulicht und untermauert wurde der Ablauf der Prozessschritte durch Experimente mit Materialien und Sensoren, welche von hohem industriellen Interesse sind. So wurden materialseitig Aluminium-, Stahl- und Nickelbasislegierungen betrachtet, sensorseitig wurde der Betrachtungsfokus auf Temperatur- und Kraftsensorik gelenkt.

Da vor allem die Sensorsignalübertragung in vorangegangenen Arbeiten nur eine unzureichende Untersuchung erfahren hat, wurde dieser Aspekt fokussiert beleuchtet. Es wurde analysiert und gezeigt, wie Sensordaten durch die additive Fertigung von Leiterbahnen, durch die Nutzung von Antennentechnik, aber auch durch das Einlegen von vorgefertigten elektrischen Leitern übertragen werden können. So ist es gelungen in diesem Zuge ein neues und zum Patent angemeldetes Vorgehen zu entwickeln, welches die additive Fertigung von Leiterbahnen und die Ankontaktierung von eingelegten Sensoren an die AM-Leiter ermöglicht. Das in PBF-LB/M-Anlagen verbaute Lasersystem kann gut dafür genutzt werden, um Sensoren an AM-Leiterbahnen anzuschweißen. Durch eine aushärtbare, nachträglich in das Bauteil einzugießende Isolationsmasse können zudem elektrische Kurzschlüsse zwischen Metallbauteil und elektrischen AM-Leitern vermieden werden. Mit der Nutzung dieses Vorgehens kann eine Sensordatenauswertung bereits während dem additiven Fertigungsprozess erfolgen. Des Weiteren wurden mit Hilfe von Low-Frequency und Ultra-High-Frequency RFID-Techniken drahtlose Datenübertragungsmöglichkeiten betrachtet, experimentell untersucht und evaluiert. Es wurde einerseits gezeigt, dass RFID-Technik in der Lage ist, durch Metallwände zu kommunizieren, aber andererseits auch, wie eine UHF-Antenne auf einem Metallbauteil additiv gefertigt werden und anschließend Sensordaten übertragen kann.

In der Analyse der Sensorintegrationsprozesskette rückte die notwendige Prozessunterbrechung in den Fokus der Betrachtung. Während diese im bisherigen Stand der Technik wenig Beachtung gefunden hat, konnte in eigenen theoretischen und experimentellen Analysen ermittelt werden, dass diese durch thermische Veränderungen und abhängig von der Dauer der Unterbrechung kritisch für das gefertigte Bauteil sein kann. Die effektive Pulverschichtdicke in einer Unterbrechungsschicht kann sich in realistischen Szenarien von 123 % bis über 269 % erhöhen. Diese Erkenntnis lässt sich zudem auf den normalen PBF-LB/M-Prozess ohne Sensorintegration übertragen, sodass dieses Phänomen auch bei nicht beabsichtigten Baujobunterbrechungen auftreten kann und vermieden werden muss.

Weiterhin kann berichtet werden, dass erstmalig in dieser Arbeit eine automatisierte Sensorintegration während dem PBF-LB/M erfolgreich umgesetzt werden konnte. In vorangegangenen Arbeiten konnte eine Handhabungseinheit in der Prozesskammer einer PBF-LB/M-Anlage nur als wünschenswertes Ausblickszenario beschrieben, jedoch nicht umgesetzt werden. Eine Automationseinheit wurde so konzeptioniert und in den Prozessablauf integriert, dass während des Fertigungsprozesses automatisch Pulver aus einer Kavität abgesaugt, eine elektrische Komponente eingelegt und bei Bedarf an die AM-gefertigten elektrischen Leiterbahnen

angeschweißt werden kann. Darauffolgend kann durch verschiedene Kavitätsverschlusskonzepte die Aussparung wieder verschlossen und der PBF-LB/M-Prozess fortgesetzt werden. Die Vorteile und Differenzen zwischen manueller und automatisierter Sensorintegration wurden anschließend gegenüberstellend qualitativ, zeitlich und monetär evaluiert. So konnten wesentliche Unterschiede in den Prozessabläufen von manueller und automatisierter Sensorintegration aufgezeigt werden. Die automatisierte Fertigung von Smart Parts hat den wesentlichen Vorteil mit verkürzten Prozessunterbrechungen auszukommen. Zudem ist kein Öffnen der Prozesskammer notwendig, sodass die oxidationshemmende Schutzgasatmosphäre im System während der Unterbrechung erhalten werden kann. Das automatisierte Einlegen von Sensoren ist weiterhin wiederholgenauer als durch manuelle Handhabung und bietet mehr zeitliche Flexibilität, da der gesamte Prozessablauf ohne den menschlichen Eingriff auskommt, welcher nachts oder am Wochenende nur unter dem Einsatz von Schichtarbeit möglich ist. Außerdem können sich, abhängig von der zu fertigenden Bauteil-Stückzahl, schnell monetäre Vorteile für die Fertigung von Smart Parts einstellen.

Abschließend wurde durch die Umsetzung von Anwendungsbauteilen gezeigt, wie sich ein industrieller Mehrwert durch Nutzung des vorgestellten Vorgehens erzielen lässt. Neben der Fertigung eines RFID-Rings wurden ein sensorintegriertes Gaspedal, eine schwingungsüberwachte Strömungssonde und ein lageüberwachtes Zahnrad gebaut, deren Funktionsweisen nachgewiesen und deren Fertigungskosten in unterschiedlichen industriellen Szenarien miteinander verglichen.

8.2 Ausblick

Allgemein wird erwartet, dass der Trend zur Integration von Sensoren in Bauteile anhalten wird. Es sind Forschungsvorhaben (z. B. DFG 2305) bekannt, welche die Erweiterung von Maschinenelementen und -komponenten um Messgrößenaufnehmer im Fokus haben. Zudem wurde auch in einer aktuellen Delphistudie prognostiziert, dass eine Kernentwicklung der Additiven Fertigung in der Integration von elektrischen Komponenten und der MM-Verarbeitung liegt. Demnach wird erwartet, dass bis zum Jahr 2030 eine Vielzahl der additiv gefertigten Bauteile integrierte elektrische Komponenten beinhalten werden. (JIANG ET AL. 2017)

Das Ziel dieser Arbeit war es für die entsprechende Umsetzbarkeit von qualitativ hochwertigen sensorintegrierten PBF-LB/M-Bauteilen die richtige Sensorauswahl zu ermöglichen, die generelle prozesstechnische Umsetzbarkeit nachzuweisen –

manuell, wie auch automatisiert – als auch verschiedene Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Folgende avisierte Mehrwerte durch Sensorintegration sollten in der Zukunft noch tiefer untersucht werden:

- Umsetzung einer minimalen Bauteilschwächung und Filigranität der elektrischen Strukturen bei hoher Gesamtsystemrobustheit,
- eine enge Verzahnung des Sensorintegrationsansatzes mit anwendungsspezifischen Simulationen (z. B. Wärme, Akustik) sowie eine
- Integration der Technik in Langzeit- und Serienanwendungen, um mehr industrielle Erfahrung sammeln zu können und Vertrauen in die Technik zu schaffen.

Inhaltlich sollten zum einen Prozessunterbrechungen beim PBF-LB/M noch umfassender und materialabhängig analysiert werden, um anhand von festen Kriterien entscheiden zu können, inwieweit sich diese negativ auf die Bauteileigenschaften auswirken können. Idealerweise lassen sich feste Grenzwerte, in Abhängigkeit von dem Prozessparametersatz, der Unterbrechungszeit, dem Material und der Temperatur ermitteln, aus welchen sich die Kritikalität der Unterbrechung ableiten lässt. Zum anderen sollte die Verknüpfung der Sensorintegration mit einem MM-Prozess fokussiert betrachtet werden (BARETH ET AL. 2022). Dies bietet einerseits die Chance Isolatoren im AM-Prozess zu fertigen, aber auch Leiterbahnen aus einem noch besser geeigneten Material als dem Strukturmetall des Bauteils zu produzieren (vergleiche Ansatz in dieser Arbeit). Dadurch bietet sich auch die Chance Sensoren, wie Thermoelemente oder Dehnungsmessstreifen, additiv zu fertigen, welche auf die Verarbeitbarkeit zweier Materialien angewiesen sind (SINGER ET AL. 2021a). Durch den in dieser Arbeit vorgestellten Leiterbahnansatz, ließe sich die Fertigung von Sensoren auch ohne die additive Herstellung von Isolatoren gut umsetzen. In diesem Bereich sollte der weitere Fokus auf der Entwicklung von abgießbaren, hochtemperaturbeständigen Flüssigkeiten liegen (zum Beispiel auf aushärtbaren Keramikschlickern), welche eine geeignete Viskosität besitzen. Neben dem direkten Fertigen von sensorischen Strukturen, ist auch die Integration oder Herstellung von Aktoren unter Nutzung von magnetischen Materialien oder Form-Gedächtnislegierungen denkbar.

Ein weiterer Ansatz der Weiterentwicklung der automatisierten Sensorintegration ist ein performanteres Fertigungssystem, welches in der Lage ist Werkzeugwechsel durchzuführen, um beispielsweise eine umfassende In-Prozess-Funktionsprüfung der integrierten Sensoren vornehmen zu können. So ließe sich durch die Nutzung von Wirbelstromsensoren im Fertigungsprozess schichtweise die Bauteilqualität oder Sensoranbindung an das Bauteil prüfen.

Eine weitere Optimierung einer industriellen PBF-LB/M-Fertigungsanlage für die Sensorintegration, wäre eine optimierte Glove-Box-Handhabungsoption. In aktueller Anlagentechnik ist eine manuelle Integration von Sensoren via Glove-Box sehr schwierig, da ein Überdruck in der Kammer herrscht, welcher das Anziehen der Handschuhe im Anlagenbetrieb erschwert. Zudem sind die Handschuhe meist so dick, dass ein Arbeiten mit filigranen Teilen wie Sensoren schwierig ist. Die Sicht auf das Baufeld ist zudem nur aus einem bestimmten Winkel durch das Prozesskammerfenster möglich, sodass nicht sichergestellt werden kann, dass eine Kavität wirklich ausreichend von Pulver befreit wurde bzw. ein eingelegter Sensor korrekt positioniert ist. Außerdem fehlt es in den PBF-LB/M-Anlagen an einer Option zur Pulverabsaugung, ohne die Kammer öffnen zu müssen.

Die Nachbearbeitung von gefertigten sensorintegrierten Bauteilen sollte in naher Zukunft außerdem verstärkt betrachtet werden. Neben Schritten der Bauteilprüfung und der mechanischen Nachbearbeitung (zum Beispiel Fräsen) ist insbesondere der Umgang mit Wärmenachbehandlungen für ein sensorintegriertes Bauteil wichtig. Es könnten einerseits materialspezifische Prozesse entwickelt werden, sodass der Bedarf einer sensorschädigenden Wärmenachbehandlung entfällt. Andererseits sollte der Fokus auf der Entwicklung temperaturbeständiger Sensoren liegen, welche in der Lage sind Wärmenachbehandlungen unbeschadet zu überstehen.

Im Bereich der Integration weiterer Sensoren sollte sich auf die Integration von Fibre-Bragg-Grating-Sensoren zur Messung von Temperaturen, Kräften und Schwingungen konzentriert werden. Diese potenzialbehafteten Sensoren sollten nicht, wie bei in der Literatur beschriebenen Versuchen, mittels Lasersystem mit dem Bauteil verschmolzen, sondern eingelegt und nachträglich mit einem aushärtbaren Material abgegossen werden. Somit wäre eine Möglichkeit gefunden, um diese Technologie zur Temperatur-, Kraft- und Schwingungserfassung in komplexe Bauteile integrieren zu können.

Des Weiteren wäre es für die Integration von Sensoren beim PBF-LB/M zukünftig wichtig, mit den Sensorherstellern direkt zu kooperieren. So könnten geeignete Sensoren noch besser für die Integration beim PBF-LB/M zugeschnitten werden, durch zum Beispiel eine temperaturbeständige, keramische Einhausung des Sensors. Ein autonom arbeitendes Sensorsystem mit drahtloser oder Energy-Harvesting-Energieversorgung wäre zudem von großem Vorteil, da so der Bedarf einer direkten drahtbasierten Energieversorgung entfällt. Vor allem bei rotierenden und sich schnell bewegenden Elementen wäre dieser Ansatz vielversprechend. Durch

eine derartige Komplettlösung wäre die Hemmschwelle für Unternehmen wesentlich vermindert sensorintegrierter Bauteile in ihr Produktportfolio zu implementieren.

Es sollte zusätzlich angestrebt werden, anwendungsnahe Weiterentwicklungen der Sensorintegration in potenzialbehaftete Branchen zu adressieren. Als relevante Bereiche werden der Werkzeugbau, die Medizintechnik, die Messtechnik oder die Umsetzung von Greifersystemen angesehen. Können im Rahmen einer langfristigen Nutzung eines sensorintegrierten AM-Bauteils die genannten Vorteile manifestiert werden, kann dies die Akzeptanz des neuen Ansatzes beflügeln. Vor allem für regelbare Systeme sind Vorteile denkbar, da durch das Bauteil selbst geprüft werden kann, inwieweit eine eingestellte Soll-Größe einer am Bauteil anliegenden Ist-Größe entspricht. Dadurch ließe sich beispielsweise im Vorrichtungsbau die ungewollte Verformung von eingespannten Komponenten vermindern.

Neben den technischen und anwendungsbezogenen Fragestellungen, gilt es dafür zu sorgen, dass eine Sensorintegration in Metallbauteile nachhaltig und recycelbar durchführbar ist. In Zeiten strapazierter Lieferketten und dem gesellschaftlichen Bewusstsein von begrenzten materiellen Ressourcen, muss ein Produktlebenszyklus gesamtheitlich betrachtet werden. Insbesondere für Bauteile, welche aus unterschiedlichen Materialien gefertigt wurden, ist eine kostenarme, umweltschonende und nachhaltige Wiederaufbereitung der verwendeten Werkstoffe nach dem Produktlebensende eine der zentralen zukünftigen Herausforderungen. Hinzu kommt auch die Betrachtung von Reparaturmöglichkeiten von sensorintegrierten Bauteilen. Allgemein sollte der Ansatz verfolgt werden Sensoren von so hoher Robustheit und Zuverlässigkeit zu verwenden, dass ein Ausfall der elektrischen Komponente praktisch nicht auftritt, bzw. erst nach Lebensdauerende des Bauteils eintritt, sodass eine Reparatur vermieden wird. Für den Fall, dass es dennoch zu einem Defekt an dem Smart Part kommt, sollten Methoden für die Wiederaufbereitung des Bauteils entwickelt werden. Beispielsweise kann der beschädigte Bereich der Komponente (inkl. Elektronik) überfräst werden und anschließend nur an den bearbeiteten Stellen wieder additiv aufgebaut werden (hybride Fertigung plus Sensorintegration). Hierfür können Spannsysteme in PBF-LB/M-Bauplattformen kombiniert mit entsprechender Mess- und Datenverarbeitungstechnik zur korrekten Baujobvorbereitung und Laserpositionierung verwendet werden, wie sie z. B. LANGER ET AL. (2022) entwickeln.

9 Veröffentlichungsliste

- 2022 Schneider, M., Bettge, D., **Binder, M.**, Dollmeier, K., Dreyer, M., Hilgenberg, K., Klöden, B., Schlingmann, T., Schmidt, J., Reproducibility and Scattering in Additive Manufacturing: Results from a Round Robin on PBF-LB/M AlSi10Mg Alloy, *Pract. Metallogr.* 59 (2022), DOI: 10.1515/pm-2022-1018
- Schneider, M., Schlingmann, T., Schmidt, J., Bettge, D., Hilgenberg, K., **Binder, M.**, Klöden, B., A Round Robin Test To Investigate The Printing Quality Of PBF-LB/M Processed AlSi10Mg, *World PM 2022*
- Binder, M.**, Machnik, M., Bosch, M., Kreitz, K., Schlick, G., Seidel, C., In-situ Integration of Weldable Strain Gauges in Components Manufactured by Laser-based Powder Bed Fusion, *Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International*, Austin
- Binder, M.**, Yücel, O., Bareth, T., Schlick, G., Müller, A.v., You, J.H., Buschmann, B., Luca, R., Fanelli, P., Seidel, C., Influence of Powder Properties and Process Parameters on the High Temperature PBF-LB/M Manufacturability of Filigree Tungsten Components, *Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International*, Austin
- Förster, J., **Binder, M.**, Schlick, G., Seidel, C., Schilp, J., Robot-guided electrophotographic powder application for powder bed-based fusion of metals by means of laser beam, *Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International*, Austin
- Müller, A.v., Dorow-Gerspach, D., Balden, M., **Binder, M.**, Buschmann, B., Curzadd, B., Loewenhoff, T., Neu, R., Schlick, G., You, J.H., Progress in additive manufacturing of pure tungsten for plasma-facing component applications, *Journal of Nuclear Materials* 566, 2022, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153760
- Warnck, M, **Binder, M.**, Edelmann, G., Früchtl, M., Taha, I., Condition monitoring of multi-material light-weight components through a sensitive outer skin using Fiber-Bragg-Grating sensors, *V CIRP Conference on Biomanufacturing*, 2022, DOI: 10.1016/j.procir.2022.06.056
- Binder, M.**, Stapff, V., Heinig, A., Schmitt, M., Seidel, C., Reinhart, G., Additive Manufacturing of a passive, sensor-monitored 16MnCr5 steel gear incorporating a wireless signal transmission system, *55th CIRP CMS*, DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.016
- Bareth, T., **Binder, M.**, Kindermann, P., Seidel C., Implementation of a multi-material mechanism in a laser-based powder bed fusion machine, *55th CIRP CMS*, DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.025
-
- 2021 You, J., Bachmann, C., Belardi V., **Binder, M.**, et al., Limiters for DEMO wall protection: Initial design concepts & technology options, *Fusion Engineering and Design*, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112988
- Singer, C., Platt, C., Horn, M, **Binder, M.**, et al., Processability of Soda-Lime Glass in Laser- Based Powder Bed Fusion, *SFF Symposium 2021*, DOI: 10.26153/tsw/17597
- Foerster, J., Michatz, M., **Binder, M.**, et al., Electrostatic powder attraction for the development of a novel recoating system for metal powder bed-based additive manufacturing, *Journal of Electrostatics*, DOI: 10.1016/j.elstat.2021.103641
- Kindermann, P., Straßer, M., **Binder, M.**, et al., Fabrication of Sensor-Integrated Parts Using Cold Spray Additive Manufacturing, *Euro PM 2021 Proceedings*
-
- 2020 Müller, A.v., **Binder, M.**, Calabro, G., De Luca, R., Fanelli, P., Neu, R., Schlick, G., Vivio, F., You, J., Tailored tungsten lattice structures for plasma-facing components in magnetic confinement fusion devices, *Materials Today* 39, DOI: 10.1016/j.mattod.2020.08.015
- Binder, M.**, Fischer, M, Dietrich, S., Seidel, S., Reinhart, G., Integration of Strain Gauges in Components Manufactured by Laser-Based Powder Bed Fusion, *20th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry 2020 (MIC 2020)*, DOI: 10.2139/ssrn.3724097
- Geismayr, L., Schummer, F., Langer, M., **Binder, M.**, Schlick, G., Thermo-Mechanical Design and Analysis of a Multispectral Imaging Payload using Phase Change Material, *International Astronautical Congress*
- Binder, M.**, Leong, C., Anstatt, C., Schlick, G., Seidel, C., Reinhart, G., Effects of process interruptions on the microstructure and tensile properties of AlSi10Mg parts manufactured by Laser-Based Powder Bed Fusion, *11th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2020)*, DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.035
- Binder, M.**, Dirnhofer, C, Kindermann, P., Horn, M., Schmitt, M., Anstatt, C., Schlick, G., Seidel, C., Reinhart, G., Procedure and Validation of the Implementation of Automated Sensor Integration Kinematics in an LPBF System, *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS 2020)*, DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.090
- Horn, M., Prestel, L., Schmitt, M., **Binder, M.**, Schlick, G., Seidel, C., Reinhart, G., Multi-Material Additive Manufacturing – Recycling of binary Metal Powder Mixtures by Screening, *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS 2020)*, DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.098
- Schmitt, M., Kempter, B., Syed, I., Gottwalt, A., Horn, M., **Binder, M.**, Winkler, K., Schlick, G., Tobie, T., Stahl, K., Reinhart, G., *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS 2020)*, DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.089

- Binder, M.**, Anstatt, C., Schlick, G., Seidel, C., Wieland, R., Reinhart, G., In-situ Measurement of the Temperature Progression in Metal Components Manufactured by Laser-based Powder Bed Fusion, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, Berlin, ISBN: 978-3-8396-1521-8
-
- 2019 **Binder, M.**, Kirchbichler, L., Anstatt, C., Schlick, G., Reinhart, G., Design Concepts for the Integration of Electronic Components into Metal Laser-based Powder Bed Fusion Parts, CIRP Conference of Manufacturing Systems, 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS 2019), Ljubljana, Slovenia , DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.240
- Binder, M.**, Schönfeld, F., Anstatt, C., Schlick, G., Seidel, C., Reinhart, G., Radio-Frequency Identification of Metal AM Parts, Photonic Views 16, DOI: 10.1002/phvs.201900040
-
- 2018 **Binder, M.**, Anstatt, C., Raven, R., Schlick, G., Seidel, C., Reinhart, G., Automated Manufacturing of Mechatronic Parts by Laser-Based Powder Bed Fusion, Machining Innovations Conference 2018, Procedia Manufacturing 18:12-19, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.11.002
- Binder, M.**, Anstatt, C., Herzer, F., Horn, M., Schlick, G., Seidel, C., Schilp, J., Reinhart, G., Potentials and Challenges of Multi-Material Processing by Laser-based Powder Bed Fusion, Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International, Austin
- Binder, M.**, Illgner, M., Anstatt, C., Kindermann, P., Kirchbichler, L., Seidel C., Automated Manufacturing of Sensor-Monitored Parts: Enhancement of the Laser Beam Melting Process by a completely Automated Sensor Integration, Laser Technik Journal 15(3):36-39, DOI: 10.1002/latj.201800015
-
- 2017 **Binder, M.**, Schlick, G., Illgner, M., Laser Beam Melting of Complexly Shaped Honeycomb Structures, 3rd International MERGE Technologies Conference (IMTC), Chemnitz, DOI: 10.21935/tls.v1i2.84

Patentanmeldungen

Publikationsnummer	Erfinder	Titel
DE102021215050 A1	Binder, M. , Schlick, G.	Method and device for producing a component which has a plurality of regions with different material properties
DE102020214084 A1	Böhm, V., Binder, M. , Förster, J., Schlick, G., Singer, C. Warnck, M.	Component and method for electromagnetic monitoring of a component state
DE102020206664 A1	Binder, M. , Anstatt, C., Schlick, G.	Powder bed additive manufacturing method for producing a component with integrated conductor
DE102019133713 A1	Koopmann, J., Anstatt, C., Binder, M.	Powder Application device for binder jetting method

10 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Fraunhofer IGCV in den Jahren 2017 bis 2022 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur automatisierten Sensorintegration bei der additiven Fertigung untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende(r)	Studienarbeit / Beschäftigungsart
Abel, H.	Bachelorarbeit: Untersuchung zur Ankontaktierbarkeit und Isolation von eingelegten elektrischen Leitern an mittels Laserstrahlschmelzen gefertigte Leiterbahnen auf Basis eines automatisierten Einlegevorgangs
Bosch, M.	Bachelorarbeit: Konzept für die Integration von Dehnungsmessstreifen während des Fertigungsprozesses mittels Laser-Strahlschmelzen
Dirnhofer, C.	Bachelorarbeit: Entwicklung eines Kavitätsreinigungsmechanismus zum Einlegen mechatronischer Bauteile während des Laserstrahlschmelzprozesses
Edelmann, G.	Praktikant
Fischer, M.	Masterarbeit: Manuelle und automatisierte Integration von Sensoren in mittels Laserstrahlschmelzen gefertigte Metallbauteile
Käser, A.	Bachelorarbeit: Realisierung einer leiterbahnbasierten Signalübertragung mittels Laserstrahlschmelzen
Kindermann, P.	Masterarbeit: Konzeptionierung einer innovativen Einlegeeinheit für metallbasierten 3D-Druck
Kirchbichler, L.	Masterarbeit: Implementierung von mechatronischen Komponenten in additiv gefertigte, metallische Bauteile zur aktiven Funktionsintegration
Leong, C.	Praktikant und wissenschaftliche Hilfskraft
Neumann, T.	Bachelorarbeit: Automatisierte Integration von Sensoren in mittels Laser-Strahlschmelzen gefertigte Metallbauteile
Reisch, R.	Masterarbeit: Entwicklung und Automatisierung eines Handhabungssystems für eine Laserstrahlschmelzanlage zur In-situ-Integration mechatronischer Bauteile in Metallvollkörper
Rieser, A.	Bachelorarbeit: Hardware- und softwaretechnische Verknüpfung und Erprobung einer automatisierten Sensorintegrationseinheit mit einem Multimaterialmechanismus beim Laser-Strahlschmelzen
Schönfeld, F.	Bachelorarbeit: Integration von RFID-Komponenten in additiv gefertigte Metallbauteile
Soballa, B.	Bachelorarbeit: Konzeptionierung und Verifizierung einer Ankontaktierung von Sensorbauteilen in mittels Laserstrahlschmelzen gefertigte Bauteile auf Basis eines automatisierten Einlegevorgangs
Stapff, V.	Bachelorarbeit: Herstellung von Zahnrädern mit integrierten RFID-Vibrationssensoren durch additive Fertigung
Wieland, R.	Bachelorarbeit: Untersuchung des Temperatureinflusses auf eingelegte mechatronische Komponenten während des Laserstrahlschmelzens
Yücel, O.	Masterarbeit: Möglichkeiten und Grenzen des Aufbaus von Leiterbahnen aus AlSi10Mg durch das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl

11 Literaturverzeichnis

ABDI ET AL. 2018

Abdi, M.; Ashcroft, I.; Wildman, R. D.: Design optimisation for an additively manufactured automotive component. *International Journal of Powertrains* 7 (2018) 1/2/3, S. 142.

AMA VERBAND FÜR SENSORIK UND MESSTECHNIK E.V. 2020

AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.: Sensorik und Messtechnik mit leichten Umsatzverlusten 2019. <<https://www.ama-sensorik.de/verband/brancheninformationen/branchenstatistik-2019/>>.

ANWAR & PHAM 2018

Anwar, A. B.; Pham, Q.-C.: Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting. *Additive Manufacturing* 22 (2018) 1, S. 86-97.

ARNDT ET AL. 2014

Arndt, K.-D.; Brüggemann, H.; Ihme, J.: Festigkeitslehre für Wirtschaftsingenieure. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014. ISBN: 978-3-658-05903-3.

BALDINGER 2016

Baldinger, M.: Supply chain management für additive manufacturing: Konzepte, Werkzeuge und Prozesse für die Zusammenarbeit mit Dienstleistern zur Reduktion der Risiken beim Einstieg in additive Manufacturing. ETH Zurich (2016).

BARETH ET AL. 2022

Bareth, T.; Binder, M.; Kindermann, P.; Stapff, V.; Rieser, A.; Seidel, C.: Implementation of a multi-material mechanism in a laser-based powder bed fusion (PBF-LB) machine. Lugano (2022).

BEAN ET AL. 2018

Bean, G. E.; Witkin, D. B.; McLouth, T. D.; Patel, D. N.; Zaldivar, R. J.: Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting. *Additive Manufacturing* 22 (2018), S. 207-215.

BERNHARD 2014

Bernhard, F.: Handbuch der Technischen Temperaturmessung. 2., Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-24506-0.

BERNSTEIN 2014

Bernstein, H.: Messelektronik und Sensoren. Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint; Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-00549-8.

BINDER ET AL. 2018a

Binder, M.; Anstaett, C.; Reisch, R.; Schlick, G.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Automated Manufacturing of Mechatronic Parts by Laser-Based Powder Bed Fusion. 18th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry. Hannover (2018).

BINDER ET AL. 2018b

Binder, M.; Illgner, M.; Anstaett, C.; Kindermann, P.; Kirchbichler, L.; Seidel, C.: Automated Manufacturing of Sensor-Monitored Parts. Enhancement of the laser beam melting process by a completely automated sensor integration. Laser Technik Journal (2018).

BINDER ET AL. 2019a

Binder, M.; Kirchbichler, L.; Seidel, C.; Anstaett, C.; Schlick, G.; Reinhart, G.: Design Concepts for the Integration of Electronic Components into Metal Laser-based Powder Bed Fusion Parts. Procedia CIRP 81 (2019), S. 992-997.

BINDER ET AL. 2019b

Binder, M.; Schönfeld, F.; Anstatt, C.; Schlick, G.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Radio-Frequency Identification of Metal-AM Parts. PhotonicsViews. Weinheim (2019). <10.1002/phvs.201900040>.

BINDER ET AL. 2020a

Binder, M.; Leong, C.; Anstatt, C.; Georg, S.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Effects of Process Interruptions on the Microstructure and Tensile Properties of AlSi10Mg Parts Manufactured by Laser-Based Powder Bed Fusion. 11th CIRP Conference on Photonic Technologies. Erlangen (2020).

BINDER ET AL. 2020b

Binder, M.; Anstaett, C.; Schlick, G.; Seidel, C.; Wieland, R.; Gunther Reinhart: In-Situ Measurement of the Temperature Progression in Metal Components Manufactured by Laser-based Powder Bed Fusion. Fraunhofer Verlag. Berlin (2020).

BINDER ET AL. 2020c

Binder, M.; Fischer, M.; Dietrich, S.; Seidel, C.; Gunther Reinhart: Integration of Strain Gauges in Components Manufactured by Laser-Based Powder Bed Fusion. 20th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry. Garbsen (2020).

BINDER ET AL. 2020d

Binder, M.; Dirnhofer, C.; Kindermann, P.; Horn, M.; Schmitt, M.; Anstaett, C.;

Schlick, G.; Seidel, C.; Reinhart, Gunther: Procedure and Validation of the Implementation of Automated Sensor Integration Kinematics in an LPBF System. Chicago (2020).

BINDER ET AL. 2022a

Binder, M.; Stapff, V.; Heinig, A.; Schmitt, A.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Additive manufacturing of a passive, sensor-monitored 16MnCr5 steel gear incorporating a wireless signal transmission system. 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Lugano (2022).

BINDER ET AL. 2022b

Binder, M.; Machnik, A.; Bosch, M.; Kreitz, K.; Schlick, G.; Seidel, C.: In-situ Integration of Weldable Strain Gauges in Components Manufactured by Laser-based Powder Bed Fusion. Austin, Texas (2022).

BINDER & SEIDEL 2019

Binder, M.; Seidel, C.: Automatisierte Integration von Sensoren während des Laserstrahlschmelzprozess. <<https://www.youtube.com/watch?v=rgM2NA03xso>> - 26.07.2019.

BINK & ZSCHECH 2018

Bink, R.; Zschech, P.: Predictive Maintenance in der industriellen Praxis. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 55 (2018) 3, S. 552-565.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. London: Springer London 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4.

BRAUNOVIC ET AL. 2007

Braunovic, M.; Myshkin, N. K.; Konchit Łs, V. V.: Electrical contacts. Fundamentals, applications and technology. ebrary, Inc. Boca Raton, Fla, London: Taylor & Francis distributor 2007. ISBN: 978-1-57444-727-9.

BUGHIN ET AL. 2018

Bughin, J.; Hazan, E.; Lund, S.; Dahlström, P.; Wiesinger, A.; Subramaniam, A.: Skill Shift: Automation and the future of the workforce. Brüssel (2018). <<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/public%20and%20social%20sector/our%20insights/skill%20shift%20automation%20and%20the%20future%20of%20the%20workforce/mgi-skill-shift-automation-and-future-of-the-workforce-may-2018.pdf>> - 5.01.2021.

CAPRIO ET AL. 2018

Caprio, L.; Chiari, G.; Demir, A. G.; Previtali, B.: Development of novel high

temperature laser powder bed fusion system for the processing of crack-susceptible alloys. Austin (2018).

CHADDA ET AL. 2020

Chadda, R.; Probst, J.; Hartmann, C.; Link, M.; Hessinger, M.; Abele, E.; Weigold, M.; Kupnik, M.: Disruptive Force Sensor Based on Laser-based Powder-Bed-Fusion. 2020.

CIUDAD ET AL. 2010

Ciudad, D.; Cobos, P.; Sanchez, P.; Aroc, C.: RFID in Metal Environments: An Overview on Low (LF) and Ultra-Low (ULF) Frequency Systemsled. In: Turcu, C. (Hrsg.): Radio Frequency Identification Fundamentals and Applications Design Methods and Solutions: InTech 2010. ISBN: 978-953-7619-72-5.

CLAESSON ET AL. 2019

Claesson, A.; Lyckfeldt, O.; Lindqvist, J.; Kardeby, V.; Lejon, E.; Ulfberg, P.; Rendall, H.; Hedin, G.: Integrated Optical Fiber Sensors in Additive Manufactured Metal Components for Smart Manufacturing Applications. Smart Systems Integration (2019).

DANI 2019

Dani, I.: Smart components by additive technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 480 (2019).

DEUTSCHES KUPFER-INSTITUT 2000

Deutsches Kupfer-Institut: Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen. Düsseldorf (2000). <https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Anwendung/Elektrotechnik/brosch09.pdf>.

DI WANG ET AL. 2017

Di Wang; Wu, S.; Fu, F.; Mai, S.; Yang, Y.; Liu, Y.; Song, C.: Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. Materials & Design 117 (2017) 4, S. 121-130.

DIN 1319-1 1995

DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik (1995).

DIN 8580 2020

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung (2020).

DIN EN 60228 2005

DIN EN 60228: Leiter für Kabel und isolierte Leitungen (2005).

<<https://docplayer.org/172525869-Din-en-vde-0295.html>> - 13.09.2021.

DIN EN ISO/ASTM 52900 2018

DIN EN ISO/ASTM 52900: Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie. 2018.

DIN ISO 1219-1 2019

DIN ISO 1219-1: Fluidtechnik – Graphische Symbole und Schaltpläne (2019).

DUSCHEK ET AL. 2017

Duscheck, F.; Blameuser, R.; Gehrman, S.: Maschinenverfügbarkeit runter, Wartungs- und Servicekosten runter. Chancen und Herausforderungen von Predictive Maintenance in der Industrie (2017). <https://www.bearingpoint.com/files/BearingPoint_Studie_Maintenance.pdf?hash=985a1c96b41c8324f2d7838c3e1fb7382d01f5b12f5b80a0>.

EINTER ET AL. 2021

Einter, J.; Wiest, E.; Binder, M.: Smart finger ring with integrated RFID chip. Fraunhofer-Gesellschaft (2021).

ENGELHARDT 2015

Engelhardt, P. R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage (Dissertation). München: utzverlag 2015. ISBN: 978-3-8316-4472-8. (Forschungsberichte IWB v.299).

FEIL 2011

Feil, C.: Entwicklung eines 13,56 MHz kontaktlosen Sensor Systems mit sehr kleinen Antennen (Masterarbeit). Institut für Elektronik, TU Graz. Graz (2011). <<https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a793aade3f&location=browse>> - 22.08.2021.

FINKENZELLER 2006

Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. 4. aktualisierte u. erw. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3446403987.

FINKENZELLER 2015

Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser 2015. ISBN: 978-3-446-44439-3.

GAUSEMEIER 2012

Gausemeier, J.: Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing - Future Applications. Universität Paderborn. Paderborn (2012).

GLASSCHROEDER 2018

Glasschroeder, J.: Additiv gefertigte Werkstücke mit integrierten elektrischen Schaltungen unter Nutzung des 3D-Druckprozesses (Dissertation). Fakultät für Maschinenwesen, TU München. München (2018). <<https://media-tum.ub.tum.de/?id=1421825>>.

GOBLAU 2020

Goßlau, D.: Fahrzeugmesstechnik. Wiesbaden, DOI: 10.1007/978-3-658-28479-4 (2020).

GUMPINGER & PAMBAGUIAN 2019

Gumpinger, J.; Pambaguian, A.: Verification of Additive Manufacturing processes (ESA-TECMSP-MO-012966). ESA UNCLASSIFIED. European Space Agency (2019).

GUNENTHIRAM ET AL. 2018

Gunenthiram, V.; Peyre, P.; Schneider, M.; Dal, M.; Coste, F.; Koutiri, I.; Fabbro, R.: Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process. *Journal of Materials Processing Technology* 251 (2018), S. 376-386.

HAMMOND ET AL. 2019

Hammond, V.; Schuch, M.; Bleckmann, M.: The influence of a process interruption on tensile properties of AlSi10Mg samples produced by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 25 (2019) 8, S. 1442-1452.

HARRIS ET AL. 2018

Harris, P.; Reutzler, E., Earthman, J.; Hess, A.: Reliability Centered Additive Manufacturing Computational Design Framework. *IEEE Aerospace Conference* (2018).

HAVERMANN ET AL. 2015a

Havermann, D.; Mathew, J.; MacPherson, W. N.; Maier, R. R.; Hand, D. P.: In-situ strain sensing with fiber optic sensors embedded into stainless steel 316 (2015).

HAVERMANN ET AL. 2015b

Havermann, D.; Mathew, J.; MacPherson, W. N.; Maier, R. R.; Hand, D. P.: Temperature and Strain Measurements With Fiber Bragg Gratings Embedded in Stainless Steel 316. *Journal of Lightwave Technology* 33 (2015) 12, S. 2474-2479.

HEDGES 2014

Hedges, M.: 3D Printed Electronics via Aerosol Jet (2014).

HEINIG 2020

Heinig, A.: Freely programmable UHF sensor transponder circuit. Dresden (2020).

HEINRICH ET AL. 2017

Heinrich, B.; Linke, P.; Glöckler, M.: Grundlagen Automatisierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2017. ISBN: 978-3-658-17581-8.

HERING & SCHÖNFELDER 2018

Hering, E.; Schönfelder, G.: Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018. ISBN: 978-3-658-12562-2.

HERZER ET AL. 2021

Herzer, F.; Abraham, F.; Tammer, C.; Schlick, G.; Seidel, C.; Schilp, J.: Detection of Defects in Solidified Layers within Laser-based Powder Bed Fusion using Active Thermography. *Procedia CIRP* 104 (2021) 4, S. 518-523.

HESSE 2013

Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. Mit 25 Tabellen sowie 26 Übungsaufgaben und 115 Kontrollfragen. 3., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 9783446435964.

HOELZLE ET AL. 2017

Hoelzle, D.; Peng, H.; Ghasri-Khouzani, M.: Expert survey to understand and optimize part orientation in direct metal laser sintering. Austin, Texas (2017).

HOERBER ET AL. 2014

Hoerber, J.; Glasschroeder, J.; Pfeffer, M.; Schilp, J.; Zaeh, M.; Franke, J.: Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications. *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 806-811.

HOSSAIN ET AL. 2016

Hossain, M. S.; Gonzalez, J. A.; Hernandez, R. M.; Shuvo, M. A.; Mireles, J.; Choudhuri, A.; Lin, Y.; Wicker, R. B.: Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing* 10 (2016), S. 58-66.

HOSSAIN 2017

Hossain, M. S.: Process Development And Characterization Of Smart Parts Fabricated Using Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Technologies (Open Access Theses & Dissertations) (2017). <https://digitalcommons.utep.edu/open_etd/468>.

JEURGENS ET AL. 2002

Jeurgens, L. P.; Sloof, W. G.; Tichelaar, F. D.; Mittemeijer, E. J.: Growth kinetics and mechanisms of aluminum-oxide films formed by thermal oxidation of aluminum. *Journal of Applied Physics* 92 (2002) 3, S. 1649-1656.

JIANG ET AL. 2017

Jiang, R.; Kleer, R.; Piller, F. T.: Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technological Forecasting and Social Change* 117 (2017), S. 84-97.

KAMPS 2018

Kamps, T.: Leichtbau von Stirnzahnrädern aus Einsatzstahl mittels Laserstrahlschmelzen (Dissertation). Technische Universität München. München (2018). <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1426505/1426505.pdf>> - 29.12.2021.

KARAPATIS ET AL. 1999

Karapatis, N.; Egger, G.; Gygax, P. Glardon, R.: Optimization of powder layer density in selective laser sintering (1999).

KERN 2007

Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. 2., verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007. ISBN: 3-540-44477-7.

KLEIN 2011

Klein, B.: Verbindungstechnik. In: Klein, B. (Hrsg.): Leichtbau-Konstruktion. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2011, S. 284-317. ISBN: 978-3-8348-1604-7.

KÖNIG 2015

König, N.: RFID, eine Schlüsseltechnologie für transparente Bauwerkserstellung und nachhaltigen Gebäudebetrieb (RFID-Sensor: Energie-Hygiene-Sicherheit). Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2015. ISBN: 978-3816794097. (2908).

KOOPMANN 2020

Koopmann, J.: Multimaterialdruck von integrierten elektrischen Strukturen mittels selektivem Laserschmelzen (Dissertation). Forschungsberichte aus dem Institut für Werkstofftechnik, Metallische Werkstoffe der Universität Kassel. Kassel, Hess: Kassel University Press 2020. ISBN: 978-3-7376-0812-1. (31).

KRAUSE & GEBHARDT 2018

Krause, D.; Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung Modularer Produktfamilien. Hohe Produktvielfalt Beherrschbar Entwickeln. Berlin, Heidelberg: Vieweg 2018. ISBN: 9783662530405.

KRAUSS 2016

Krauss, H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung (Dissertation). Herbert Utz Verlag GmbH. 2016. ISBN: 978-3-8316-4628-9.

KÜSTERS ET AL. 2011

Küsters, Y.; Schäfer, M.; Witt, G.: Robuster Strahlschmelzprozess durch methodische Parameterfindung. RTejournal (2011).

LANGER ET AL. 2022

Langer, L.; Schmitt, M.; Schlick, G.; Schilp, J.: Development of an Automated Process Chain for Hybrid Additive Manufacturing using Laser Powder Bed Fusion. Procedia CIRP 112 (2022), S. 358-363.

LANZA ET AL. 2017

Lanza, G.; Kopf, R.; Zaiß, M.; Stricker, N.; Eschner, N.; Jacob, A.; Yang, S.; Schönle, A.; Webersinke, Lisa; Wirsig, Lisa: Laser-Strahlschmelzen - Technologie mit Zukunftspotenzial. Ein Handlungsleitfaden. Erste Ausgabe; Stand: Juni 2017. Karlsruhe: KIT - Karlsruhe Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik 2017. ISBN: 978-3-00-056913-5.

LASKIN & VOLPP 2021

Laskin, A.; Volpp, J.: Comparison of the thermal focus shift and aberration between the single-mode and multimode lasers. Journal of Laser Applications 33 (2021) 4.

LAUSCH ET AL. 2016

Lausch, H.; Töppel, T.; Petters, R.; Gronde, B.; Herrmann, M.; Funke, K.: Multi-material Approach to Integrate Ceramic Boxed Temperature-sensitive Components in Laser Beam Melted Structures for Bio and Other Applications (2016).

LAUSCH ET AL. 2017

Lausch, H.; Töppel, T.; Herrmann, M.; Gronde, B.; Petters, R.; Rotsch, C.: Verbundkörper mit mindestens einer Funktionskomponente und ein Verfahren zur Herstellung des Verbundkörpers (WO 2017/054799 A1). Deutschland (2017).

LI 2001

Li, X.: Embedded Sensors in Layered Manufacturing (Dissertation). Stanford University (2001).

LI & PRINZ 2004

Li, X.; Prinz, F.: Analytical and Experimental Study on Noncontact Sensing With Embedded Fiber-Optic Sensors in Rotating Metal Parts. Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, No. 7 (2004).

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009. ISBN: 978-3-642-01422-2.

LINK ET AL. 2021

Link, M.; Weigold, M.; Probst, J.; Chadda, R.; Hartmann, C.; Hessinger, M.; Kupnik, M.; Abele, E.: Investigation on Structural Integration of Strain Gauges using Laser-Based Powder-Bed-Fusion (LPBF) (2021).

LOTTER & WIENDAHL 2012

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-29060-2.

LUO ET AL. 2021

Luo, C.; Andersson, P.; Uhlirsch, M.; Mellin, P.: A robust method for powder thermal property testing and thermal modeling in additive manufacturing. 2021.

LUTTER-GÜNTHER 2020

Lutter-Günther, M.: Qualitätsorientiertes und modellbasiertes Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen. München: Universitätsbibliothek der TU München 2020.

MAAß 2019

Maaß, L.: Aluminiumfasern als flexibles Einsatzmaterial für die teilflüssige Formgebung. TU München. München (2019).

MAHMOODKHANI ET AL. 2019

Mahmoodkhani, Y.; Ali, U.; Imani Shahabad, S.; Rani Kasinathan, A.; Esmailizadeh, R.; Keshavarzkermani, A.; Marzbanrad, E.; Toyserkani, E.: On the measurement of effective powder layer thickness in laser powder-bed fusion additive manufacturing of metals. Progress in Additive Manufacturing 4 (2019) 2, S. 109-116.

MAIER ET AL. 2013

Maier, R. R.; Havermann, D.; MacPherson, W. N.; Hand, D. P.: Embedding metallic jacketed fused silica fibres into stainless steel using additive layer manufacturing technology (2013).

MAIER ET AL. 2014

Maier, R. R.; Havermann, D.; Schneller, O.; Mathew, J.; Polyzos, D.; MacPherson, W. N.; Hand, D. P.: Optical fibre sensing in metals by embedment in 3D printed metallic structures (2014).

MASSALSKI & OKAMOTO 1990

Massalski, Tadeusz B.; Okamoto, Hiroaki (Hrsg.): Binary alloy phase diagrams. American Society for Metals. Materials Park, Ohio: ASM International 1990. ISBN: 978-0-87170-403-0.

MATHEW ET AL. 2015

Mathew, J.; Schneller, O.; Polyzos, D.; Havermann, D.; Carter, R. M.; MacPherson, W. N.; Hand, D. P.; Maier, R. R.: In-Fiber Fabry–Perot Cavity Sensor for High-Temperature Applications. *Journal of Lightwave Technology* 33 (2015) 12, S. 2419-2425.

MATHEW ET AL. 2017

Mathew, J.; Hauser, C.; Stoll, P.; Kenel, C.; Polyzos, D.; Havermann, D.; MacPherson, W. N.; Hand, D. P.; Leinenbach, Christian; Spierings, Adriaan; Koenig-Urban, Kamilla; Maier, Robert R. J.: Integrating Fiber Fabry-Perot Cavity Sensor Into 3-D Printed Metal Components for Extreme High-Temperature Monitoring Applications. *IEEE Sensors Journal* 17 (2017) 13, S. 4107-4114.

MAYER ET AL. 2014

Mayer, D.; Stoffregen, H. A.; Heuss, O.; Pöllmann Jennifer; Abele, E.; Melz, T.: Additive Manufacturing of Active Struts for Piezoelectric Shunt Damping. 25th International Conference on Adaptive Structures and Technologies. Netherlands (2014).

MCCANN ET AL. 2021

McCann, R.; Obeidi, M. A.; Hughes, C.; McCarthy, É.; Egan, D. S.; Vijayaraghavan, R. K.; Joshi, A. M.; Acinas Garzon, V.; Dowling, Denis P.; McNally, Patrick J.; Brabazon, Dermot: In-situ sensing, process monitoring and machine control in Laser Powder Bed Fusion: A review. *Additive Manufacturing* 45 (2021) 1.

MEIER 2022

Meier, F.: Technisches Merkblatt: EN AC-Al Si10 Mg(a) (2022). <<https://germannunguss.ch/wp-content/uploads/2018/10/EN-AC-ALSi10Mg.pdf>>.

MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe (Dissertation). RWTH Aachen (1999).

MINDT ET AL. 2016

Mindt, H. W.; Megahed, M.; Lavery, N. P.; Holmes, M. A.; Brown, S. G.: Powder Bed Layer Characteristics: The Overseen First-Order Process Input. *Metalurgical and Materials Transactions A* 47 (2016) 8, S. 3811-3822.

MÜLLER ET AL. 2012

Müller, B.; Töppel, T.; Rotsch, C.; Böhm, A.; Bräunig, J.; Neugebauer, R.: Functional integration in implants through Additive Manufacturing technology and smart materials. Paris (2012).

MÜLLER ET AL. 2020

Müller, A. v.; Binder, M.; Calabro, G.; Luca, R. de; Fanelli, P.; Neu, R.; Schlick, G.; Vivio, F.; You, Jeong-Ha: Tailored tungsten lattice structures for plasma-facing components in magnetic confinement fusion devices. *Materials Today* 39 (2020) 1, S. 146-147.

MÜLLER & TÖPPEL 2017

Müller, B.; Töppel, T.: Funktionsintegration mittels Laserstrahlschmelzen. *Mitteldeutsches Forum 3D-Druck in der Anwendung*; Hochschule Mittweida; Hochschule Merseburg. Merseburg (2017). <<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:542-2849>>.

MUNSCH ET AL. 2021

Munsch, M.; Schmidt-Lehr, M.; Wycisk, E.; Führer, T.: *AMPOWER Report 2021*. Hamburg (2021).

NANO DIMENSION 2021

Nano Dimension: 3D-printed electronics (2021). <<https://www.nano-di.com/hubfs/2021-06-09-NNDM%20Corporate%20Presentation-final.pdf>> - 5.01.2021.

NASA 2017a

NASA: Specification for control and qualification of laser powder bed fusion metallurgical processes. Alabama (2017).

NASA 2017b

NASA: Standard for additively manufactured spaceflight hardware by laser powder bed fusion in metals. Alabama (2017).

NIKOLAY & KOLLENBERG 2020

Nikolay, D.; Kollenberg, W.: Additiv oder subtraktiv - eine wirtschaftliche Betrachtung. *Keramische Zeitschrift* 72 (2020) 3, S. 24-29.

OSTERMANN 2007

Ostermann, F.: *Korrosionsverhalten von Aluminium*. (Hrsg.): *Anwendungstechnologie Aluminium*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007, S. 227-278. ISBN: 978-3-540-23882-9.

OTT 2012

Ott, M.: Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung (Dissertation). Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München (2012).

PARTHIER 2006

Parthier, R.: Messtechnik. Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2006. ISBN: 978-3-8348-9083-2.

PATSCHGER 2016

Patschger, A.: Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverständnis des Laserstrahl-Mikroschweißens von metallischen Folien. Technische Universität Ilmenau. Ilmenau (2016). <<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000193>>.

PAZ ET AL. 2014

Paz, J. F.; Wilbig, J.; Aumund-Kopp, C.; Petzoldt, F.: RFID transponder integration in metal surgical instruments produced by additive manufacturing. Powder Metallurgy 57 (2014) 5, S. 365-372.

PETRAT ET AL. 2018

Petrat, T.; Kersting, R.; Graf, B.; Rethmeier, M.: Embedding electronics into additive manufactured components using laser metal deposition and selective laser melting (2018).

PETZOLDT ET AL. 2013

Petzoldt, F.; Bergmann, J. P.; Schürer, R.; Schneider, S.: Einfluss intermetallischer Phasen auf die Langzeitstabilität von ultraschallgeschweißten Kupfer-Aluminium-Kontakte. Kupferinstitut (2013).

PFEIFER 2016

Pfeifer, S.: Einfluss intermetallischer Phasen der Systeme Al-Cu und Al-Ag auf den Widerstand stromtragender Verbindungen im Temperaturbereich von 90 °C bis 200 °C. Saechsische Landesbibliothek- Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden; Technische Universität Dresden. Dresden (2016).

PHILIPP 2014

Philipp, T.: RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen (Dissertation). München: utzverlag 2014. ISBN: 978-3-8316-4346-2. (Forschungsberichte IWB v.282).

PLAßMANN & SCHULZ 2013

Plaßmann, W.; Schulz, D.: Handbuch Elektrotechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2013. ISBN: 978-3-8348-1021-2.

POZAR 2012

Pozar, D. M.: Microwave engineering. Wiley. Hoboken, NJ (2012). <ISBN: 978-0-470-63155-3>.

PROSIEBEN 2021

ProSieben: Smarter Ring: Fernsehbeitrag Pro7 Galileo - Staffel 2021. Episode 123; 12.05.2021. 19:05 Uhr. Galileo. Augsburg (2021).

RAUSCHENBACH ET AL. 2012

Schutzrecht DE 10 2011 105 044 A1 (2012) Rauschenbach, M.; Flaschenträger, D.; Melz, T.; Eberhard, A.; Fischer, J.; Stoffregen, H.: Verfahren zur Herstellung einer wenigstens eine Komponente zumindest teilweise umschließenden Gehäusestruktur sowie eine mit dem Verfahren hergestellte Gehäusestruktur.

RAZA ET AL. 2021

Raza, A.; Fiegl, T.; Hanif, I.; Markström, A.; Franke, M.; Körner, C.; Hryha, E.: Degradation of AlSi10Mg powder during laser based powder bed fusion processing. Materials & Design 198 (2021) 7.

REHME 2010

Rehme, O.: Cellular Design for Laser Freeform Fabrication. 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag 2010. ISBN: 978-3-86955-273-6.

REIJONEN ET AL. 2020

Reijonen, J.; Revuelta, A.; Riipinen, T.; Ruusuvoori, K.; Puukko, P.: On the effect of shielding gas flow on porosity and melt pool geometry in laser powder bed fusion additive manufacturing. Additive Manufacturing 32 (2020) 9.

REINHART ET AL. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1996. ISBN: 978-3-540-61078-6.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Teufelhart, S.; Ott, M.; Schilp, J.: Potentials of generative manufactured components for gaining resource efficiency of production facilities. Chemnitz (2010).

REINHART 2017

Reinhart, G.: Fabrikplanung. (Vorlesungsskript). iwB, Technische Universität München. München (2017).

REINHART ET AL. 2019

Reinhart, G.; Seidel, C.; Dietrich, S.: Multimaterial-Zentrum Augsburg - 3. Projektbeiratstreffen. Fraunhofer IGCV. Augsburg (2019).

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Marktchance Individualisierung. Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-642-55495-7.

REISEN 2015

Reisen, K.: Ressourceneffizienzbewertung RFID-gestützter Wertschöpfungsnetze (Dissertation). TU München. 2015.

RENISHAW PLC 2015

Renishaw plc: AlSi10Mg-0403: Powder for Additive Manufacturing. Data sheet.

REPOSSINI ET AL. 2017

Repossini, G.; Laguzza, V.; Grasso, M.; Colosimo, B. M.: On the use of spatter signature for in-situ monitoring of Laser Powder Bed Fusion. Additive Manufacturing 16 (2017) 6, S. 35-48.

ROLAND BERGER GMBH 2013

Roland Berger GmbH: Additive manufacturing. München (2013). <file:///C:/Users/binder/Downloads/roland_berger_additive_manufacturing_1.pdf>.

ROMBOUTS ET AL. 2006

Rombouts, M.; Kruth, J. P.; Froyen, L.; Mercelis, P.: Fundamentals of Selective Laser Melting of alloyed steel powders. CIRP Annals 55 (2006) 1, S. 187-192.

RUFFO ET AL. 2006

Ruffo, M.; Tuck, C.; Hague, R.: Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 220 (2006) 9, S. 1417-1427.

SARGINI ET AL. 2021

Sargini, M.I.M.; Masood, S. H.; Palanisamy, S.; Jayamani, E.; Kapoor, A.: Additive manufacturing of an automotive brake pedal by metal fused deposition modelling. Materials Today: Proceedings 45 (2021) 10, S. 4601-4605.

SCHEIDL ET AL. 2021

Scheidl, V.; Geiser, K.; Binder, M.: Ersatz für Schlüssel und Geldbeutel – Smarte Ringe aus Augsburg. Bayerischer Rundfunk. Bayern (2021).

<<https://www.br.de/nachrichten/bayern/ersatz-fuer-schluessel-und-geldbeutel-smarte-ringe-aus-augsburg,SXkAmhC>> - 29.12.2021.

SCHIESSLE 2016

Schiessle, E.: Industriesensorik. Sensortechnik und Messwertaufnahme. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Würzburg: Vogel Business Media 2016.

ISBN: 9783834333414. (Vogel Business Media).

SCHLAEPFER & RADOWITZ 2017

Schlaepfer, R.; Radowitz, K.: Digitale Zukunftsfähigkeit. Deloitte AG (2017).

SCHMITT ET AL. 2019

Schmitt, M.; Jansen, D.; Bihlmeir, A.; Winkler, J.; Anstatt, C.; Schlick, G.; Tobie, T.; Stahl, K.; Reinhart, Gunther: Rahmen und Strategien für den Leichtbau von additiv gefertigten Zahnrädern für die Automobilindustrie. In: Kynast, M. et al. (Hrsg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D International Hub for Additive Manufacturing: Exhibition + Conference + Networking. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2019, S. 89-102. ISBN: 978-3-446-46223-6.

SCHMITT ET AL. 2020

Schmitt, M.; Kempter, B.; Inayathulla, S.; Gottwalt, A.; Horn, M.; Binder, M.; Winkler, J.; Schlick, G.; Tobie, Thomas; Stahl, Karsten; Reinhart, Gunther: Influence of Baseplate Heating and Shielding Gas on Distortion, Mechanical and Case hardening Properties of 16MnCr5 fabricated by Laser Powder Bed Fusion. Procedia CIRP 93 (2020) 2, S. 581-586.

SCHNECK ET AL. 2020

Schneck, M.; Schmitt, M.; Schlick, G.; Reinhart, G.: Validated Cost Prediction for Additive Manufacturing – Combination of a Model Based Approach with an Empirical Study. ISBN 978-3-8396-1521-82020.

SCHNECK 2021

Schneck, M. M.: Technology strategy for metal-based additive manufacturing (Dissertation). Technische Universität München. München2021. ISBN: 978-3-8316-4943-3.

SCULPTEO 2017

Sculpteo: Empfohlene Metalle für 3D-Drucke im Jahr 2017. <<https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/760977/umfrage/empfohlene-metalle-fuer-3d-drucke/>> - 23. April 2020.

SEHRT 2010

Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren (Dissertation). (Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9229-4.

SEHRT & WITT 2011

Sehrt, J. T.; Witt, G.: Part management by direct integration of RFID tags into beam melted parts: RAPID 2011 Conference & Exposition 2011.

SEHRT & WITT 2012

SEHRT & WITT: Additive Manufacturing of smart parts and medical instruments, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing. 2012. (Proceedings of AEPR).

SILBERNAGEL ET AL. 2018

Silbernagel, C.; Ashcroft, I.; Dickens, P.; Galea, M.: Electrical resistivity of additively manufactured AlSi10Mg for use in electric motors. Additive Manufacturing 21 (2018), S. 395-403.

SILBERNAGEL ET AL. 2019

Silbernagel, C.; Gargalis, L.; Ashcroft, I.; Hague, R.; Galea, M.; Dickens, P.: Electrical resistivity of pure copper processed by medium-powered laser powder bed fusion additive manufacturing for use in electromagnetic applications. Additive Manufacturing 29 (2019).

SIMCHI 2006

Simchi, A.: Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features. Materials Science and Engineering: A 428 (2006) 1-2, S. 148-158.

SINGER ET AL. 2021a

Singer, C.; Schmitt, M.; Schlick, G.; Schilp, J.: Multi-material additive manufacturing of thermocouples by laser-based powder bed fusion. Gulf of Naples (2021).

SINGER ET AL. 2021b

Singer, C.; Platt, S.; Horn, M.; Binder, M.; Piechotta, M.; Wegner, J.; Kleszczynski, S.; Seidel, C.; Witt, G.; Schilp, J.: Processability of Soda-Lime Glass in Laser-Based Powder Bed Fusion (2021).

SLM SOLUTIONS 2021

SLM Solutions: Lightweight Brake Pedal for a Race Car (2021). <https://digi-mode.com.tr/wp-content/uploads/2021/02/SLMSolutions_CaseStudy_TUGraz_BrakePedal.pdf> - 29.12.2021.

SPALLEK & KRAUSE 2017

Spallek, J.; Krause, D.: Entwicklung individualisierter Produkte durch den Ein-

satz Additiver Fertigung. In: Lachmayer, R. et al. (Hrsg.): Additive Manufacturing Quantifiziert. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017, S. 69-83. ISBN: 978-3-662-54112-8.

SPATH 2013

Spath, Dieter (Hrsg.): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Studie. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2013. ISBN: 978-3-8396-0570-7.

SPIERINGS & LEVY 2009

Spierings, A.; Levy, G.: Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with Selective Laser Melting using different powder grades. 20th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2009 (2009).

STANDFUß ET AL. 2011

Standfuß, J.; Rath, W.; Valentin, M.; Falldorf, H.: Laserschweißen von Mischverbindungen. Laser Technik Journal 8 (2011) 2, S. 24-26.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2020

Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Inlandsproduktberechnung, Vierteljahresergebnisse. Seite 11. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-vierteljahr-pdf-2180120.pdf?__blob=publicationFile> - 16.05.2021.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2021

Statistisches Bundesamt: Verbraucherpreisindex (inkl. Veränderungsraten): Deutschland, Jahre. Verfügbarer Zeitraum: 1991 – 2020. Code: 61111-0001. <<https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=61111-0001&byypass=true&levelindex=0&levelid=1612700754632#abreadcrumb>> - 17.08.2023.

STOFFREGEN 2015

Stoffregen, H. A.: Strukturintegration piezoelektrischer Vielschichtaktoren mittels selektiven Laserschmelzens (Dissertation). Herzogenrath: Shaker 2015. ISBN: 9783844040470.

STOLL ET AL. 2016

Stoll, P.; Mathew, J.; Spierings, A.; Bauer Thomas; Maier, R.: Embedding fibre optical sensors into SLM parts. Solid Freeform Fabrication (2016) Proceedings of the 26th Annual International.

STOLL ET AL. 2018

Stoll, P.; Leutenecker-Twelsiek, B.; Spierings, A.; Klahn, C.; Wegener, K.: Temperature Monitoring of an SLM Part with Embedded Sensor. In: Meboldt, M. et al. (Hrsg.): Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017. Cham: Springer International Publishing 2018, S. 273-284. ISBN: 978-3-319-66866-6.

STOLL ET AL. 2019

Stoll, P.; Spierings, A.; Wegener, K.: Impact of a process interruption on tensile properties of SS 316L parts and hybrid parts produced with selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 103 (2019) 1-4, S. 367-376.

STOLL 2020

Stoll, P.: Functionality integration in powder bed based additive manufacturing processes (Dissertation). ETH Zurich (2020).

STOLL ET AL. 2021

Stoll, P.; Gasparin, E.; Spierings, A.; Wegener, K.: Embedding eddy current sensors into LPBF components for structural health monitoring. *Progress in Additive Manufacturing* 26 (2021) 3, S. 284.

TKOTZ & BUMILLER 2020

Tkocz, K.; Bumiller, H.: *Fachkunde Elektrotechnik*. 32. überarbeitete und erweiterte Auflage 2020. ISBN: 978-3-8085-3791-6.

TOMAZ ET AL. 2021

Tomaz, I.; Uí Mhurchadha, S. M.; Marques, S.; Quinn, P.; Funke, H.; Birkholz, F.; Zietzschmann, S.; Raghavendra, R.: The development of a smart additively manufactured part with an embedded surface acoustic wave sensor. *Additive Manufacturing Letters* 1 (2021) 2.

TÖPPEL ET AL. 2018

Töppel, T.; Lausch, H.; Brand, M.; Hensel, E.; Arnold, M.; Rotsch, C.: Structural Integration of Sensors/Actuators by Laser Beam Melting for Tailored Smart Components. *JOM* 70 (2018) 3, S. 321-327.

UHLMANN ET AL. 2021

Uhlmann, E.; Düchting, J.; Petrat, T.; Krohmer, E.; Graf, B.; Rethmeier, M.: Effects on the distortion of Inconel 718 components along a hybrid laser-based additive manufacturing process chain using laser powder bed fusion and laser metal deposition. *Progress in Additive Manufacturing* 6 (2021) 3, S. 385-394.

VAN BOCXLAER & BINDER 2021

van Bocxlaer, A.; Binder, M.: Automatisierte RFID-Integration in der additiven Fertigung. RFID im Blick (2021). <www.rfid-wiot-search.com/rfidimblick> - 29.12.2021.

VDA 19.1 2015

VDA 19.1: Prüfung der Technischen Sauberkeit - Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile (2015).

VDI 2860 1990

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik VDI 2860 : Handhabungsfunktion, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definitionen, Symbole (1990).

VDI 2861 BLATT 3 1988

VDI 2861 Blatt 3: Montage- und Handhabungstechnik: Kenngrößen für Industrieroboter Prüfung der Kenngrößen. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf (1988).

VDI 3405 BLATT 2.8 2021

VDI 3405 Blatt 2.8: Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M). VDI 3405 Blatt 2.8 (2021).

VDI/VDE 3522 2014

VDI/VDE 3522: Blatt 1: Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern Grundlagen und Kennwerte (2014).

VRANIĆ ET AL. 2017

Vranić, A.; Bogojević, N.; Ćirić-Kostić, S.; Croccolo, D.; Olmi, G.: Advantages and drawbacks of additive manufacturing. IMK-14 - Istrazivanje i razvoj 23 (2017) 3, S. 57-62.

WERTHSCHÜTZKY 2018

Werthschützky, R.: Sensor Technologien 2022. Berlin: AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. 2018. ISBN: 978-3-9816876-3-7.

WILDEMANN 2022

Wildemann, H.: Anlaufmanagement. Leitfaden zur Verkürzung der Hochlaufzeit und Optimierung der An- und Auslaufphase von Produkten, Anlagen und Dienstleistungen. TCW-Transfer-Centrum für Produktionslogistik und Technologie-Management. 21. Auflage. München: TCW-Verlag 2022. ISBN: 978-3-934155-52-7. (Leitfaden / TCW, Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management 76).

WIRTH ET AL. 2021

Wirth, F.; Frauchiger, A.; Gutknecht, K.; Cloots, M.: Influence of the Inert Gas Flow on the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Process. In: Meboldt, M. et al.

(Hrsg.): Industrializing Additive Manufacturing. Cham: Springer International Publishing 2021, S. 192-204. ISBN: 978-3-030-54333-4.

WOHLERS ASSOCIATES 2019

Wohlers Associates: Wohlers report 2019. 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Fort Collins, Colorado (2019).

WOHLERS ASSOCIATES 2021

Wohlers Associates: Wohlers Report 2021. 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry. Fort Collins, Colorado (2021).

YANG ET AL. 2020

Yang, D.; Li, H.; Liu, S.; Song, C.; Yang, Y.; Shen, S.; Lu, J.; Liu, Z.; Zhu, Yilin: In situ capture of spatter signature of SLM process using maximum entropy double threshold image processing method based on genetic algorithm. Optics & Laser Technology 131 (2020) 5.

YAP ET AL. 2015

Yap, C. Y.; Chua, C. K.; Dong, Z. L.; Liu, Z. H.; Zhang, D. Q.; Loh, L. E.; Sing, S. L.: Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews 2 (2015) 4.

ZHANG ET AL. 2010

Zhang, D. Q.; Cai, Q. Z.; Liu, J. H.; Di Li, R.: A Powder Shrinkage Model for Describing Real Layer Thickness during Selective Laser Melting Process. Advanced Materials Research 97-101 (2010), S. 3820-3823.

ZIMMERMANN ET AL. 2021

Zimmermann, Alfred; Schmidt, Rainer; Jain, Lakhmi C. (Hrsg.): Architecting the digital transformation. Digital business, technology, decision support, management. Cham, Switzerland: Springer 2021. ISBN: 978-3-030-49639-5.

12 Anhang

A1 Verwendete Geräte

Es wurden drei verschiedene Typen von Laserstrahlschmelzanlagen verwendet, welche in Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15 erläutert werden. Zudem sind in Tabelle 16 die verwendeten RFID-Lesegeräte, in Tabelle 17 die verbauten Achsen der Kinematik und in Tabelle 18 die Entpulverungsanlage gelistet.

Tabelle 13: Laserstrahlschmelzanlage AconityOne.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Aconity3D GmbH, Herzogenrath, Deutschland
Strahlquelle	400 W Single Mode (SM) Faserlaser (1070 nm)
Laserfokus	Spotdurchmesser 68 μm
Scanner	3-D-Scaneinheit (Raylase)
Bauplatzformheizung	Induktives Heizmodul (Hochtemperatur, bis 800 °C)
Prozessüberwachung	Pyrometrie zur Messung thermischer Strahlung des Schmelzbads
Bauplatzform	Rund, Durchmesser 400 mm (200 mm bei integrierter Heizung)
Pulverzuführung	Befüllung von unten vor den Beschichter

Tabelle 14: Laserstrahlschmelzanlage EOS M 290.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Electro Optical Systems, Krailling, Deutschland
Strahlquelle	400 W Yb Faserlaser
Laserfokus	Spotdurchmesser 74 μm
Bauplatzformheizung	Bis 200 °C
Bauplatzform	Rechteckig, 250 x 250 mm ²
Pulverzuführung	Befüllung von unten vor den Beschichter

Tabelle 15: Laserstrahlschmelzanlage SLM125HL.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	SLM Solutions GmbH, Lübeck, Deutschland
Strahlquelle	400 W IPG Faserlaser
Laserfokus	Spotdurchmesser 70 µm
Bauplattformheizung	Bis 200 °C
Bauplattform	Rechteckig, 125 x 125 mm ²
Pulverzuführung	Befüllung von oben in den Beschichter

Tabelle 16: RFID-Lesegeräte.

Typ	Bezeichnung	Hersteller
LF-Reader	RLS-1181-230	Contrinex AG, Corminboeuf, Schweiz
UHF-Rea-	Nordic ID EXA51e	Nordicid, Almere, Niederlande
der	UF Reader PulsarMX UHF Mid-Range Reader	metraTech GmbH, Magdeburg, Deutschland

Tabelle 17: Achsentypen der Automatisierungseinheit.

Eigenschaft	Beschreibung	Konfiguration	Hersteller
y-Achse	Drylin ZLW-0630 Zahnriemenachse	Hub 190 mm, Führungsschlitzen 60 mm, NEMA 17 Schrittmotor, Encoder	IGUS GmbH, Köln, Deutschland
z-Achsen	Drylin GRQ-10 Auslegerachse	Hub 40 mm, Systemlänge 96 mm, NEMA 11 Schrittmotor, Encoder	IGUS GmbH, Köln, Deutschland

Tabelle 18: Entpulverungsanlage.

Typ	Bezeichnung	Hersteller
SFM-AT200	Entpulverungssystem	Solukon Maschinenbau GmbH

A2 Messmittel

In dieser Arbeit wurden CT-Scans angefertigt (Tabelle 19), Leitfähigkeitsmessungen ausgeführt (Tabelle 20 und Tabelle 28), Licht- und Lasermikroskopaufnahmen aufgenommen (Tabelle 21 und Tabelle 22), Schwingungsdaten mit FBG-Sensoren erfasst (Tabelle 23), Temperaturen in Bauräumen ermittelt (Tabelle 24), REM- und EDX-Analysen angefertigt (Tabelle 25), DMS- und Pt100-Sensoren ausgewertet (Tabelle 26) und Zug- und Druckversuche durchgeführt (Tabelle 27).

Tabelle 19: CT-Messungen.

Analyisiertes Bauteil	Beschreibung
Smartes Zahnrad	Mikro-Fokus-CT, Dienstleister Diondo GmbH, Hattingen, Deutschland
Andere Bauteile	Tomoscop HV Compact, Dienstleister iwis motorsysteme GmbH, Landsberg am Lech, Deutschland

Tabelle 20: Leitfähigkeitsmessgerät Loresta GX MCP-T700.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	N&H Instruments via AudiNova GmbH, Willich, Deutschland
Prinzip	4-Punkt-Messmethode
Messbereich	10^{-4} - 10^7 Ω cm
Normen	ASTM D 991, ISO 2878

Tabelle 21: Lichtmikroskop BX53M.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Olympus Europa SE & Co. KG, Hamburg, Deutschland

Tabelle 22: Lasermikroskop 3-D-Laserscan-Farbmikroskop VK9700 G. II bzw. VK-X3000.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Keyence Corporation, Osaka, Japan

Tabelle 23: Optischer Interrogator FS22DI-ST/4CH.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Höttinger Brüel & Kjaer GmbH, Darmstadt, Deutschland

Sensor	Faser-Bragg-Gitter K-SYS-FSA
Messrate	1000 Samples/s
Software	BraggMonitorDI

Tabelle 24: Temperaturmessgerät MCR-4TC.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	T&D Corporation, Nagano, Japan
Typ	4-Kanal Datenlogger
Temperaturfühler	Thermoelement Typ K

Tabelle 25: Rasterelektronenmikroskop TM3030Plus Tabletop Mikroskop inkl. EDX-Modul.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Hitachi Europe, Düsseldorf, Deutschland
Vergrößerung	15 bis 30.000-fach
EDX-Modul	Hersteller Quantax, 15 kV, für Elementanalyse

Tabelle 26: Universalmessverstärker QuantumX MX840B.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Höttinger Brüel & Kjaer GmbH, Darmstadt, Deutschland
Software	Catman (Version 5.3.3.7)

Tabelle 27: Universalprüfmaschine Z050/Z100.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	ZwickRoell GmbH & Co KG, Ulm, Deutschland

Tabelle 28: Wirbelstrommessgerät Sigmascope SMP350.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Helmut Fischer GmbH, Sindelfingen, Deutschland
Messbereich	0,3 bis 63 MS/m
Messgenauigkeit	+/- 0,5 %
Normen	DIN EN 2004-1, ASTM E1004

Tabelle 29: Thermographie-Kamera Typ FLIR SC5650.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	FLIR Systems Germany, Frankfurt am Main, Deutschland
Sensor-Typ	InSb (Indiumantimonid)
Pixelauflösung	640x512
Pixelabstand	15 µm
Wellenlängen-Detektionsbereich	2,5 bis 5,1 µm
Frame Rate	100 Hz (bis zu 3,425 kHz bei verkleinertem Fenster)

A3 Methoden

Es wurden Dichtemessungen mittels des Archimedischen Prinzip durchgeführt (Tabelle 30), Messungen gemäß Tabelle 31 vollzogen, sowie Ätzungen mit den in Tabelle 32 gelisteten Ätzmitteln getätigt. Tabelle 33 listet zudem alle verwendeten Prozessparameter.

Tabelle 30: Archimedische Dichtemessung mit Laborwaage PLJ-G.

Eigenschaft	Beschreibung
Hersteller	Kern & Sohn, Balingen, Deutschland
Messdetails	je drei Messungen pro Probe in Luft und Isopropanol bei RT

Tabelle 31: Messmethoden.

Messung	Beschreibung
Abgießversuche	In eine vorgesehene Abgießöffnung wird das Isolationsmaterial mit einer Pipette eingegossen/eingespritzt. Dies wird so lange durchgeführt, bis an einer vorgesehenen zweiten Öffnung das Isolationsmaterial wieder austritt. Damit gilt der Hohlraum als vollständig gefüllt und härtet mind. 24 h aus.
Archimedisches Dichtemessung	Mindestens je drei Messungen pro Probe in Luft und Isopropanol bei RT unter Nutzung der Laborwaage PLJ-G (Kern & Sohn, Balingen, Deutschland)
Elektrische Leitfähigkeit	4-Punkt-Messmethode: Mindestens je drei Messungen pro Probe Wirbelstrommessung: Mindestens je drei Messungen pro Probe
Größenfaktor	Die gefertigten Leiterbahnen werden mittels Messschieber in ihrem Querschnitt mindestens drei Mal gemessen und mit dem CAD-Sollwert verglichen. Entspricht der Realwert exakt dem Sollwert, beträgt dieser 100 %.
Kavitätenreinigung	Für jede Düsenart und Kavität werden die verbliebenen Partikel nach VDA 19.1 mittels Gravimetrie (Waage: MSE225S-1CE-DI, Hersteller: Sartorius) dreimal gemessen. Hierzu werden die Kavitäten mittels VE-Wasser nach dem Absaugprozess ausgespült und das Medium durch eine Filtermembran gefiltert. Der Filter wird vorher und nachher im jeweils getrockneten Zustand gewogen. Dadurch kann auf den Grad der verbliebenen Partikel in der Kavität rückgeschlossen werden.
Rauheitsmessungen	Konfokale Lasermessung mit Lasermikroskop. Bildung des arithmetischen Mittelwerts aus fünf Einzelmessstrecken.

RFID-Untersuchung	Der untersuchte RFID-Tag wird in einer metallischen Kavität platziert. Die Kavität wird anschließend durch eine Metallplatte oder ein Metallgitter (Füllgrad < 50 %) der Dicke 1 mm verschlossen. Anschließend wird geprüft in welchen Abständen die Leseantenne noch in der Lage ist den RFID-Tag zu erkennen.
Temperaturmessungen	<p><i>Bauplatzform:</i> Verwendung der Log-Daten generiert durch die PBF-LB/M-Anlage.</p> <p><i>Im Pulverbett / in Kavität:</i> Das Thermoelement wird seitlich in das Bauteil gesteckt, die Verkabelung des Thermoelements im Pulverbett eingebettet. Die Kabelführung wird aus dem Pulverbett geführt zum Messgerät, welches in einem geschützten Bereich der Prozesskammer platziert ist.</p> <p><i>Am Bauteil im Pulverbett:</i> Das Thermoelement wird auf das teilweise fertiggestellte Bauteil geklebt. Damit ist es dem Pulverschmelzprozess wesentlich näher als z. B. der Thermofühler der Bauplatzform. So kann ein Temperaturgradient zwischen Bauteil und Plattformunterseite bestimmt werden.</p> <p><i>Bauraummessungen:</i> Analog zu Pulverbett-/Kavitätsmessungen. Das Thermoelement wird mit Klebeband an die entsprechende Position geklebt.</p>
Zugprüfung	Zugproben nach VDI Richtlinie 3405 Blatt 2, Materialprüfmaschine Z050, Kraftmessdose von 50 kN, Vorgehen nach DIN 6892-1:2017-02.

Tabelle 32: Ätzmittel.

Material	Ätzmittel	Beschreibung
AlSi10Mg, poliert	60 ml destilliertes Wasser, 10 g Natriumhydroxid, 5 g Kaliumferrocyanid	Bei der Ätzung handelt es sich um eine Makroätzung, angewendete Reaktionszeit 20 s.
IN718 und 316L, poliert	Adler-Ätzung (Ätzmittel zur Prüfung von Schweißnähten)	

Tabelle 33: Prozessparameter PBF-LB/M (Angewendete Reaktionszeit: 50 s. Werkstoffverarbeitung und Ankontaktierung der Sensoren).

		Werkstoffverarbeitung								Anschweißen Sensor		
		AlSi10Mg	IN718	IN718	Ti6Al4V	1.2709	1.4404	1.4404	16MnCr5	AlSi10Mg	IN718	1.4404
Laserparameter Volumen	Anlagentyp	SLM 125HL	Aconity ONE	SLM 125HL	SLM 125HL	SLM 125HL	Aconity ONE	SLM 125HL	EOS M290	SLM 125HL	SLM 125HL	Aconity ONE
	Laserleistung in W	330	300	300	270	175	214	175	290	330	150	214
	Belichtungs-geschw. in mm/s	1250	700	700	805	550	928	550	900	1250	200	928
	Spurabstand in µm	170	100	100	120	90	100	120	100	170	-	100
Sonstige Parameter	Schichtdicke in µm	50	30	30	50	30	40	50	50	-	-	-
	Laserfokus-durchmesser in µm	70	68	70	70	70	68	70	74	70	70	68
	Bauplatzform - temperatur in °C	200	-	200	200	200	-	200	80	200	200	-
	Schutzgas Remelting	Argon	Argon	Argon	Argon	Argon	Argon	Argon	Argon	Argon	Argon	Argon
	Sensor									3-fach DMS	nein DMS	3-fach Pt100

A4 Materialien und Sensoren

Im Rahmen der Arbeit wurden Werkstoffe und Sensoren gemäß Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 36 verwendet.

Tabelle 34: Werkstoffbezeichnungen.

Handelsname	Werkstoffnummer	Anderweitige Bezeichnung
1.2709	1.2709	X3NiCoMoTi18-9-5
16MnCr5	1.7131	EC 80
17-4PH	1.4542	X5CrNiCuNb17-4-4
316L	1.4404	X2CrNiMo17-12-2
AlSi10Mg	3.2381	EN AC-43000
IN718	2.4668	NiCr19NbMo
Ti64	3.7164	Ti-6Al-4V

Tabelle 35: Pulverwerkstoffe und sonstige Materialien.

Material	Details	Produktname	Hersteller
AlSi10Mg	Metallpulver, 20-63 µm	Al-Alloy AlSi10Mg	SLM Solutions GmbH
IN718	Metallpulver	-	Pulver verschiedener Hersteller gemischt
Ti6AlV4	Metallpulver, 20- 63 µm	Ti6AlV4 Pulver 20 - 63 µm	TLS Technik GmbH & Co. Spezi- alpulver KG,
1.2709	Metallpulver, 15- 45 µm	Pulverwerkstoff St.1.2709	NMD New Materials Develop- ment GmbH
1.4404	Metallpulver, 10-45 µm	Edelstahlpulver 1.4404 (316L)	NMD New Materials Develop- ment GmbH
16MnCr5	Metallpulver, 20-63 µm	St 1.7131 Pulver 20- 63 µm	TLS Technik GmbH & Co. Spezi- alpulver KG,
Polyurethan- Gießharz	PURe Isolation	ST 76 (PURe Isola- tion ST 76/30)	copaltec GmbH
HT-Zement	2 Komponenten (Pulver, Filler, Binder)	CC HIGH TEMP	OMEGA Engineering GmbH

Tabelle 36: Zur Integration verwendete Sensoren.

Sensor	Messgröße	Produktname	Hersteller
Pt100	Temperatur	Pt100 Temp Sensor Class B 600C size	Innovative Sensor Technology IST AG, Ebnat-Kappel, Schweiz
DMS	Kraft	LS31 HT	Höttinger Brüel & Kjaer GmbH,
LF-RFID	-	RTL-0102-001	Contrinex AG, Corminboeuf, Schweiz
UHF-RFID	-	Rocky100 (860-960 MHz, ISO18000-6 type C compl	BZM Thiel electronics GmbH
UHF-RFID	-	Dot-On XS (HT)	Xerafy, SBF Center, Singapur
3-Achs Be- schleuni- gungsmesser	Beschleunigung/ Lage	KX122	Kionix Inc., New York, USA

Tabelle 37: Übersicht an Einflussgrößen zur Sensorauswahl und Aufstellung einer Sensorintegrationsprozesskette.

Rubrik	Überbegriff	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Weitere Faktoren
Anwendung	Allgemeine Anforderungen	Werkstoff	Normen	Gewicht	Optik	Kosten	...
	Bauteilgeometrie	Dimensionen	Toleranzen	Oberflächenrauigkeit	Funktionsflächen	Hinterschnitte	...
Bauteil-Design	Mechanische Anforderungen	Dichte	Festigkeiten	Härte	el. Leitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	...
	Einsatzbedingungen	Temperaturen	Kräfte/Drücke	Vibrationen	Magnetfelder	umgebende Chemie	...
Automation	Bauteilauslegung	Simulativ	Fertigbarkeit	Reparaturmöglichkeiten	Lebensdauer	Recycling	...
	Sensorkavität	Geometrie	Orientierung	Sensorfixierungselemente	Kavitätsverschluss	Rauigkeit	...
Fertigung mittels PBF-LB/M	Sensor	Geometrie	Wirkprinzip	Verkabelung	Kommunikation	Fixierung	...
	Sensorkommunikation	Kabelführung	elektrische Anschlüsse	Isolierung	Energieversorgung	Drahtlose Signale	...
Automation	Robotersystem	Kinematik	Greifer	Magazinierung	Dimensionierung	Arbeitsraum	...
	Fertigungsprozess	Abläufe	Geschwindigkeiten	Präzisionen	Wiederholgenauigkeiten	Robustheit	...
Fertigung	Medienversorgung	Medienführung	Anschlüsse	Datenübertragrate	Durchflussgeschwindigkeiten	Ventile	...
	Softwaretechnik	Prozessvorbereitung	Bedienung	Parametrisierung	Steuerungstechnik	Programmiersprache	...
Fertigung	Pulver	Fließfähigkeit	Schüttdichte	Partikelgrößenverteilung	Schmelztemperatur	Reflexionsrad Licht	...
	Anlagentechnik	Prozesskammergröße	Bauraumgröße	Schutzgasführung	Plattformtemperatur	Filterzustand	...
Fertigung	Schichtauftragsystem	Pulverbereitstellungsart	Pulvermenge	Pulverrakelsystem	Schichtdicke	Bauplatformnivellierung	...
	Laserenergieeinbringung	Laserleistung	Lasergeschwindigkeit	Hatchabstand	Fokusbereich	Scanfeld-Aufteilung	...

i	Mes.	Symb	Sensor/Messgerät	Phys. Effekt	Phys. Prinzip	Funktionsfähigkeit	Dimen.	Kaps.	Fixierung	Datenübertra	Temperatur
1	Masse	m	Wägezelle	piezoresistiv	mechanisch		Groß				bis 1000°C
2	Länge	s, l, h	DMS	piezoresistiv	mechanisch	gut durch Metall	Groß	Ja	Kleben	ka belgebunden	bis 800°C
3	Länge	s, l, h	Näherungsschalter	kapazitativ	elektrisch/magnetisch	schlecht durch Metall	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 300°C
4	Länge	s, l, h	Näherungsschalter	induktiv	elektrisch/magnetisch	schlecht durch Metall	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 300°C
5	Länge	s, l, h	Inkrementalgeber	optoelektronisch	mechanisch	direkter Kontakt	Groß	Nein	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
6	Länge	s, l, h	Inkrementalgeber	magneto-resistiv	elektrisch/magnetisch	direkter Kontakt	Groß	Nein	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
7	Länge	s, l, h	Ultraschallsensor	piezoelektrisch	mechanisch/ elektrisch	direkter Kontakt	Groß	Nein	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
8	Länge	s, l, h	Lichtschranke	optoelektronisch	optisch/strahlungstechnisch	direkter Kontakt	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
9	Länge	s, l, h	Lichtschranke	faseroptisch	elektrisch/magnetisch	direkter Kontakt	Groß	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
10	Länge	s, l, h	Wirbelstromsensor	Wirbelstrom	elektrisch/magnetisch	schlecht durch Metall	Klein	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
11	Länge	s, l, h	LVDT-Sensor	induktiv	elektrisch/magnetisch	schlecht durch Metall	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
12	Länge	s, l, h	PLCD-Sensor	magneto-resistiv	elektrisch/magnetisch	gut durch Metall	Groß	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
13	Länge	s, l, h	AMR-Sensor	magneto-resistiv	elektrisch/magnetisch	schlecht durch Metall	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
14	Länge	s, l, h	Radar/Lidar	optoelektronisch	optisch/strahlungstechnisch	direkter Kontakt	Mittel	Nein	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
15	Länge	s, l, h	Laserinterferometer	optoelektronisch	optisch/strahlungstechnisch	direkter Kontakt	Groß	Nein	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
16	Zeit	t	Lichtschranke	optoelektronisch	optisch/strahlungstechnisch	direkter Kontakt	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
17	Kraft	F	DMS	piezoresistiv	mechanisch	gut durch Metall	Klein	Ja	Kleben	ka belgebunden	bis 800°C
18	Kraft	F	FSR-Sensor	piezoresistiv	mechanisch	gut durch Metall	Groß	Ja	Kleben	ka belgebunden	bis 100°C
19	Kraft	F	Piezo-Kraftaufnehmer	piezoelektrisch	mechanisch/ elektrisch	direkter Kontakt	Klein	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
22	Druck	p	DMS	piezoresistiv	mechanisch	gut durch Metall	Klein	Ja	Kleben	ka belgebunden	bis 800°C
23	Druck	p	SAW-Sensor	optoelektronisch?	optisch/strahlungstechnisch	schlecht durch Metall	Klein	Ja	Klemmen/Formschluss	ka bellos	bis 500°C
24	Druck	p	Mikro-Plattenkondensator	kapazitativ	elektrisch/magnetisch	direkter Kontakt	Klein	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 300°C
25	Druck	p	Drucksensor	piezoresistiv	mechanisch	direkter Kontakt	Klein	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 300°C
26	Druck	p	Drucksensor	piezoelektrisch	mechanisch/ elektrisch	direkter Kontakt	Klein	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 500°C
27	Druck	p	Drucksensor	induktiv	elektrisch/magnetisch	direkter Kontakt	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
28	Druck	p	Drucksensor	Hall	elektrisch/magnetisch	direkter Kontakt	Mittel	Ja	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
29	DrehmdM		DMS	piezoresistiv	mechanisch	gut durch Metall	Mittel	Ja	Kleben	ka belgebunden	bis 800°C
30	DrehmdM		Reaktionsmomentsensoren	piezoelektrisch	mechanisch/ elektrisch	gut durch Metall	Groß	Nein	Kleben	ka belgebunden	bis 100°C
31	DrehmdM		Magnetoelastische Drehmoment	magnetoelastisch	elektrisch/magnetisch	gut durch Metall	Groß	Nein	Kleben	ka belgebunden	bis 100°C
32	DrehmdM		Optoelektronische Drehmoments	optoelektronisch	optisch/strahlungstechnisch	direkter Kontakt	Groß	Nein	Kleben	ka belgebunden	bis 100°C
33	Geschw	v	Bewegungsmelder	optoelektronisch	optisch/strahlungstechnisch	direkter Kontakt	Mittel	Nein	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
34	Geschw	v	Radar/Lidar	optoelektronisch	optisch/strahlungstechnisch	direkter Kontakt	Mittel	Nein	Klemmen/Formschluss	ka belgebunden	bis 100°C
35	Beschl	a	DMS	piezoresistiv	mechanisch	gut durch Metall	Mittel	Ja	keine Fixierung	ka belgebunden	bis 100°C
36	Beschl	a	Kondensator	kapazitativ	elektrisch/magnetisch	gut durch Metall	Mittel	Ja	keine Fixierung	ka belgebunden	bis 100°C
37	Beschl	a	piezoelektrischer Beschleunigung	piezoelektrisch	mechanisch/ elektrisch	gut durch Metall	Groß	Ja	keine Fixierung	ka belgebunden	bis 100°C
38	Beschl	a	Hall-Sensor	Hall	elektrisch/magnetisch	gut durch Metall	Mittel	Ja	keine Fixierung	ka belgebunden	bis 100°C
39	Beschl	a	MEMS	piezoresistiv	mechanisch	gut durch Metall	Groß	Ja	keine Fixierung	ka belgebunden	bis 100°C
40	Beschl	a	MEMS	kapazitativ	elektrisch/magnetisch	gut durch Metall	Groß	Ja	keine Fixierung	ka belgebunden	bis 100°C

Abbildung 111: Ausschnitt aus Sensordatenbank.

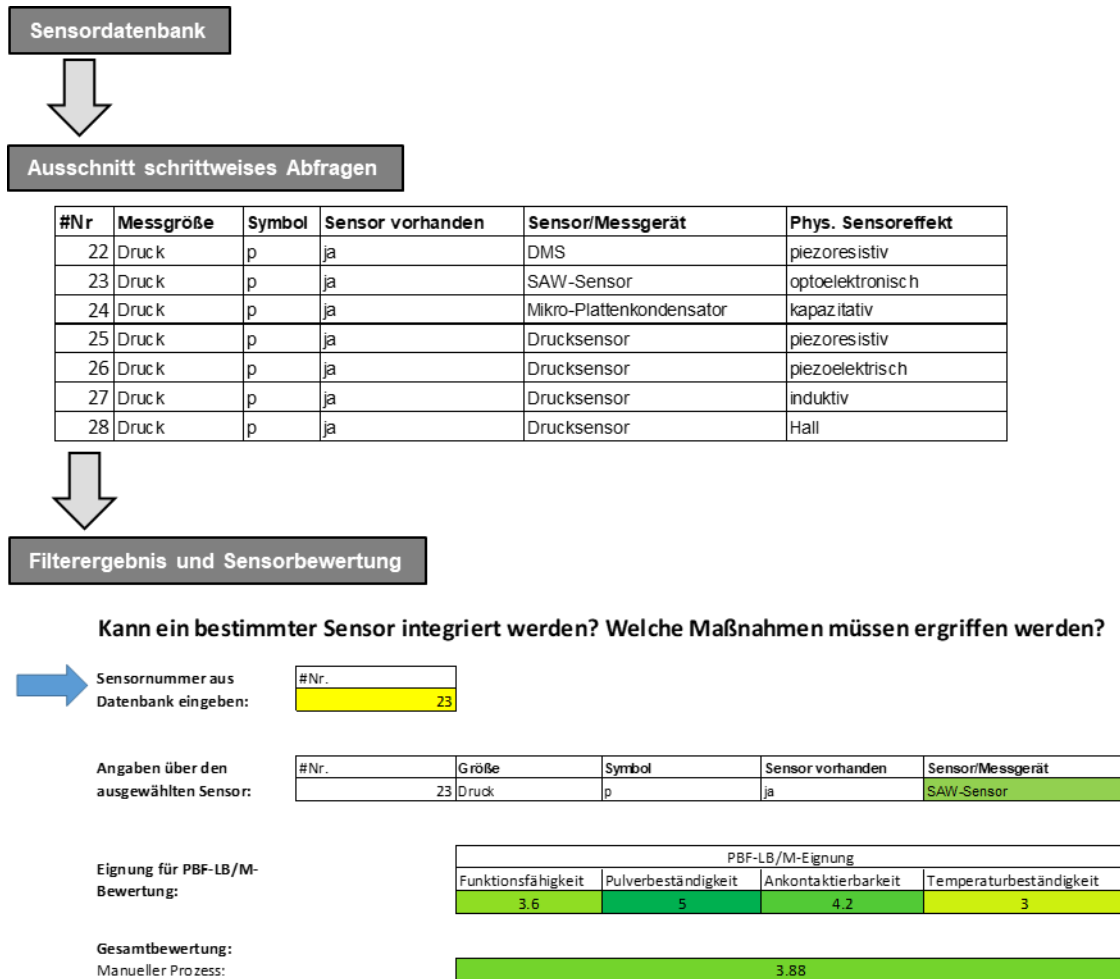


Abbildung 112: Schrittweise Auswahl und Bewertung der Sensoren aus Datenbank (1 Punkt = schlecht, 5 Punkte = gut).

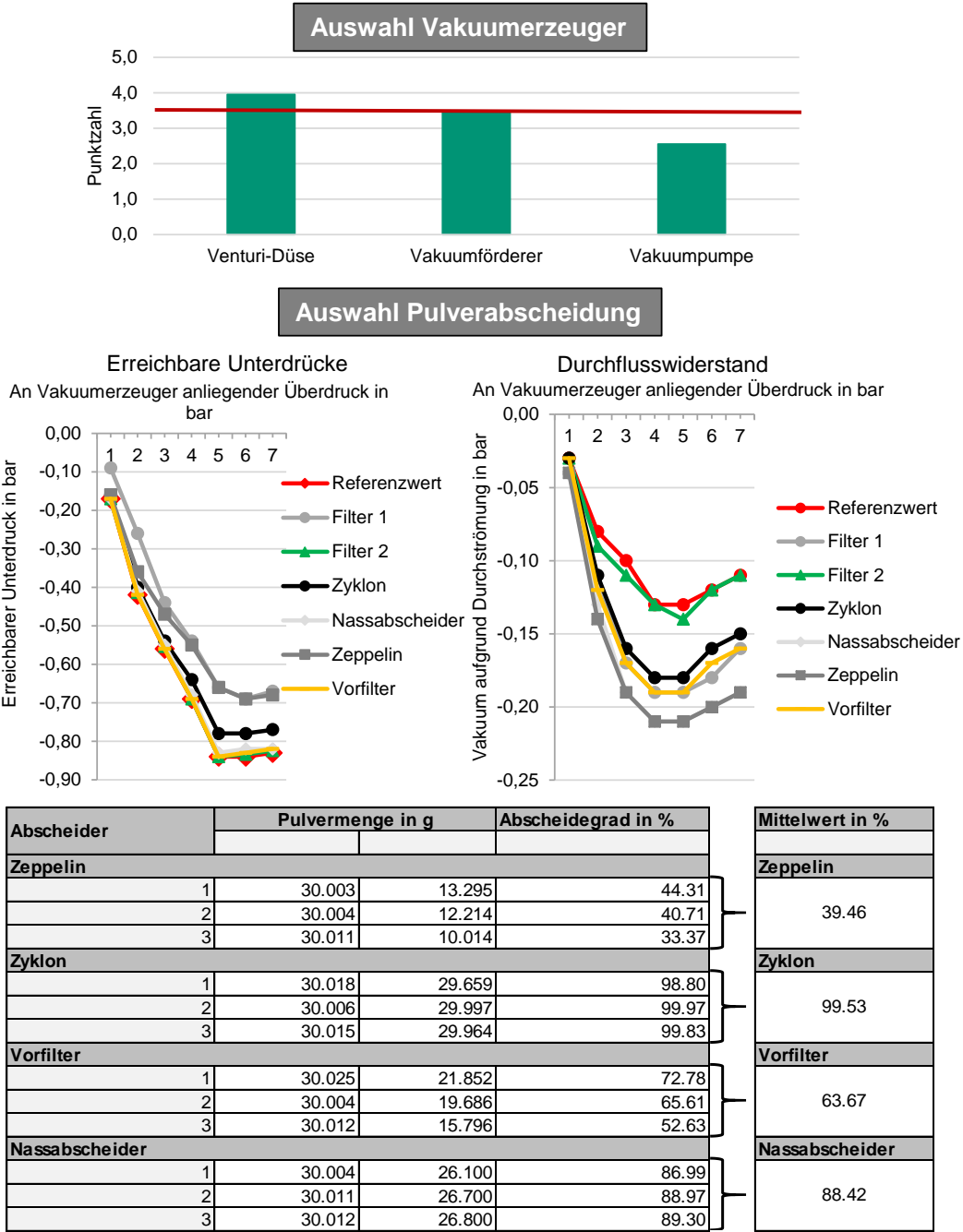


Abbildung 113: Auswahl Unterdruckerzeuger und Filtersystem.

Tabelle 38: Dreistufige Bewertung unterschiedlicher Verbindungsverfahren (+ gut, o mittel, - schlecht). Bewertungskriterien in Anlehnung an KLEIN (2011).

Verfahren	In-Prozess			Kraftschluss Klemmen	Stoffschluss		Post-Prozess Stoffschluss Verguss- masse
	Wände der Kavität	Formschluss Verschluss- element	Sonderform: Pulver		Verschweißen	Kleben	
Festigkeit							
stat. Grundfestigkeit	o	+	o	o	+	o	+
Schwingfestigkeit	+	o	-	o	+	-	+
Warmfestigkeit	+	+	+	+	+	-	o
Langzeitbeständigkeit	+	+	+	+	+	-	o
Umsetzung							
Aufwand	-	o	+	o	+	-	o
Fertigbarkeit	+	-	+	+	o	+	+
Prozesszeiten	+	o	+	+	+	-	o
Platzbedarf	+	o	o	-	+	o	-
Sicherheit	+	+	-	-	+	o	o
Schwingungsdämpfung	o	o	+	o	-	+	+
Summe	+6	+3	+4	+2	+7	-3	+3

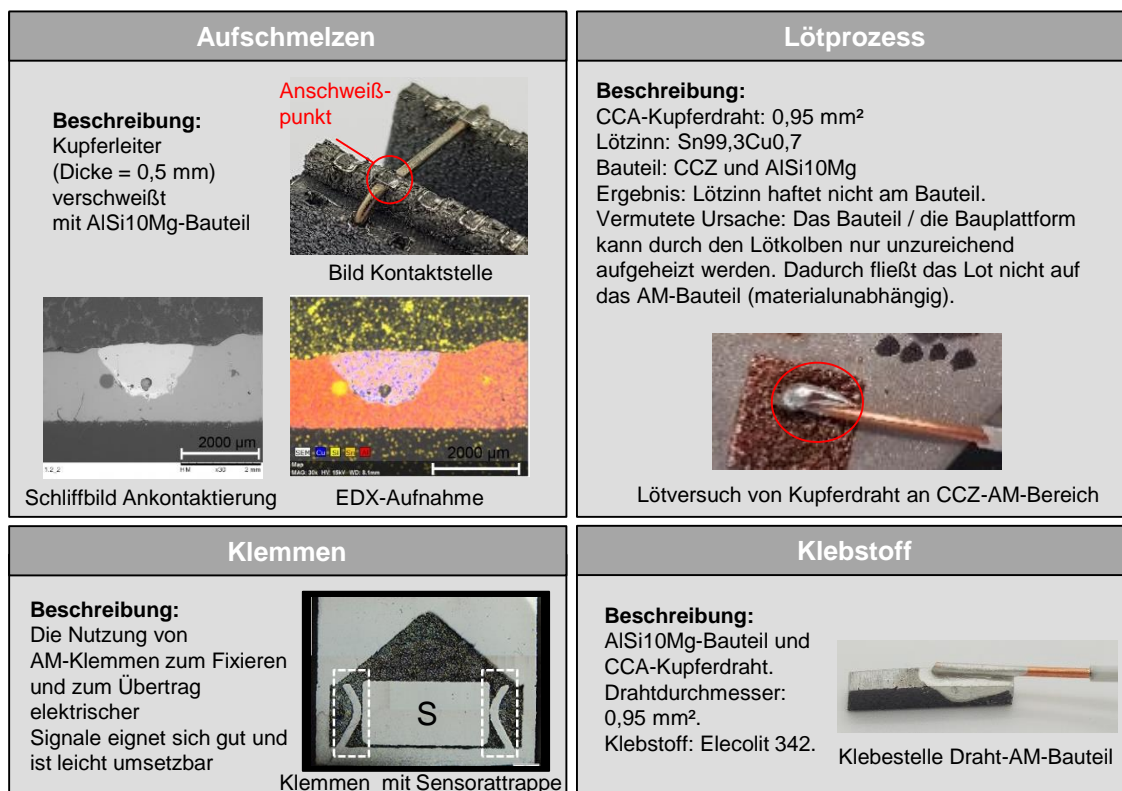


Abbildung 114: Ausschnitt der Versuche zur elektrischen Verbindungstechnik: Schmelzen, Löten, Federklemmen und Klebstoff.

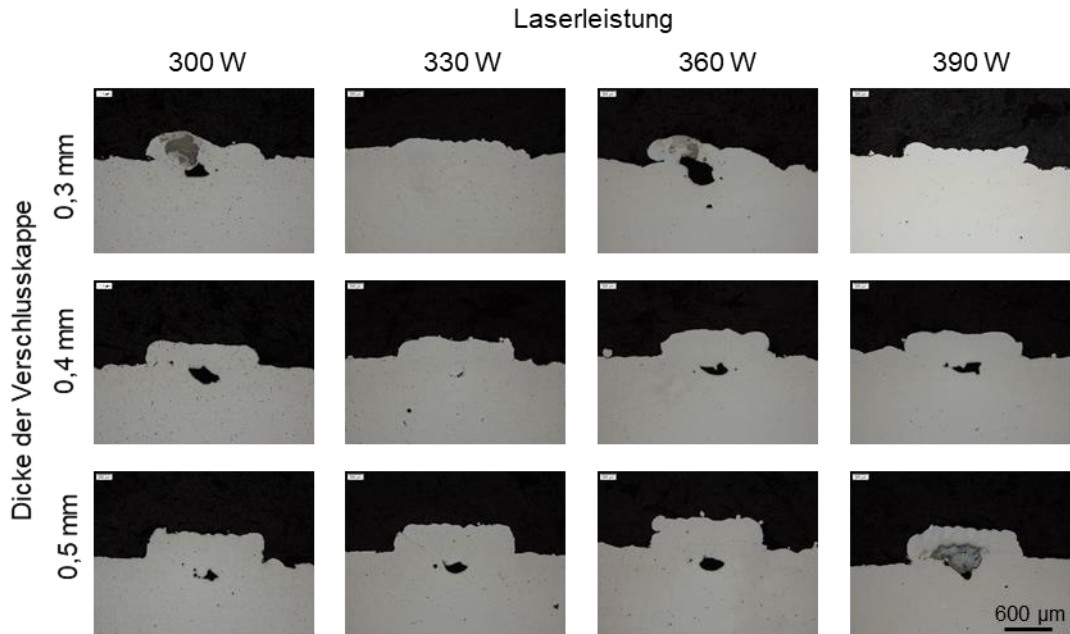
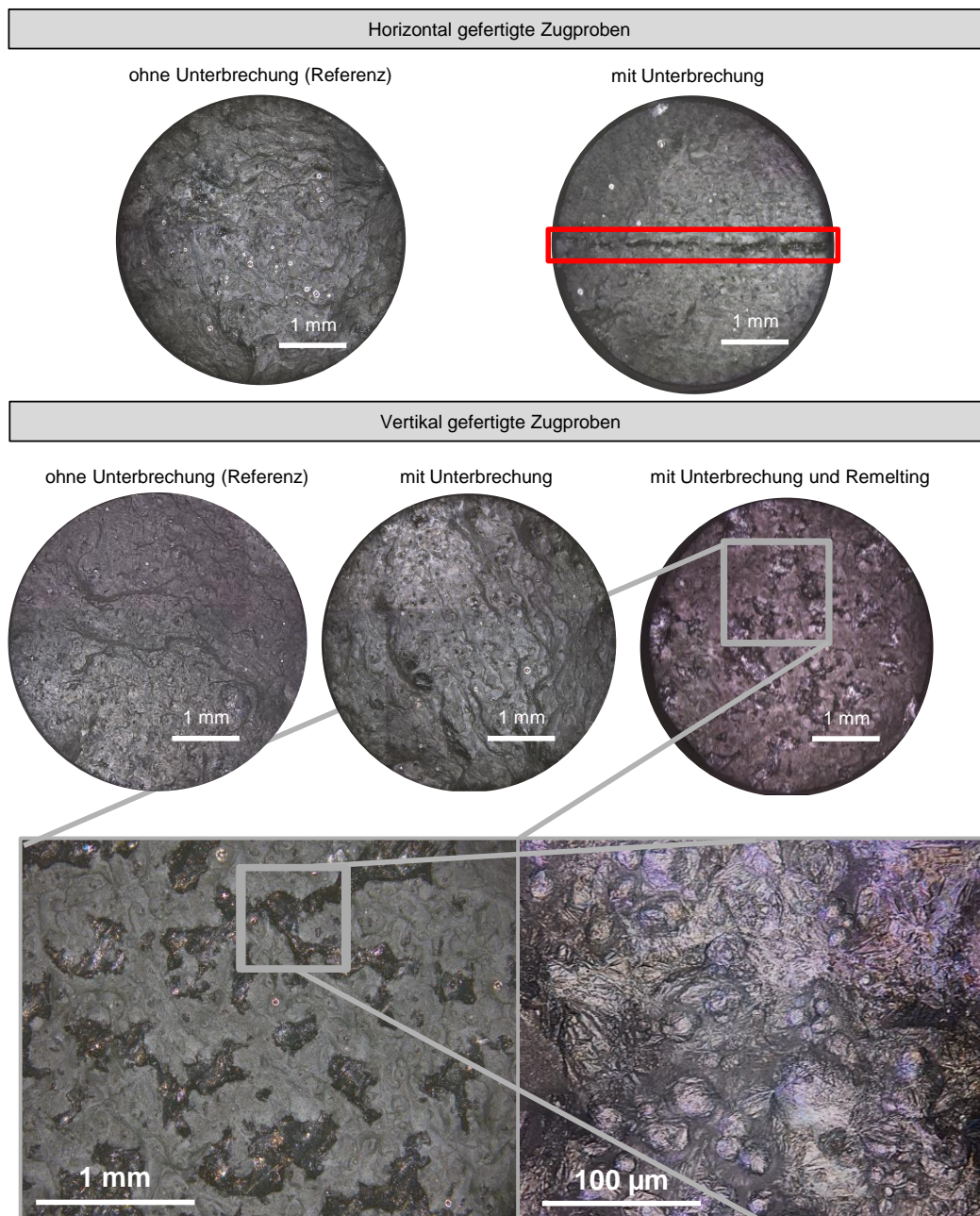


Abbildung 115: AlSi10Mg-Verbindung mit Nickeldraht (SLM125HL). Der Nickeldraht (Durchmesser 0,3 mm) verdampft wesentlich schneller als ein Kupferdraht.



Abbildung 116: Gebrochene Zugproben aus AlSi10Mg mit Prozessunterbrechung.

Bruchflächenanalyse



Es liegt eine durchschnittliche verdunkelte Fläche von 31 % pro Zugstab vor. Die Zugstäbe haben eine durchschnittlich verringerten Zugfestigkeit von 32 %.

Balling Effekt

Abbildung 117: Bruchflächenanalyse der AlSi10Mg-Zugstäbe.

Tabelle 39: Paarweiser Vergleich zur Greiferauswahl.(Skala von 0 bis 10).

	Wirkprinzip Greiferbezeichnung	Mechanisch		Pneumatisch		Elektro- magnetisch	Form- schluss
		Winkel- greifer	Parallel- backen- greifer	Saug- nadel	Saug- greifer	Magnet- greifer	Nadel- greifer
Temperatur- resistenz	Ohne Gewichtung:	2	3	5	10	3	4
	Mit Gewichtung: 6%	0,13	0,19	0,32	0,65	0,19	0,26
Größe	Ohne Gewichtung:	9	5	9	10	0	0
	Mit Gewichtung: 13%	1,16	0,65	1,16	1,29	0,00	0,00
Greifbares Gewicht	Ohne Gewichtung:	9	10	9	10	0	0
	Mit Gewichtung: 13%	1,16	1,29	1,16	1,29	0,00	0,00
Flexibilität	Ohne Gewichtung:	4	4	7	7	2	2
	Mit Gewichtung: 16%	0,65	0,65	1,13	1,13	0,32	0,32
Greifereinfluss	Ohne Gewichtung:	4	4	4	7	4	2
	Mit Gewichtung: 26%	1,03	1,03	1,03	1,81	1,03	0,52
Arbeiten auf engem Raum	Ohne Gewichtung:	4	4	4	10	2	0
	Mit Gewichtung: 26%	1,03	1,03	1,03	2,58	0,52	0,00
Summe der gewichteten Punkte		5,16	4,83	5,84	8,74	2,06	1,10

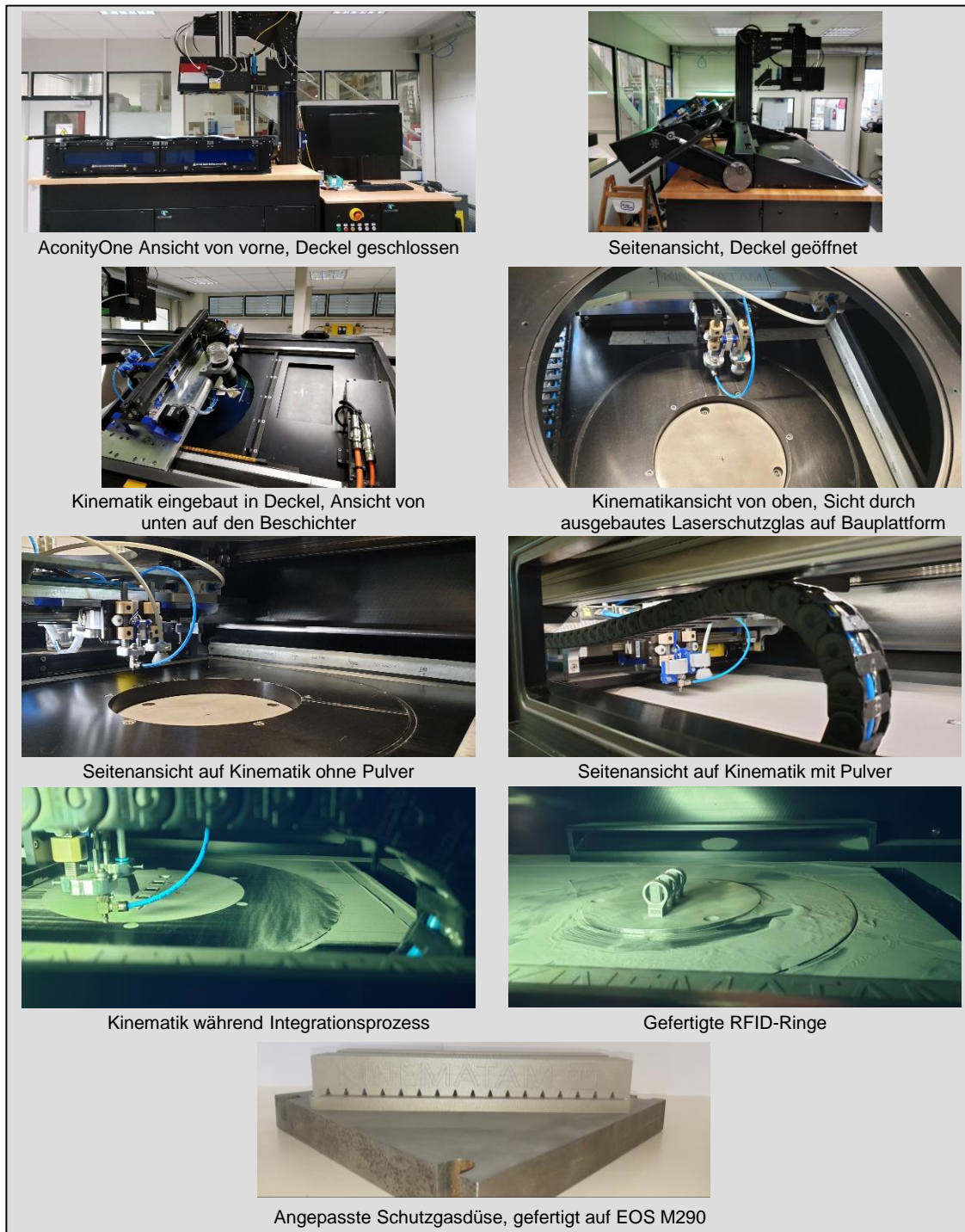


Abbildung 118: Bilder der AconityOne und Komponenten der Automatisierungseinheit.

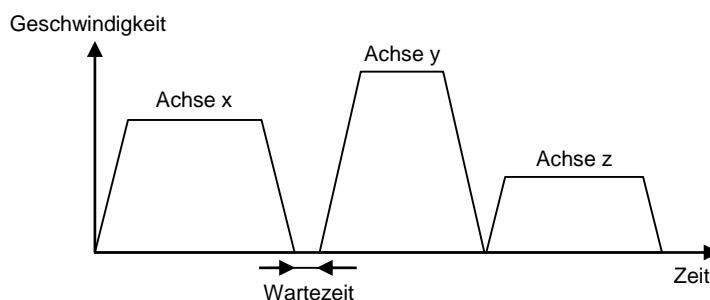


Abbildung 119: PTP-Steuerung – serielle Ansteuerung der Linearachsen in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit und der Zeit. Eine Wartezeit entsteht aufgrund der Kommunikation zwischen den Steuerungen der Kinematik und der PBF-LB/M-Anlage.

Tabelle 40: Nutzwertanalyse zur Beurteilung von zu Verfügung stehenden elektrischen Verbindungstechniken (Bewertung ohne Praxistest).

Richtlinie		DIN ISO 857		DIN EN 60352		Nicht bekannt	
Elektrische Verbindungstechnik	Gewichtungsfaktor	Metallschweißen mittels Laser	Löten (inkl. Materialzufuhr)	Einpress- oder Crimpverbindungen	Klemmverbindung	Leitfähiger Klebstoff	Schraubverbindung
		Automatisierbarkeit	30	2,83	1,67	2,17	2
Durchführungszeit	20	3	2	2,5	2,5	2,17	1,67
Umsetzbarkeit	20	1,83	2,33	1,67	1,83	2	1,83
Stoß- und Vibrationsbeständigkeit	10	2,83	2,17	1,83	1,83	2,17	2,33
Kosteneffizienz (Anschaffung/Unterhalt)	10	2,67	2,5	2	2,17	2,17	2,33
Arbeitsaufwand manueller Tätigkeiten	10	2,5	2	1,5	1,67	1,67	1,67
Summe	100	262	203	202	203	223	173
Rangfolge		1	3	4	3	2	5

Gesellschaftliches Interesse: Die Idee des RFID-Rings erfährt ein hohes industrielles und gesellschaftliches Interesse, sodass das Konzept und dessen Umsetzung in zwei Fernsehbeiträgen, sowie zwei breitenwirksamen Veröffentlichungen wiedergegeben wurden (vgl. Abbildung 121). (PROSIEBEN 2021, SCHEIDL ET AL. 2021, VAN BOCXLAER & BINDER 2021, EINTER ET AL. 2021)



Abbildung 121: Screenshots der Fernsehbeiträge zum Ring mit integriertem RFID-Tag. Links: Sendung Galileo, ProSieben; Rechts: Abendschau, Bayerischer Rundfunk. (PROSIEBEN 2021, SCHEIDL ET AL. 2021).

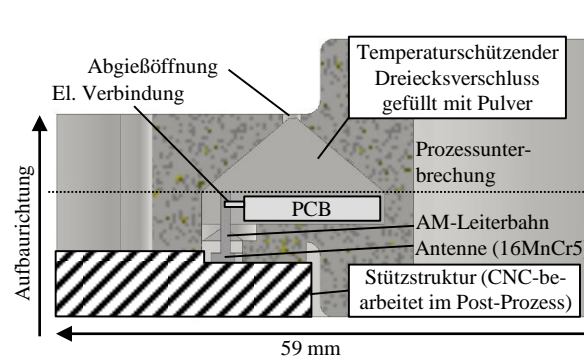


Abbildung 122: Halbiertes Zahnrad im Schnitt zur Veranschaulichung des Herstellungsprozesses.

Tabelle 41: Abgeschätzte Skalierungseffekte der Kosten bei einer Fertigung zwischen zehn und 10000 RFID-Ringen pro Jahr.

Manuell				
Komponente	10 Stück/Jahr	100 Stück/Jahr	1000 Stück/Jahr	10000 Stück/Jahr
RFID-Ring	189,10 €	147,89 €	134,06 €	121,61 €
AM-Bauteil	103,28 €	92,96 €	83,66 €	75,29 €
Sensor	50,37 €	45,34 €	40,80 €	36,72 €
Integration	35,44 €	9,60 €	9,60 €	9,60 €

Automatisiert				
Komponente	10 Stück/Jahr	100 Stück/Jahr	1000 Stück/Jahr	10000 Stück/Jahr
RFID-Ring	808,02 €	204,54 €	131,92 €	113,59 €
AM-Bauteil	103,28 €	92,96 €	83,66 €	75,29 €
Sensor	50,37 €	45,34 €	40,80 €	36,72 €
Integration	654,37 €	66,25 €	7,45 €	1,57 €

Tabelle 42: Vergleichskosten für RFID-Ring hergestellt durch konventionelle Fertigung (Fräsen). Datenbasis: Angebot externer Dienstleister (Buy).

Konventionell hergestellter RFID-Ring				
Komponente	1 Stück	10 Stück	100 Stück	1000 Stück
Angebotspreis (Buy)	127,23 €	30,85 €	15,62 €	12,96 €
Angebotspreis (Make -47 %)	67,43 €	16,35 €	8,28 €	6,87 €

A6 Allgemeine Fehlerbilder bei der Sensorintegration

Im Rahmen der vorgestellten Versuche und zugehörigen Vorversuche konnten einige Probleme und Fehler verzeichnet werden. Diese Fehler sollen unter korrekter Berücksichtigung der vorgestellten Lösungsansätze nicht mehr Auftreten. Deren Kenntnis verstärkt jedoch das Bewusstsein für die Notwendigkeit einiger Schritte, wodurch sich Fehler vermeiden lassen:

- **Kunststoffspritzer im Pulverbett.** Ursache: Teile der eingelegten Komponente werden durch den Laser aufgeschmolzen, sodass der Bauprozess durch Fremdkörper kontaminiert wird. Dies bietet bspw. potenzielle Schwierigkeiten bei einer späteren Prozesszertifizierung. Der Kontakt von dem Metallschmelzbad mit Kunststoffkomponenten muss unbedingt vermieden werden.
- **Verbiegung von Metallplatten bei Belichtung.** Ursache: eine falsche Belichtungsstrategie erzeugt eine inhomogene Temperaturverteilung in der eingelegten Metallplatte – das Metall verbiegt sich nach oben. Die Wärme kann zudem nicht über das Bauteil abfließen. Abhilfe schafft die Erzeugung eines gezielten Wärmeübergangs und die Reduktion der eingetragenen Energie (Anpassung der Belichtungsfläche oder der Laserparameter)
- **Nicht-Ankontaktierung von eingelegten Leitern.** Ursache: 1) die Laserenergiedichte ist zu hoch oder gering oder 2) der Leiter ist nicht korrekt positioniert worden.
- **Verbleibendes Pulver in Kavität nach Absaugprozess.** Ursache: die Kavitätsgröße ist verändert oder die Druckverhältnisse in den Leitungen ist gemindert (z. B. durch eine verlängerte Verschlauchung)
- **Nicht-Anbindung von Schweißnähten.** Ursache: falsche Laserparameter oder nicht korrektes Einlegen der anzuschweißenden Komponente (z. B. schief eingelegt bzw. noch Pulver in Kavität)
- **Sichtbarkeit der Unterbrechungsschicht** am fertigen Bauteil. Ursache: Prozessunterbrechung konnte nicht kompensiert werden. Eine dickere Pulverschicht oder eine oxidierte Unterbrechungsschicht kann nun ursächlich für schlechtere mechanische Eigenschaften sein.
- **Vermehrte Spritzerbildung nach Prozesswiederaufnahme.** Ursache: die Prozessunterbrechung zeigt ihren Einfluss. Entweder ist die Pulverschicht zu dick, der Temperaturgradient größer als zuvor, die Schutzgasatmosphäre verändert oder die Bauteiloberfläche oxidiert.
- **Die eingelegte Komponente ragt aus dem Pulverbett heraus.** Ursache: die eingelegte Komponente ist zu groß, oder das gefertigte Bauteil zu klein. Auch eine inkorrekte Positionierung der eingelegten Komponente kommt

in Frage. Falls mit eingelegten Kabeln gearbeitet wird sind auch diese durch ihre Vorverformung häufig ursächlich für eine Verschiebung des Bauteils.

A7 Fehlerbilder beim Anschweißen von DMS-Metallplättchen

Rechts in Abbildung 123 sind zwei kleine Löcher in Aufbaurichtung im Plättchen zu erkennen. Dieser Effekt lässt sich Rahmen der Versuchsdurchführung nicht vollständig vermeiden, hat jedoch keinen merklichen, negativen Effekt auf die Versuche, da der Großteil des umgebenden Materials weiterhin für eine kraftübertragende Verbindung zur Verfügung steht. Verbunden sind die auftretenden Löcher stets mit einem danebenliegenden Schmelzetropfen, was auf das Auftreten des Humping-Effekts bzw. der Plateau-Rayleigh-Instabilität (PATSCGER 2016) hindeutet. Dieses Phänomen bildet sich vorwiegend aus bei überhöhten Scangeschwindigkeiten und hinterlässt in aperiodischen Abständen Schmelzetropfen nach dem Abkühlen des Schmelzbads. Die durch den Tropfen zusätzliche Materialansammlung scheint mitunter der Grund zu sein, warum im Bereich der schmalen Löcher Material fehlt. In zukünftigen Versuchen soll daher mit tendentiell geringeren Scangeschwindigkeiten gearbeitet werden, um den Effekt vermeiden zu können.

Die Anbindung von Dehnungsmessstreifen ist anfangs herausfordernd. Bei den Versuchsdurchführungen kommt es regelmäßig zu einem Hitzestau im Bauteil was zu inneren Spannungen im Gefüge und damit zu einem, von Kantilevern bekanntem, Aufbiegen der Plättchen führt (vgl. z. B. UHLMANN ET AL. (2021) oder SCHMITT ET AL. (2020), sowie Abbildung 123, Anhang). Dieser Effekt tritt vor allem dann auf, wenn eine Anbindung, und damit eine Wärmeabfuhr, an das Bauteil nicht oder erst zu spät im Belichtungsprozess erzielt werden kann. Selbiges gilt, falls das Plättchen schief eingelegt wurde oder eine einseitig beginnende Belichtungsreihenfolge anstelle einer gegenläufigen Belichtungsreihenfolge gewählt wurde. Dann kommt es zu einer einseitigen Anbindung des Plättchens, während sich die noch lose Seite nach oben zieht. Die Seite kann damit einerseits nicht mehr angeschweißt werden und steht zudem im Eingriffsbereich des Beschichters, was eine Baujobfortführung unmöglich macht.

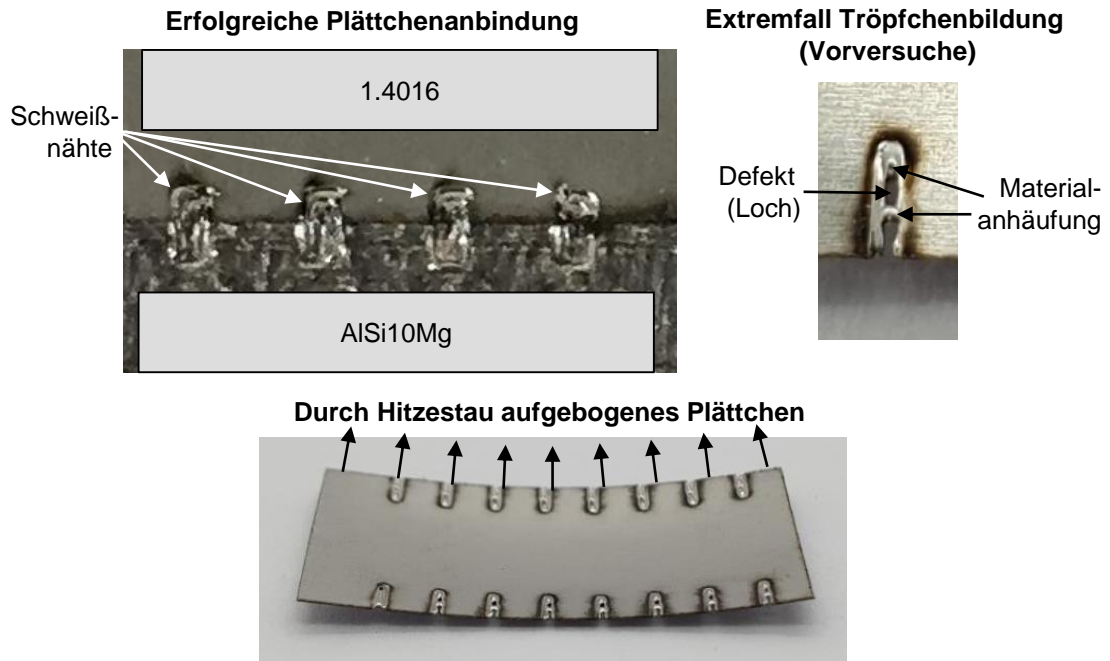


Abbildung 123: Bilder zu den Anbindungsversuchen der DMS-Plättchen aus 1.4016 (ohne Messgitter im Rahmen von Vorversuchen). Zu sehen ist eine erfolgreiche Anbindung des Plättchens (links oben), die sich ausbildende Plateau-Rayleigh-Instabilität (Humping-Effekt, rechts oben, vgl. PATSCHGER (2016)) und das thermische induzierte Verbiegen der Metallplatte (unten).