

Qualitätssicherung bei der Additiven Fertigung mit Draht und Lichtbogen

Daniel Baier

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. techn. Peter Mayr

Prüfende der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
2. Prof. Dr. Jonas Hensel

Die Dissertation wurde am 04.12.2023 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and De-
sign am 08.04.2024 angenommen.

*„Wer bei Kleinigkeiten keine Geduld hat,
dem misslingt der große Plan.“*

KONFUZIUS¹

¹ Konfuzius (551–479 v. Chr.), chinesischer Philosoph

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist in Zeiten globaler Herausforderungen, wie der Klimakrise, dem Mobilitätswandel und der Überalterung der Gesellschaft in westlichen Ländern, für eine nachhaltige Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Der Einfluss eines Industriebetriebs auf die Umwelt und die Gesellschaft hängt dabei entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen. Dabei muss größtes Augenmerk darauf gelegt werden, möglichst ressourcenschonend, effizient und resilient zu werden, um flexibel im volatilen Produktionsumfeld zu agieren.

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

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenz-basierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

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

Rüdiger Daub

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM). Diese Arbeit ist das Ergebnis mehrjähriger intensiver Forschungsaktivitäten und der Zusammenarbeit mit vielen engagierten und inspirierenden Personen.

An erster Stelle richtet sich mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, den Ordinarius des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität München. Hervorheben möchte ich dabei die ausgezeichnete Betreuung meiner Arbeit und das von ihm entgegengebrachte Vertrauen. Überdies danke ich ihm für die Möglichkeit, an innovativen produktionstechnischen Forschungsprojekten mitzuwirken und diese zu leiten. Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jonas Hensel, dem Zweitprüfer und Ordinarius des Lehrstuhls für Schweißtechnik der Technischen Universität Chemnitz, bedanken. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr. techn. Peter Mayr, dem Vorsitzenden der Prüfungskommission und Ordinarius des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der Additiven Fertigung der Technischen Universität München, danken.

Ein wichtiger Aspekt meiner Arbeit war der Austausch mit meinen Kolleginnen und Kollegen am *iwb*. Ich danke allen, die sich die Zeit genommen haben, mit mir über Forschungsinhalte zu diskutieren. Speziell möchte ich den Kolleginnen und Kollegen aus der Abteilung Additive Fertigung danken, die mit ihrem Fachwissen und ihren Anregungen wesentlich dazu beigetragen haben, meine wissenschaftliche Arbeit abzurunden.

Während meiner Tätigkeit am *iwb* hatte ich das Privileg, viele talentierte Studierende zu betreuen und zu unterstützen. Ich bin sehr dankbar für ihre Begeisterung und ihren Ehrgeiz, welche wertvolle Quellen der Motivation und Kreativität für mich darstellten.

Die entstandenen Veröffentlichungen wurden erst durch die geschätzte Zusammenarbeit mit meinen Co-Autorinnen und -Autoren möglich. Ich möchte allen für

die bedeutsamen Beiträge danken, die das Fundament für die vielen wissenschaftlichen Diskussionen bildeten.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden im privaten Umfeld, die mich während meiner gesamten Zeit unterstützt und mir Kraft gegeben haben. Mithilfe ihres stetigen Rückhalts gelang es mir, die Arbeit fertigzustellen.

München, im April 2024

Daniel Baier

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Formelzeichen	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ausgangssituation und Zielsetzung	2
1.3 Methodik	3
1.4 Struktur der Dissertation	3
2 Grundlagen	5
2.1 Überblick	5
2.2 Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen	5
2.2.1 Verfahrensprinzip	5
2.2.2 Energie- und Wärmehaushalt beim Lichtbogen-Schweißen	8
2.3 Werkstoffeigenschaften von Ti 6Al 4V	16
2.4 Infrarot-Thermografie	17
2.4.1 Thermische Strahlung	17
2.4.2 Messprinzip	21
2.5 Potentiometrische Sauerstoff-Festelektrolyt-Sensoren	23
2.5.1 Potentiometrie	23
2.5.2 Messprinzip	25
2.6 Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung	27
2.6.1 Einordnung im Kontext dieser Dissertation	27
2.6.2 Industrielle Anwendungen in der Luftfahrttechnik	29

3	Stand der Wissenschaft und Forschung	31
3.1	Überblick	31
3.2	Prozessuntersuchungen beim WAAM	32
3.2.1	Prozessführung und -stabilität	32
3.2.2	Bauteileigenschaften	35
3.3	Prozessuntersuchungen bei verwandten AM-Verfahren	38
3.4	Qualitätssicherung beim WAAM	39
3.4.1	Thermische Prozessüberwachung	40
3.4.2	Überwachung des Oxidationsverhaltens von Bauteilen aus Ti 6Al 4V	43
3.5	Qualitätssicherung bei verwandten AM-Verfahren	44
3.6	Fazit und Handlungsbedarf	47
4	Wissenschaftliches Vorgehen und Lösungsweg	51
4.1	Überblick	51
4.2	Vorgehensweise	51
4.3	Einordnung der Publikationen	53
4.4	Abgrenzung	55
5	Forschungsergebnisse	57
5.1	Überblick	57
5.2	Zusammenfassung der wissenschaftlichen Publikationen	57
5.2.1	Publikation I: Der Weg zur Additiven Fertigung von qualitativ hochwertigen Teilen mit Draht und Lichtbogen	57
5.2.2	Publikation II: Zugrundeliegende Methodik für ein thermisches Prozessüberwachungssystem für die Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen	59
5.2.3	Publikation III: Thermische Prozessüberwachung und -steuerung für eine endkonturnahe Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen	61
5.2.4	Publikation IV: Ansatz für ein Qualitätssicherungssystem für die Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen	63
5.3	Diskussion	65

6	Zusammenfassung und Ausblick	69
7	Literaturverzeichnis	75
8	Anhang	93
A1	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	93
A2	Kernpublikationen der vorliegenden Dissertation	95

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Al	Aluminium
AM	Additive Fertigung (engl. <i>Additive Manufacturing</i>)
AMPS	Anweisung zur Additiven Fertigung (engl. <i>Additive Manufacturing Procedure Specification</i>)
bspw.	beispielsweise
BTF	sinngemäß aus dem Englischen übersetzt: gekauftes in Relation zum verbauten Material (engl. <i>Buy-to-Fly</i>)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CMT	sinngemäß aus dem Englischen übersetzt: eine Form des Lichtbogen-Schweißens (engl. <i>Cold Metal Transfer</i>)
DED	Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (engl. <i>Directed Energy Deposition</i>)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
EN	Europäische Norm
engl.	englisch
et al.	„und andere“ (lateinisch <i>et alii</i>)
EU	Europäische Union

Abkürzung	Bedeutung
FF	Forschungsfrage
FFS	Forschungsfortschritt
f.	folgend(e)
ff.	fortfolgend(e)
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl. <i>International Organization for Standardization</i>)
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München
LB	Lösungsbaustein
MAG	Metall-Aktivgas-Schweißen
MIG	Metall-Inertgas-Schweißen
MSG	Metall-Schutzgas-Schweißen
PBF-LB/M	Pulverbett-basiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (engl. <i>powder bed fusion of metals using a laser beam</i>)
PS	Plasma-Schweißen
P	Publikation
ROI	„Bereich von Interesse“ (von engl. <i>region of interest</i>)
S.	Seite
SPC	statistische Qualitätslenkung (engl. <i>statistical process control</i>)
Ti	Titan
TR	Technische Regel
TUM	Technische Universität München
u. a.	unter anderem
UWZ	Ursache-Wirkungs-Zusammenhang
V	Vanadium
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche

Abkürzung	Bedeutung
------------------	------------------

WAAM	Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen (engl. <i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>)
------	--

WEZ	Wärmeeinflusszone
-----	-------------------

WIG	Wolfram-Inertgas-Schweißen
-----	----------------------------

z. B.	zum Beispiel
-------	--------------

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Variable	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
a	-	Anzahl der Komponenten
a_T	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
C_{pk}	-	minimaler Prozessfähigkeitsindex
c_{red}	Vol.-%	reduzierter Konzentrationsanteil (am Volumen)
c_{ox}	Vol.-%	oxidierter Konzentrationsanteil (am Volumen)
c_{O_2}	Vol.-%	Sauerstoffkonzentration (am Volumen)
c_p	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität
c_0	m/s	Lichtgeschwindigkeit (ca. $2,998 \cdot 10^8$ m/s)
c_1	$W \cdot m^2$	Strahlungskonstante 1 ($3,74 \cdot 10^{-16}$ W·m ²)
c_2	$K \cdot m$	Strahlungskonstante 2 ($1,44 \cdot 10^{-2}$ K·m)
E	kJ/mm	Streckenenergie
E_z	J	zugeführte Energie
e^-	-	Elektron
F	C/mol	Faraday-Konstante (96485 C/mol)
g	m/s^2	Fallbeschleunigung (ca. 9,81 m/s ²)
h	J·s	Planck'sches Wirkungsquantum (ca. $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s)
I_S	A	Schweißstrom

Variable	Einheit	Bedeutung
k	J/K	Boltzmann-Konstante (ca. $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
k_1	%	Lichtbogenlängen-Korrekturfaktor
L	W/(m ² ·sr)	Strahldichte
L_w	m	Länge des betrachteten Wärmeübergangs
L_λ	W/(m ² ·μm·sr)	spektrale Strahldichte
M^R	W/m ²	spezifische Ausstrahlung eines realen Körpers
M^S	W/m ²	spezifische Ausstrahlung
M_λ^S	W/(m ² ·μm)	spezifische spektrale Ausstrahlung
m	kg	Masse
Nu	-	Nusselt-Zahl
n_{ges}	mol	Gesamt-Stoffmenge
n_i	mol	Teil-Stoffmenge
O_2	-	Sauerstoff
OSG	-	obere Spezifikationsgrenze
p_{ges}	hPa	Gesamtdruck
p_i	hPa	Partialdruck
$p_{O_2, \text{Atm}}$	hPa	Sauerstoff-Partialdruck in der Atmosphäre
$p_{O_2, \text{Ref}}$	hPa	Sauerstoff-Partialdruck als Referenz
Q	kJ/mm	Wärmeeinbringung
\dot{q}_s	W/m ²	Wärmestromdichte
$\vec{\dot{q}}_s$	W/m ²	Wärmestromdichte-Vektor
R	J/(mol·K)	Gaskonstante (ca. 8,314 J/(mol·K))
Re	-	Reynolds-Zahl
T	K	Temperatur
T_A	K	Messstrecken-Temperatur

Variable	Einheit	Bedeutung
T_a	K	absolute Temperatur
T_K	K	Körperoberflächen-Temperatur
T_S	°C	Sonden-Temperatur
T_U	K	Umgebungs-Temperatur
T_{ZL}	°C	Zwischenlagen-Temperatur
t	s	Zeit
t_W	s	Zwischenlagen-Wartezeit
U	V	Spannungsdifferenz
U_0	V	Normalpotenzial
U_S	V	Schweißspannung
USG	-	untere Spezifikationsgrenze
v_D	m/min	Drahtvorschub-Geschwindigkeit
v_P	mm/min	Prozess-Geschwindigkeit
v_S	m/s	Strömungs-Geschwindigkeit
\bar{x}	-	Lage des Prozess-Mittelwerts
z	-	Anzahl der ausgetauschten Elektronen

Griechische Buchstaben

Variable	Einheit	Bedeutung
α_A	-	Absorptionsanteil
α_w	W/(m ² ·K)	Wärmeübergangskoeffizient
β	1/K	thermischer Ausdehnungskoeffizient
ε	-	Emissionskoeffizient
η	-	Wirkungsgrad

Variable	Einheit	Bedeutung
λ	μm	Wellenlänge
λ_w	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
ρ	-	Reflexionskoeffizient
ρ_R	-	Reflexionsanteil
ρ_w	kg/m^3	Dichte
σ	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante (ca. $5,67\cdot 10^{-8}$ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$)
σ_m	N/m^2	Eigenspannung
σ_S	-	Streuung des Prozessergebnisses
τ	-	Transmissionskoeffizient
τ_A	-	Transmissionskoeffizient der Messstrecke
τ_T	-	Transmissionsanteil
Φ	W	Strahlungsleistung
Φ_A	W	von der Messstrecke ausgehende Strahlungsleistung
Φ_D	W	detektierbare Strahlungsleistung
Φ_K	W	vom Körper ausgehende Strahlungsleistung
Φ'_K	W	abgeschwächte Körper-Strahlungsleistung
Φ_α	W	Strahlungsleistung des absorbierten Anteils
Φ_ε	W	Strahlungsleistung des emittierten Anteils
Φ_ρ	W	Strahlungsleistung des reflektierten Anteils
Φ_τ	W	Strahlungsleistung des transmittierten Anteils
φ	$^\circ$	Polarwinkel
Ω	sr	Raumwinkel

1 Einleitung

1.1 Motivation

„Europäischer Grüner Deal“ – so lautet die Strategie zur Klimaneutralität der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2019 (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2019). Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU) sollen bis 2050 klimaneutral werden, indem das gemeinsame Ziel verfolgt wird, die Netto-Treibhausgas-Emissionen in der EU-Wirtschaft auf null zu reduzieren. Im Transport- und Verkehrssektor ließen sich 2018 rund 16 % der europaweiten Treibhausgas-Emissionen der Luftfahrt zuordnen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2021). Nach dem kurzzeitigen pandemiebedingten Rückgang dieser Emissionen wird deren Anteil zukünftig voraussichtlich weiter steigen. Die damit einhergehende stetig wachsende Nachfrage nach Energieeffizienz und ressourcenschonender Herstellung von Bauteilen in weiten Teilen der Industrie führt zu einem Umbruch in der Luftfahrttechnik (MONTEIRO ET AL. 2022). Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) adressiert die Reduzierung der Klimawirkung unter anderem in den Bereichen neuer Flugzeugkonzepte und -komponenten (DLR 2021). Um dem übergeordneten Ziel der Einsparung von Emissionen näherzukommen, wird bereits seit vielen Jahren der Leichtbau zur Herstellung von Flugzeugbauteilen beforscht. Die Additive Fertigung (engl. *Additive Manufacturing*, kurz AM) birgt ein großes Einsparpotenzial, da Bauteile damit endkonturnah hergestellt werden können (WILLIAMS & BOYER 2020). Mit dem AM-Ansatz können bei nachgelagerten Prozessschritten wie der subtraktiven Werkstoffbearbeitung Prozessnebenprodukte wie Späne erheblich reduziert werden. Ein prominenter Leichtbau-Werkstoff in der Luftfahrttechnik ist die Titanlegierung Ti 6Al 4V. Die Gründe für den Einsatz der Titanlegierung Ti 6Al 4V sind vorwiegend ihre geringe Dichte, ihre hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit sowie die geringe thermische Ausdehnung des Werkstoffs (MOHD YUSUF ET AL. 2019).

1.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Konventionell werden großvolumige Luftfahrt-Strukturkomponenten aus einem gegossenen Rohwerkstoff, und damit aus dem Vollen, spanend hergestellt (DUTTA & FROES 2016). Unter Verwendung von schwer zu zerspanenden Werkstoffen, bspw. der Titanlegierung Ti 6Al 4V, entstehen geringe Materialausnutzungsgrade, hohe Werkzeugkosten und Werkstoffverschwendungen (ALLEN 2006). Im anwendungsbezogenen Kontext werden die Verschwendungsgrade häufig im *Buy-to-Fly*-Verhältnis (BTF-Verhältnis) angegeben. Das BTF-Verhältnis beschreibt den Quotienten aus der initialen Rohwerkstoff-Masse und der finalen Bauteil-Masse. Bei der konventionellen Fertigung in der Luftfahrttechnik wird zum Teil ein BTF-Verhältnis von bis zu 30:1 genannt (WILLIAMS & BOYER 2020). Eine Prognose von WILLIAMS ET AL. (2016) beschreibt eine Prozesskette, bei der ein additiver Fertigungsschritt vor der finalen Bauteil-Zerspanung integriert wird – die Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*, kurz WAAM). Der WAAM-Prozess erlaubt eine endkonturnahe Bauteilherstellung für den Zerspanungsprozess (WILLIAMS ET AL. 2016). WAAM basiert auf dem Lichtbogen-Schweißprinzip und kann der additiven Fertigungskategorie Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (engl. *Directed Energy Deposition*, kurz DED) unter Verwendung von Draht und Lichtbogen zugeordnet werden (DIN EN ISO/ASTM 52900). Wie beim Auftragschweißen werden beim WAAM-Prozess ebenfalls Schweißraupen auf einer Substratplatte lagenweise abgelegt. Mit dieser Fertigungstechnologie können Bauteile aus Ti 6Al 4V mit Aufbauraten von mehr als 3 kg/h hergestellt werden (SEQUEIRA ALMEIDA & WILLIAMS 2010). Der WAAM-Prozess überzeugt mit hohen Aufbauraten, nahezu unlimitierten Bau-raum-Größen und einer einfachen Handhabung von Ausgangsmaterialien im Vergleich zu Pulverbett-basierten additiven Fertigungsprozessen (WILLIAMS ET AL. 2016). Mit der Prozesskette, bestehend aus dem WAAM-Prozess und der konsekutiven Bauteil-Zerspanung, sollen BTF-Verhältnisse von $< 2:1$ erzielt werden (WILLIAMS ET AL. 2016).

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, den Prozess der Additiven Fertigung mit Draht und Lichtbogen zur Herstellung von Bauteilen aus Ti 6Al 4V zu qualifizieren. Hierbei liegt der Fokus auf der reproduzierbaren und formtreuen Fertigung geometrisch sowohl einfacher als auch komplexer Bauteile. Es gilt Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge (UWZ) zwischen Prozessparametern und geometrischen Bauteileigenschaften zu bestimmen, um den hohen schweiß-technischen Anforderungen des Werkstoffs Ti 6Al 4V gerecht zu werden. Dabei

sind das Einhalten einer Schutzgasatmosphäre und die Berücksichtigung des thermischen Bauteil-Haushalts von großer Bedeutung. Im Rahmen der Zielsetzung soll ein kalibriertes thermisches Prozessüberwachungssystem zur Interpretation von Temperatursignalen, die während des Prozesses auf der Bauteil-Lagenoberfläche detektiert werden sollen, befähigt werden. Zuletzt sollen in Anbetracht des Ziels die Erkenntnisse in einer Online-Qualitätssicherung zusammenfließen.

1.3 Methodik

Um die genannten Ziele zu erreichen, muss zunächst untersucht werden, wie Bauteile formtreu mittels WAAM gefertigt werden können. Es werden Probekörper identifiziert, an denen Prozessuntersuchungen angestellt werden. Eine modellbasierte Beschreibung der UWZ folgt, um anschließend geeignete Methoden der Prozessüberwachung und der Qualitätssicherung ableiten zu können. Mithilfe des Einsatzes einer thermischen Prozessüberwachung können Prozessführungsstrategien für die Fertigung formtreuer Bauteile festgelegt werden. Eine Methode zur Sensitivitätsanalyse der auftretenden Temperaturen wird definiert, um den thermischen Einfluss auf die geometrischen Bauteileigenschaften festzustellen. Zudem werden Grenzwerte für den Sauerstoffgehalt im Bauraum während des WAAM-Prozesses ermittelt, welche eine Interpretation auftretender Bauteil-Oxidationen erlauben.

1.4 Struktur der Dissertation

Die vorliegende Arbeit besteht aus sechs Kapiteln. Zu Beginn wird in Kapitel 1 in das Thema der Dissertation eingeleitet. Kapitel 2 umfasst die Grundlagen des WAAM-Verfahrens, der Prozess-Charakteristiken des Lichtbogen-Schweißprozesses von Werkstoffen aus Ti 6Al 4V, der Infrarot-Thermografie, der potentiometrischen Sensorik und der Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung. In Kapitel 3 wird der Stand der Wissenschaft und Forschung zu Prozess- und Bauteiluntersuchungen beleuchtet und darüber hinaus auf die Prozessüberwachung eingegangen. Bei dieser Dissertation handelt es sich um eine publikationsbasierte Arbeit, deren wissenschaftliche Inhalte bereits in vier Veröffentlichungen präsentiert wurden. Das wissenschaftliche Vorgehen und der Lösungsweg werden in Kapitel 4 erläutert. Kapitel 5 enthält die wesentlichen Inhalte und Erkenntnisse aus den separaten Veröffentlichungen. Zuletzt werden die Inhalte der Dissertation in

Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf künftige Forschungsthemen wird gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Überblick

In diesem Kapitel wird in Abschnitt 2.2 die Funktionsweise der Additiven Fertigung mit Draht und Lichtbogen vorgestellt. Darauf aufbauend werden die physikalischen Gegebenheiten des thermischen Haushalts beim Lichtbogen-Schweißen erläutert. Die für diese Dissertation relevanten Werkstoffeigenschaften der Titanlegierung Ti 6Al 4V werden in Abschnitt 2.3 aufgezeigt. Die Grundlagen der Infrarot-Thermografie und der potentiometrischen Sauerstoff-Festelektrolyt-Sensoren werden in den Abschnitten 2.4 und 2.5 ausgeführt. Zuletzt wird auf die Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung in Abschnitt 2.6 eingegangen. Für eine einfache Nachvollziehbarkeit der präsentierten Inhalte werden Kenntnisse über die Grundlagen der Additiven Fertigung und der allgemeinen Messtechnik vorausgesetzt. Ausführlich werden die beiden Themenbereiche bspw. in GEBHARDT (2016) und TÖNSHOFF (2001) behandelt.

2.2 Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen

2.2.1 Verfahrensprinzip

WAAM zählt zu der additiven Fertigungskategorie Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DIN EN ISO/ASTM 52900) und basiert auf der Lichtbogen-Schweißtechnik. Beim WAAM ist die Wärmequelle ein Lichtbogen, welcher einen Schweiß-Zusatzwerkstoff in Form eines Drahtes bis zum schmelzflüssigen Zustand erwärmt. Die so entstehenden *Schweißraupen* werden lagenweise aufeinander abgelegt. Durch den Einsatz eines Manipulators, welcher den Schweißkopf gerichtet bewegt, können Bauteile hergestellt werden. Eine erste Form des WAAM-Prozesses wurde im Jahr 1920 patentiert (BAKER 1920).

Beim WAAM können verschiedene Lichtbogen-Schweißverfahren eingesetzt werden. Häufig werden die Schweißverfahren Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG), Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) und Plasma-Schweißen (PS) in der Literatur genannt (DING ET AL. 2015A). Das MSG-Schweißen kann anhand des eingesetzten Schutzgases in das Metall-Inertgas-Schweißen (MIG) und das Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG) eingeteilt werden (MATTHES & SCHNEIDER 2016, S. 190). Abbildung 1 zeigt das WAAM-Funktionsprinzip am Beispiel eines MSG-Schweißprozesses.

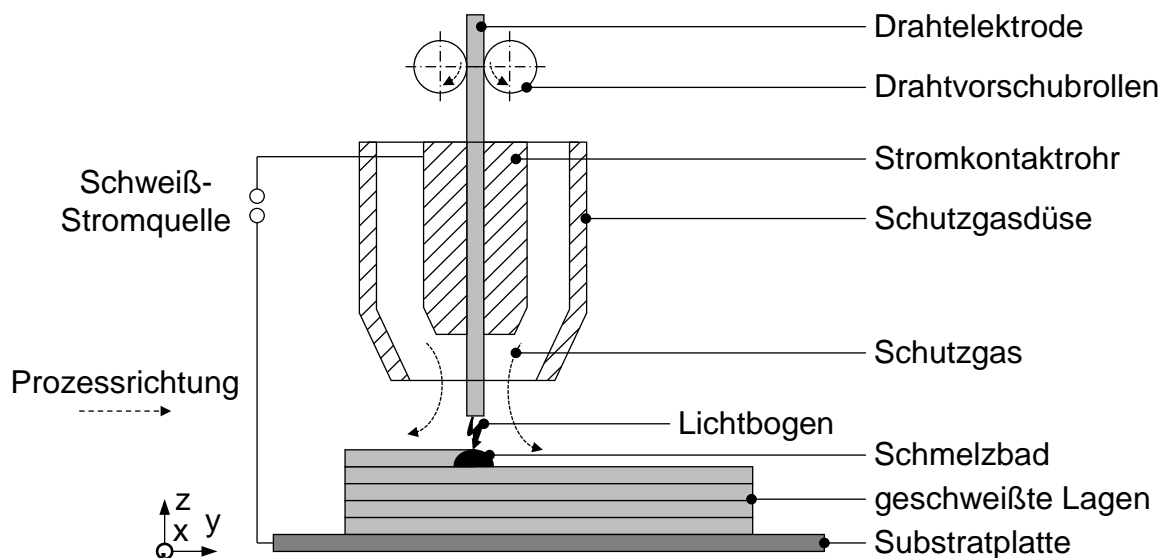


Abbildung 1: WAAM-Funktionsprinzip auf Basis eines MSG-Schweißprozesses (in Anlehnung an ISO/TR 25901-3)

Die Schweißparameter zählen zu den technisch-physikalischen Kenngrößen beim WAAM und sie stellen die notwendigen Informationen für die Ausführung von Schweißarbeiten bei einer Schweißaufgabe dar (DIN 1910-100). Zu den Schweißparametern zählen u. a.:

- der Schweißstrom I_S ,
- die Schweißspannung U_S ,
- die Drahtvorschub-Geschwindigkeit v_D ,
- die Prozess-Geschwindigkeit v_P ,
- der Lichtbogenlängen-Korrekturfaktor k_l und
- die Zwischenlagen-Temperatur T_{ZL} .

Die Drahtvorschub-Geschwindigkeit v_D repräsentiert die Geschwindigkeit, mit welcher die Drahtelektrode dem Substrat zugeführt wird. Die Prozess-Geschwindigkeit v_P steht für die Geschwindigkeit, mit welcher der Schweißkopf über die vorgegebene Schweißbahn bewegt wird. Die räumliche Ausdehnung und die Wirkdauer des Lichtbogens können durch den Lichtbogenlängen-Korrekturfaktor in der Schweiß-Stromquelle bestimmt werden, sodass bspw. die Schweißraupen-Oberflächen geometrisch beeinflusst werden können (BRUCKNER 2013, S. 12 f.). Die Zwischenlagen-Temperatur T_{ZL} wird als die Temperatur definiert, welche unmittelbar vor Schweißbeginn der darauffolgenden Lage im angrenzenden Grundwerkstoff vorliegt. (DIN 1910-100; DIN EN ISO 13916)

Die für das Erstellen dieser Dissertation durchgeführten Experimente wurden mit einer Subkategorie des MSG-Prozesses umgesetzt – dem *Cold Metal Transfer* (CMT). Die Firma Fronius International GmbH hat das Patent für das CMT-Verfahren inne (SCHORGHUBER 2006). Beim CMT-Verfahren wird die Drahtelektrode in einer pulsierenden Bewegung während einer zyklisch reversierenden Lichtbogenwirk- und Kurzschlussphase auf die Substratplatte aufgeschmolzen (SCHORGHUBER 2006).

Die Phasen der Tropfenablage beim CMT-Schweißen können wie folgt zusammengefasst werden: In der *Lichtbogenwirkphase* wird die stromdurchflossene Drahtelektrode mithilfe der Drahtvorschubrollen in Richtung des Werkstücks zugeführt. Diese Bewegung stoppt, sobald ein Kurzschluss entsteht und der Lichtbogen erlischt. Die Bewegung der Drahtelektrode wird umgekehrt, sodass sich die Drahtelektrode vom Werkstück wieder entfernt. Während der *Kurzschlussphase* kommt es zum Werkstofftransfer bzw. zu einer Tropfenablösung von der Drahtelektrode. Anschließend wird der Lichtbogen gezündet und der Prozess startet erneut mit einer Richtungsänderung der Drahtelektroden-Bewegung. Diese zyklisch reversierende Bewegung der Drahtelektrode findet in einem Frequenzbereich von 50 bis 130 Hz statt. (BRUCKNER 2013, S. 9 f.)

Abbildung 2 zeigt schematisch den Werkstofftransfer. Durch die Oberflächenspannung bildet sich das flüssige Metall am Ende der Drahtelektrode zu einer Tropfenform aus und die Oberflächenspannung wirkt der Tropfenablösung entgegen. Durch den Stromfluss in der Drahtelektrode entsteht ein Magnetfeld. Die radial wirkende Lorentzkraft² schnürt die Drahtelektrode ein und ist für die Tropfenablösung maßgeblich verantwortlich. Dieser Mechanismus wird als Pincheffekt bezeichnet. Die Gewichtskraft wirkt in Richtung der Erdoberfläche und fördert die

² entspricht einer elektromagnetischen Kraft

Tropfenablösung. Darüber hinaus begünstigen die Strömungskraft des Schutzgases und die Sogkraft, die durch die Plasmaströmung hervorgerufen wird, die Tropfenablösung. Aufgrund der hohen Temperaturen im Lichtbogen entstehen Metalldämpfe. Die Rückstoßkraft der Metalldämpfe wirkt ebenfalls der Tropfenablösung entgegen. (MATTHES & SCHNEIDER 2016, S. 199 f.)

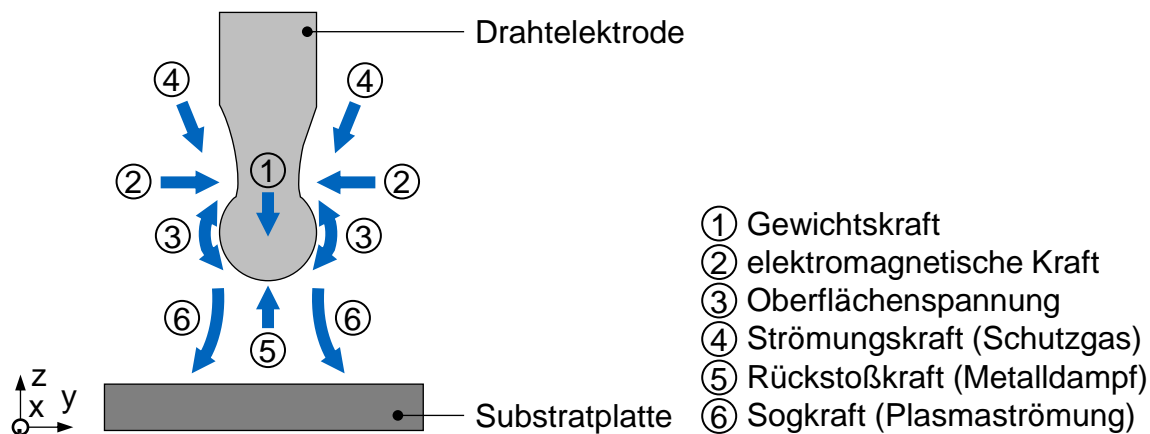


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Werkstofftransfers bei einem MSG-Schweißprozess (in Anlehnung an MATTHES & SCHNEIDER 2016, S. 199 und DILTNEY 1994, S. 71)

2.2.2 Energie- und Wärmehaushalt beim Lichtbogen-Schweißen

Beim Lichtbogen-Schweißen können u. a. die Form der Schweißraupe durch die Wahl der Schweißparameter beeinflusst und das entstehende Temperaturfeld durch die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs bestimmt werden (DILTNEY 2005, S. 45). Die für den Schweißprozess benötigte elektrische Energie kann als Streckenenergie E ausgedrückt werden. Sie kann mithilfe der Schweißparameter durch folgende Gleichung beschrieben werden (DIN 1910-100):

$$E = \frac{U_S \cdot I_S}{v_p} \quad (2-1)$$

U_S entspricht der Schweißspannung, I_S dem Schweißstrom und v_p der Prozess-Geschwindigkeit.

Die Wärmeeinbringung Q ist die Energie, welche in die Wärmeeinflusszone³ (WEZ) sowie in Teilen auch in die die WEZ umgebenden Bereiche eingebracht

³ Die WEZ beschreibt den Bereich der Bauteile, in welchem aufgrund des thermischen Einflusses eine Gefügeänderung stattfinden kann (MATTHES & SCHNEIDER 2016, S. 17).

wird. Q kann durch das Produkt aus dem thermischen Wirkungsgrad η und der Streckenenergie E beschrieben werden (DIN 1910-100):

$$Q = \eta \cdot E. \quad (2-2)$$

Durch die Wärmeeinbringung findet eine Wärmeübertragung in das Werkstück und in die an das Werkstück angrenzende Umgebung statt. Ausgelöst wird die Wärmeübertragung durch unterschiedliche Temperaturen, die an verschiedenen Stellen entstehen (GERTHSEN & MESCHÉDE 2006, S. 232; HERWIG & MOSCHALLSKI 2014, S. 4).

Der Wärmeübergangskoeffizient α_w kann als Maß für die Bestimmung der Wärmeübertragungsintensität verwendet werden. α_w kann wie folgt formalisiert beschrieben werden:

$$\alpha_w = \frac{\dot{q}_s}{\Delta T}, \quad (2-3)$$

wobei \dot{q}_s für die Wärmestromdichte an der Systemgrenze und ΔT für den Temperaturunterschied stehen. (HERWIG & MOSCHALLSKI 2014, S. 5)

Bei der Wärmeübertragung werden die Transportmechanismen *Konduktion*, *Konvektion* und *Wärmestrahlung* unterschieden.

Konduktion ist die Wärmeleitung in einem Medium⁴ oder zwischen mehreren solcher Medien (VOLLMER & MÖLLMANN 2017, S. 352 f.; BÖCKH & WETZEL 2009, S. 4). Die Wärmeübertragung findet zwischen Molekülen statt, zwischen welchen ein Temperaturgradient besteht. Moleküle bewegen sich um ihre Ausgangslage (Brownsche Bewegung). Bei höheren Temperaturen verstärken sich diese Bewegungen und es kommt zu molekularen Wechselwirkungen aufgrund von Zusammenstößen einzelner Moleküle. (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENS-TECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 19; GERTHSEN & MESCHÉDE 2006, S. 223)

Um den Zusammenhang zwischen der Temperatur T und der Wärmestromdichte \dot{q}_s bzw. dem Wärmestromdichte-Vektor $\vec{\dot{q}}_s$ herzustellen, wird eine konstitutive Gleichung mithilfe des *Fourier-Ansatzes* wie folgt eingesetzt:

$$\vec{\dot{q}}_s = -\lambda_w \cdot \text{grad}T. \quad (2-4)$$

⁴ Das Medium kann dabei ein ruhender Festkörper, ein stationäres Gas oder eine Flüssigkeit sein.

Dabei entspricht λ_w der werkstoffspezifischen Wärmeleitfähigkeit. Mit dem negativen Vorzeichen wird die Richtung des Wärmestromdichte-Vektors zum niedrigeren Temperaturniveau berücksichtigt. Der Temperaturgradient kann bspw. im kartesischen Koordinatensystem gezeigt werden. (HERWIG & MOSCHALLSKI 2014, S. 23)

Für die Bestimmung des auftretenden Temperaturfelds kann die Wärmeleitungsgleichung eindimensional wie folgt vereinfacht dargestellt werden (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 744):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_T \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2-5)$$

Dabei steht t für die Zeit, x für die Richtungskordinate des Wärmeflusses und a_T für die Temperaturleitfähigkeit des Werkstoffs. Die Temperaturleitfähigkeit a_T kann wie folgt beschrieben werden:

$$a_T = \frac{\lambda_w}{\rho_w \cdot c_p}, \quad (2-6)$$

wobei ρ_w der Dichte entspricht und c_p für die spezifische Wärmekapazität des Werkstoffs steht (BÖCKH & WETZEL 2009, S. 47). Die Eigenschaft eines Werkstoffs, thermische Energie zu speichern, kann durch die spezifische Wärmekapazität c_p beschrieben werden (HERWIG & MOSCHALLSKI 2014, S. 33):

$$c_p = \frac{\Delta E_z}{m \cdot \Delta T}, \quad (2-7)$$

wobei ΔE_z für die zugeführte Energie, m für die Masse des Werkstücks und ΔT für den erreichten Temperaturunterschied zwischen der Ausgangstemperatur und der Endtemperatur steht (GERTHSEN & MESCHEDE 2006, S 212).

Als **Konvektion** wird ein Wärmetransport-Mechanismus bezeichnet, der durch einen Stofftransport stattfindet. Nach VOLLMER & MÖLLMANN (2017, S. 355) wird eine Konvektion zwischen einem Festkörper und einem sich bewegenden oder strömenden Medium⁵ ausgelöst. Im Gegensatz zur Konduktion findet bei der Konvektion eine makroskopische Bewegung des Mediums statt. Durch die Bewegung

⁵ Das Medium kann dabei ein Gas oder eine Flüssigkeit sein.

oder Strömung des Mediums erfolgt ein Stofftransport und der Wärmeinhalt wird an andere Stellen transportiert (GERTHSEN & MESCHEDE 2006, S. 232).

Komplexe Wärmeübergangskorrelationen werden häufig in dimensionsloser Form dargestellt, um die Anzahl der Einflussparameter zu verringern. Demzufolge wird der Wärmeübergangskoeffizient α_w in dimensionsloser Form durch die *Nusselt-Zahl*

$$Nu = \frac{\alpha_w \cdot L_w}{\lambda_w} \quad (2-8)$$

ersetzt, wobei L_w für die Länge des betrachteten Wärmeübergangs⁶ und λ_w für die werkstoffspezifische Wärmeleitfähigkeit des sich bewegenden oder strömenden Mediums stehen. (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 21)

Es wird zwischen einer freien und einer erzwungenen Konvektion unterschieden (BÖCKH & WETZEL 2009, S. 3). Die Nusselt-Zahl Nu wird bei beiden Konvektionsarten unterschiedlich formuliert. Bei der erzwungenen Konvektion werden Strömungen durch äußere Einflussgrößen ausgelöst. Hier wird die Konvektion durch das Verhältnis der Trägheitskraft zur Reibungskraft der Strömung anhand der *Reynolds-Zahl*

$$Re = \frac{v_s \cdot L_w}{\nu} \quad (2-9)$$

repräsentiert (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 21). v_s entspricht der Strömungs-Geschwindigkeit und ν der kinematischen Viskosität des strömenden Mediums. Bei der freien Konvektion werden Strömungen innerhalb des Fluids selbst erzeugt. Dabei wird die Strömung durch die *Grashof-Zahl*

$$Gr = \frac{L_w^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (2-10)$$

beschrieben (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 22). g steht für die Fallbeschleunigung und β für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Der Temperaturunterschied ΔT entspricht der

⁶ bspw. die Länge eines überströmten Festkörpers

Differenz zwischen der Temperatur des strömenden Mediums und der Temperatur des Festkörpers.

Wärmestrahlung ist die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Wellen. Deren räumliche Periodizitätsgröße wird als Wellenlänge λ bezeichnet (VOLLMER & MÖLLMANN 2017, S. 6). Die Intensität der thermischen Strahlung nimmt bei erhöhten Temperaturen zu. Treffen elektromagnetische Wellen auf ein Medium, werden die thermischen Strahlen in Abhängigkeit von der Oberfläche des Stoffes, je zu Teilen reflektiert, transmittiert oder absorbiert. Der Zusammenhang zwischen den drei Anteilen kann wie folgt beschrieben werden (BÖCKH & WETZEL 2009, S. 181):

$$\alpha_A + \rho_R + \tau_T = 1. \quad (2-11)$$

Dabei stellt α_A den Absorptionsanteil, ρ_R den Anteil der Reflexion und τ_T den transmittierten Anteil dar. Der Absorptionsanteil α_A kann durch das *Kirchhoff'sche Gesetz* mit dem Emissionskoeffizienten gleichgesetzt werden (BÖCKH & WETZEL 2009, S. 182):

$$\alpha_A = \varepsilon. \quad (2-12)$$

Ein Körper, welcher die thermische Strahlung mit maximaler Intensität aussendet, wird als schwarzer Körper bezeichnet. Der Emissionskoeffizient ε eines schwarzen Körpers ist gleich eins. (BÖCKH & WETZEL 2009, S. 182)

Abbildung 3 zeigt schematisch eine Substratplatte, eine Schweißnaht, ein Schmelzbad und ein Temperaturfeld, das beim Schweißprozess entlang der Bauteiloberfläche entsteht. Die Temperatur ist im Schmelzbad maximal. Mit zunehmenden Temperaturen nimmt die Abkühlungsgeschwindigkeit zu, da gemäß dem Newton'schen Abkühlungsgesetz die Temperaturänderungsrate des Bauteils proportional zum Temperaturunterschied zwischen dem Bauteil und seiner Umgebung ist. Das Temperaturfeld zeigt, dass sich die Isothermen mit niedrigeren Temperaturen über eine größere Bauteiloberfläche ausbreiten als die Isothermen mit höheren Temperaturen. (SCHULZE 2009, S. 245 ff.; VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 728)

Die Wärmeeinbringung bestimmt wesentlich den Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißprozess. Durch die Untersuchung des Temperatur-Zeit-Verlaufs können

die resultierenden Bauteileigenschaften⁷ beschrieben werden. (SCHULZE 2009, S. 244)

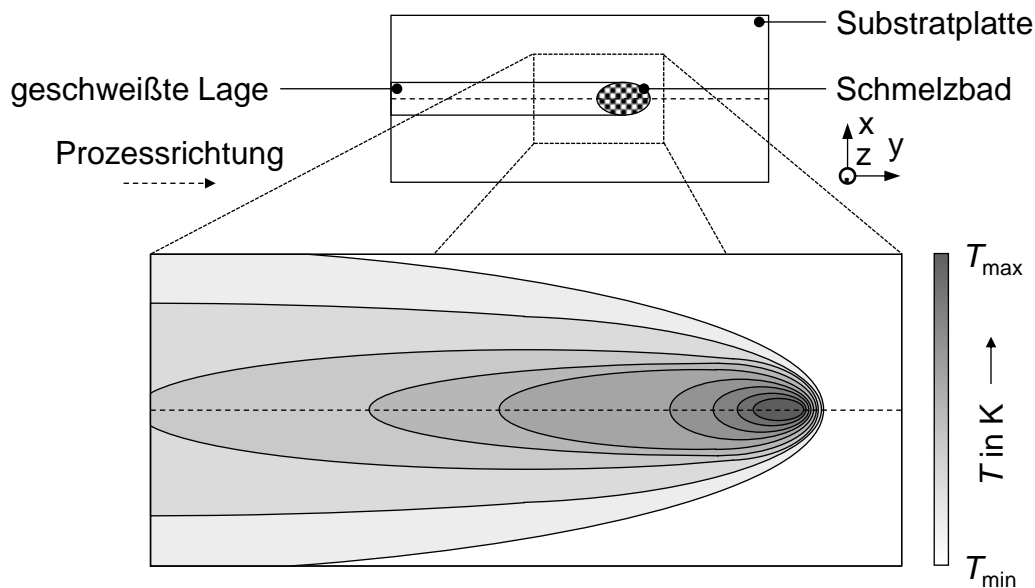


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wärmeinbringung und des auftretenden Temperaturfelds mit Isothermen von der minimalen Temperatur T_{min} bis zur maximalen Temperatur T_{max} (in Anlehnung an KARCHIN 2019, S. 56)

Der maßgebliche Mechanismus bei der Erstarrung (Primärkristallisation⁸) von Legierungen ist die konstitutionelle Unterkühlung. Die konstitutionelle Unterkühlung entsteht aufgrund einer Konzentrationsverschiebung der Legierungselemente in einem schmalen Bereich an der Phasengrenze während der Erstarrung. Das Resultat ist eine kontinuierliche Abnahme der Liquidustemperatur. Der Schmelzbereich wird als unterkühlt bezeichnet. (SCHULZE 2009, S. 24 ff.)

In Abhängigkeit vom Erstarrungs- und vom Abkühlungsverhalten können Eigenspannungen im Bauteil entstehen. Diese Eigenspannungen können zu Änderungen der Bauteilgeometrie⁹ führen. (SCHULZE 2009, S. 244)

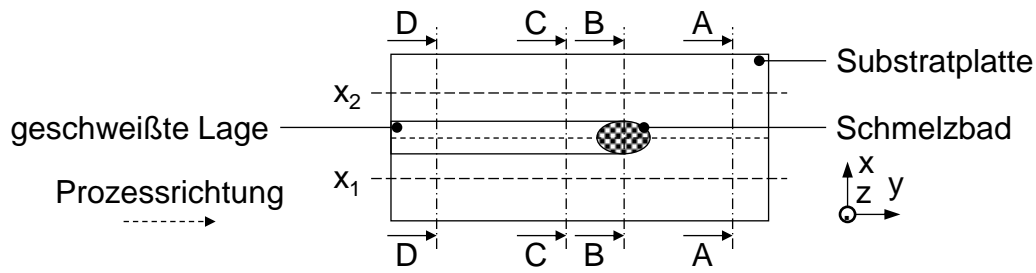
Temperaturunterschiede ΔT in einem Bauteil und resultierende Eigenspannungen σ_m sind anhand verschiedener Schnittansichten in Abbildung 4 gezeigt. Bei der Erwärmung wird das Bauteil thermisch ausgedehnt. Bei der Abkühlung des Bauteils findet eine thermische Schrumpfung bzw. eine Kontraktion im Bauteil statt.

⁷ Bauteilgeometrie- und Werkstoffeigenschaften

⁸ Phasenübergang von flüssig zu fest

⁹ bspw. Bauteilverzug

Der Schnitt A-A befindet sich an einer Substratplatten-Position, an der noch nicht geschweißt wurde. An dieser Position existiert noch kein signifikanter Temperaturunterschied, sodass das Bauteil weitestgehend spannungsfrei ist. In der Schweißschmelze (Schnitt B-B) gibt es hohe Temperaturunterschiede zwischen der Schmelzbad- und der Umgebungstemperatur. Unmittelbar in der Schweißschmelze entstehen keine signifikanten Eigenspannungen, da das Metall noch flüssig ist. Beginnt das Bauteil abzukühlen (Schnitt C-C), beginnt auch die Kontraktion des Bauteils. Durch Temperaturunterschiede zwischen der Schweißnaht- und der Umgebungstemperatur entstehen Zugspannungen in der Schweißnaht und Druckspannungen in den angrenzenden Bauteilbereichen. Bis das Bauteil so weit abgekühlt ist, dass keine signifikanten Temperaturunterschiede mehr vorhanden sind (Schnitt D-D), können weitere Zugspannungen in der Schweißnaht und weitere Druckspannungen in den angrenzenden Bauteilbereichen auftreten. (DILTNEY 2005, S. 66 f.)



Temperaturverlauf	Spannungsverlauf
<p>Schnitt A-A</p>	<p>Schnitt A-A</p>
<p>Schnitt B-B</p>	<p>Schnitt B-B</p>
<p>Schnitt C-C</p>	<p>Schnitt C-C</p>
<p>Schnitt D-D</p>	<p>Schnitt D-D</p>

Abbildung 4: Schematische Darstellung und Übersicht verschiedener Schnittrichtungen entlang eines Bauteils und der jeweiligen Temperaturunterschiede ΔT sowie der resultierenden Eigenspannungen σ_m (in Anlehnung an DILTHEY 2005, S. 67)

2.3 Werkstoffeigenschaften von Ti 6Al 4V

Der Chemiker Martin Klaproth entdeckte im Jahr 1795 am Mineral Rutil das Oxid eines bis dato unbekanntes Elements. Für die Namensgebung des Elements bediente er sich der griechischen Mythologie: „*Nach den Kindern des Uranos und der Gaia, den Titanen, die ihrem Vater verhasst waren und deshalb von ihm im Erdinnern festgehalten wurden, nannte er es Titan.*“ (PETERS & LEYENS 2002, S. 1)

Mit einer Dichte von $4,51 \text{ g/cm}^3$ gilt Titan als das schwerste Leichtmetall (PETERS & LEYENS 2002, S. 1). Titan kann in zwei Modifikationen vorkommen: der Alpha- (α -) und der Beta- (β -)Phase. Die α -Phase entsteht unterhalb der Transustemperatur von Titan ($882 \text{ }^\circ\text{C}$) und liegt als hexagonal-dichteste Packung vor. Die Schmelztemperatur von Titan beträgt $1668 \text{ }^\circ\text{C}$. Zwischen der Transus- und der Schmelztemperatur von Titan befindet sich das Kristallgitter in der β -Phase in einer kubisch-raumzentrierten Packung. Eine Einbringung von Legierungselementen kann die Phasen-Entstehung zu höheren und niedrigeren Temperaturen verschieben. (SCHULER & TWRDEK 2019, S. 462)

Ti 6Al 4V ist eine Alpha-Beta-Legierung, zu deren Legierungsbestandteilen 6 % Aluminium und 4 % Vanadium zählen (PETERS & LEYENS 2002, S. 23). Aufgrund der hohen Festigkeit, der Temperatur- und der Korrosionsbeständigkeit kommt die Titanlegierung Ti 6Al 4V häufig im Leichtbau der Luft- und Raumfahrttechnik zum Einsatz (PETERS & LEYENS 2002, S. 1). Mit einem Anteil von über 50 % ist diese Titanlegierung in der Weltproduktion die am häufigsten eingesetzte Titanlegierung (SCHULER & TWRDEK 2019, S. 462).

Die Wärmeleitfähigkeit von Ti 6Al 4V beträgt bei Raumtemperatur $6,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (BOYER ET AL. 2007, S. 515) und entspricht einem Bruchteil der Wärmeleitfähigkeit anderer Metalle (PETERS & LEYENS 2002, S. 11). Die Titanlegierung hat bei Raumtemperatur einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $8,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (BOYER ET AL. 2007, S. 516).

Titanlegierungen weisen die hohe Affinität auf, atmosphärische Gase¹⁰ bei erhöhten Temperaturen aufzunehmen. Eine Aufnahme führt zu einer Diffusion der Gase in den Werkstoff und zu Anlauffarben durch Oxidation der Oberfläche. Dies hat eine Veränderung der Werkstoffeigenschaften zur Folge, z. B. eine Versprödung

¹⁰ Diese Gase können bspw. Wasserstoff, Stickstoff oder Sauerstoff sein.

und damit einhergehend ein Zähigkeitsverlust und eine Festigkeitserhöhung. (SCHULER & TWRDEK 2019, S. 464; LEYENS ET AL. 1996)

Beim Schweißen von Titanlegierungen muss darauf geachtet werden, den Schweißbereich ausreichend vor dem Eintreten atmosphärischer Gase zu schützen (SCHULER & TWRDEK 2019, S. 464). Häufig werden hierfür inerte Schutzgase wie bspw. Argon oder Helium mit einer Reinheit von mindestens 99,996 % in Kombination mit Schutzgaskammern¹¹ eingesetzt. Der Grad der Gasaufnahme aus der Atmosphäre kann anhand von auftretenden Anlauffarben der Oberfläche des Werkstoffs bestimmt werden. Ideale Schweißraupen weisen eine metallisch silberfarbene Oberfläche auf. (DVS 2713)

Atmosphärische kontaminationsbedingte Anlauffarben der Titanoberfläche werden wie folgt unterschieden (AMERICAN WELDING SOCIETY 2014, S. 22):

- strohgelbe Farbe,
- lila Farbe,
- blaue Farbe und
- graue Farbe.

In Abhängigkeit vom Einsatzgebiet der Schweißraupe können Anlauffarben für zulässig erklärt werden (DVS 2713). Für die Anwendung von Schweißerzeugnissen in der Luftfahrttechnik dürfen keine Anlauffarben im Bereich der Schweißraupe auftreten (DIN 29595).

2.4 Infrarot-Thermografie

2.4.1 Thermische Strahlung

Thermische Strahlung entsteht durch elektromagnetische Wellen, welche von Körpern oberhalb des absoluten Temperaturnullpunkts emittiert werden. Nach dem *Planck'schen Strahlungsgesetz* gilt für schwarze Körper eine spezifische spektrale Ausstrahlung M_{λ}^S (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1083):

¹¹ auch Schweißkammern genannt; dabei handelt es sich um Formiersysteme, die mit dem inerten Schutzgas gefüllt sind.

$$M_{\lambda}^S(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}. \quad (2-13)$$

Dabei entsprechen c_1 und c_2 Strahlungskonstanten, welche sich wie folgt berechnen lassen:

$$c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_0^2 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2, \quad (2-14)$$

$$c_2 = \frac{h \cdot c_0}{k} = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}. \quad (2-15)$$

c_0 steht für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (ca. $2,998 \cdot 10^8$ m/s), h für das *Planck'sche Wirkungsquantum* mit einem Wert von ca. $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s (VOLLMER & MÖLLMANN 2017, S. 22) und k entspricht der *Boltzmann-Konstanten* (ca. $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1437).

Wird die spezifische spektrale Ausstrahlung M_{λ}^S über alle Wellenlängen integriert, ergibt sich aus dem Quotienten aus der gesamten Strahlungsleistung Φ und der Fläche A nach *Stefan Boltzmann* für die spezifische Ausstrahlung M^S (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1083; BERNHARD 2014, S. 1165):

$$M^S = \frac{d\Phi}{dA} = \int_0^{\infty} M_{\lambda}^S(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4. \quad (2-16)$$

T stellt die Oberflächen-Temperatur dar und σ entspricht der *Stefan-Boltzmann-Konstanten* mit einem Wert von ca. $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴) (BÖCKH & WETZEL 2009, S. 184).

Durch das *Wien'sche Verschiebungsgesetz* kann das Verschieben der maximalen Ausstrahlung bei steigenden Temperaturen hin zu kleineren Wellenlängen (siehe Abbildung 5) beschrieben werden (BÖCKH & WETZEL 2009, S. 183):

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}. \quad (2-17)$$

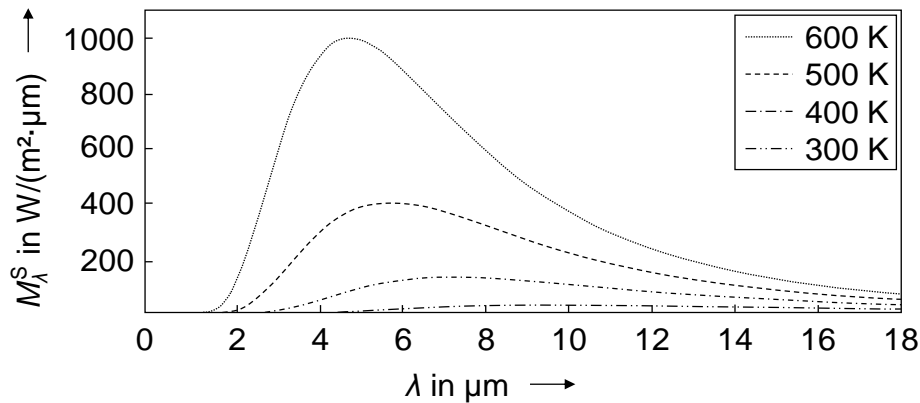


Abbildung 5: Darstellung der spezifischen spektralen Ausstrahlung M_λ^S eines schwarzen Körpers über der Wellenlänge λ (in Anlehnung an VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1084)

Die pro Flächen- (A) und Raumwinkeleinheit (Ω) ausgestrahlte oder auftreffende Strahlungsleistung Φ wird durch die Strahldichte

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos\varphi} \quad (2-18)$$

definiert (BERNHARD 2014, S. 1165 f.). φ entspricht dabei dem Polarwinkel bzw. dem Winkel zwischen der Flächennormalen des Körpers und der Strahlungsrichtung. Die spektrale Strahldichte L_λ beschreibt die gesamte Strahlungsleistung Φ , die von einer Flächeneinheit A eines Körpers im Wellenlängenbereich λ in einer Raumwinkeleinheit Ω in Bezug auf den Polarwinkel φ gerichtet ausgestrahlt wird (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1084).

Der Emissionskoeffizient ε ergibt sich aus dem Quotienten der spezifischen Ausstrahlung M^R eines realen Körpers und der spezifischen Ausstrahlung M^S eines schwarzen Körpers (SCHUSTER & KOLOBRODOW 2004, S. 61). Daraus lassen sich die Einflüsse der Temperatur, der Oberflächeneigenschaften und des Abstrahlwinkels auf den Emissionskoeffizienten erklären. Überdies weist der Emissionskoeffizient eine Werkstoffabhängigkeit auf (SCHUSTER & KOLOBRODOW 2004, S. 61). Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren ist bei der Anwendung von Literaturwerten des Werkstoff-Emissionskoeffizienten von großen Divergenzen auszugehen (BERNHARD 2014, S. 1234).

Infolge der komplexen Abhängigkeiten der Ausstrahlung von realen Körpern wird in der Praxis auf die Ausstrahlung des schwarzen Körpers Bezug genommen. Ist

ein Emissionskoeffizient beziffert, kann die spezifische Ausstrahlung M^R des realen Körpers wie folgt berechnet werden (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1086):

$$M^R(T) = \varepsilon(T) \cdot M^S(T). \quad (2-19)$$

In den meisten Anwendungen wird ein grauer Körper¹² betrachtet, dessen Emissionskoeffizient als wellenlängenunabhängig und damit als konstant angesehen wird (VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1086). Eine schematische Darstellung der spezifischen spektralen Ausstrahlung eines schwarzen, eines grauen und eines realen Körpers ist in Abbildung 6 gezeigt.

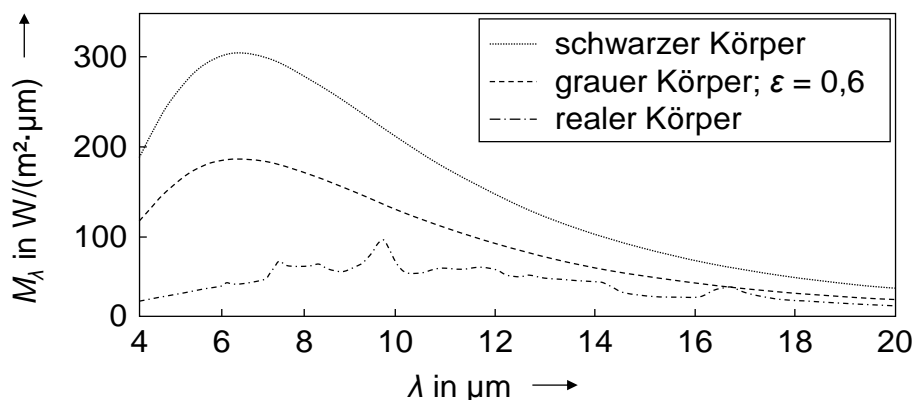


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Vergleichs zwischen der spezifischen spektralen Ausstrahlung M_λ^S über der Wellenlänge λ eines schwarzen, eines grauen und eines realen Körpers bei gleichen Temperaturen ($T = 473 \text{ K}$) (in Anlehnung an VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013, S. 1086)

Die gesamte emittierte Strahlungsleistung Φ besteht in der Realität aus diversen Strahlungstransport-Anteilen. Die einzelnen Anteile der Strahlungstransporte lassen sich in Strahlungsleistungen des absorbierten Φ_α , des reflektierten Φ_ρ und des transmittierten Φ_τ Anteils differenzieren. Das Kirchhoff'sche Gesetz führt zur Gleichsetzung des absorbierten Anteils mit dem emittierten Anteil Φ_ε . Die Summe der drei Anteile ergibt aufgrund des Energieerhaltungssatzes die gesamte emittierte Strahlungsleistung Φ (VOLLMER & MÖLLMANN 2017, S. 32):

$$\Phi = \Phi_\alpha + \Phi_\rho + \Phi_\tau. \quad (2-20)$$

¹² entspricht einem idealisierten Körper

2.4.2 Messprinzip

Mithilfe der Infrarot-Thermografie können Oberflächen-Temperaturen bzw. kann die thermische Strahlung von Körpern erfasst werden. Die Infrarot-Thermografie wird für die bildliche Darstellung und die Messung örtlich verteilter Temperaturen eingesetzt. Mit diesem Messverfahren werden Strahlungen aus dem nicht sichtbaren Infrarot-Längenwellenbereich von 780 nm bis 1 mm in den sichtbaren Längenwellenbereich von 380 nm bis 780 nm übertragen. Dadurch ist es möglich, thermische Unterschiede von Strahlungsleistungen mit dem menschlichen Auge zu sehen. (BERNHARD 2014, S. 1396)

Bei der Temperaturmessung mithilfe der Infrarot-Thermografie nehmen in der Radiometrie verschiedene Größen Einfluss auf das detektierbare Signal, welches am Messgerät angezeigt wird (VOLLMER & MÖLLMANN 2017, S. 142). Die vorherrschenden Einflussgrößen veranschaulicht Abbildung 7 anhand eines schematischen Versuchsaufbaus.

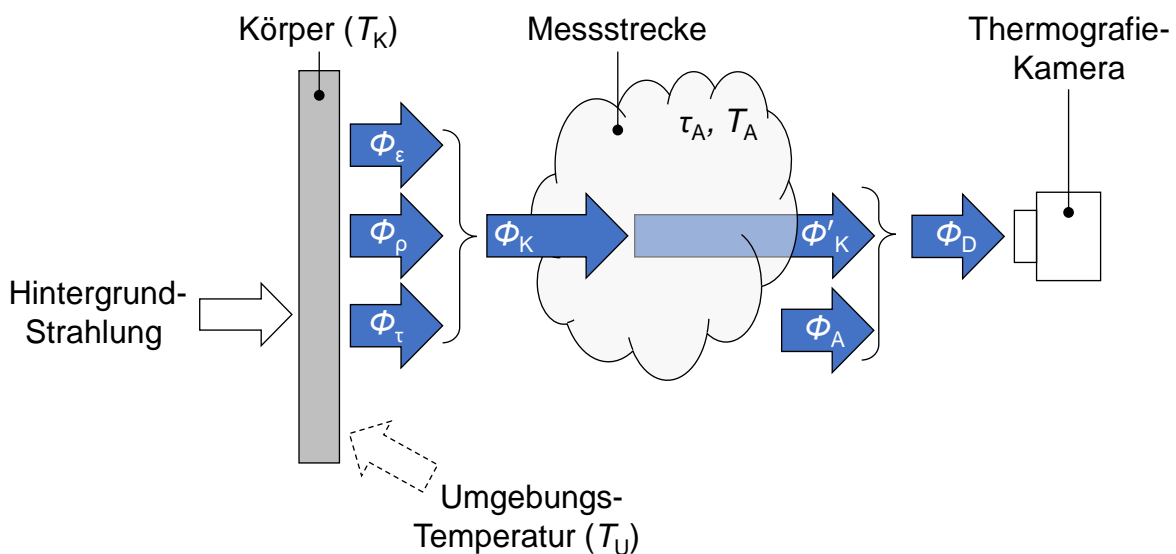


Abbildung 7: Schematischer Versuchsaufbau einer Infrarot-Thermografie-basierten Körperoberflächen-Temperaturmessung unter Berücksichtigung der radiometrischen Einflussgrößen (in Anlehnung an INFRA-TEC GMBH 2004, S. 11)

Ist die Oberfläche des zu messenden Körpers nicht transmittierend, kann Gleichung 2-11 unter Berücksichtigung des Kirchhoff'schen Gesetzes wie folgt vereinfacht werden (INFRA-TEC GMBH 2004, S. 12):

$$\varepsilon = 1 - \rho_R. \quad (2-21)$$

Daraus ergibt sich auf der Basis von Gleichung 2-20 für die vom Körper ausgehende Strahlungsleistung Φ_K (INFRA TEC GMBH 2004, S. 12):

$$\begin{aligned} \Phi_K &= \varepsilon \cdot \Phi(T_K) + \tau \cdot \Phi(T_A) + \rho \cdot \Phi(T_A), \\ \text{mit } \tau = 0 &\Rightarrow \Phi_K = \varepsilon \cdot \Phi(T_K) + (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(T_U). \end{aligned} \quad (2-22)$$

Die detektierbare Strahlungsleistung Φ_D , welche an der Infrarot-Thermografie-Kamera ankommt, lässt sich durch die von der Messstrecke abgeschwächte Körper-Strahlungsleistung Φ'_K und durch die von der Messstrecke selbst ausgestrahlte Leistung Φ_A definieren (INFRA TEC GMBH 2004, S. 12):

$$\begin{aligned} \Phi_D &= \Phi'_K + \Phi_A, \\ &= \tau_A \cdot \Phi_K + \Phi_A, \\ &= \tau_A \cdot \Phi_K + (1 - \tau_A) \cdot \Phi(T_A), \\ &= \tau_A \cdot \varepsilon \cdot \Phi(T_K) + \tau_A \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(T_U) + (1 - \tau_A) \cdot \Phi(T_A). \end{aligned} \quad (2-23)$$

Gleichung 2-23 kann nach der Körperoberflächen-Temperatur umgestellt werden, wodurch sich T_K ergibt (INFRA TEC GMBH 2004, S. 13):

$$T_K = \Phi^{-1} \left(\frac{\frac{\Phi_D - (1 - \tau_A) \cdot \Phi(T_A)}{\tau_A} - (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(T_U)}{\varepsilon} \right). \quad (2-24)$$

Die Infrarot-Thermografie kann in die passive und in die aktive Thermografie unterteilt werden. Bei der passiven Thermografie werden Temperaturfelder an der Bauteiloberfläche statisch aufgenommen, wodurch der Fokus auf der Erkennung von lokalen Temperaturverteilungen liegt. Die aktive Thermografie wird für die Erkennung von strukturellen Werkstoff-Defekten eingesetzt. Dabei wird zusätzlich Energie in das Bauteil eingebracht und die thermischen Reaktionen des Bauteils werden untersucht (vgl. Abbildung 7). (BAUCH & ROSENKRANZ 2017, S. 22)

Der Einsatz der Infrarot-Thermografie ermöglicht die folgenden Messungen (BERNHARD 2014, S. 1396):

- kontaktloses und damit rückstandsfreies Messen an Oberflächen,
- Messen an Körpern mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit,
- Messen an ruhenden und sich bewegenden Körpern und

- Messen über variable Distanzen zwischen der Kamera und dem Körper.

Aufgrund der genannten Messmöglichkeiten wird die Infrarot-Thermografie unter anderem in den folgenden etablierten Einsatzgebieten genutzt (BERNHARD 2014, S. 1397):

- Erkennen und Orten von temperaturvariablen Körperbereichen und
- Erkennen und Orten von Defekten an Maschinen und Bauteilen.

Mit dem Einsatz der Infrarot-Thermografie können basierend auf Farbbildern Videosequenzen von Körpern in Echtzeit aufgenommen werden, welche für die Überwachung von Prozessen und Bauteilen genutzt werden können (BAGAVATHIAPPAN ET AL. 2013).

Die Einflüsse auf die thermografischen Messsignale lassen sich durch die meisten Software-Lösungen der Kamerahersteller kompensieren. Unter anderem können folgende Größen Einfluss nehmen (VOLLMER & MÖLLMANN 2017, S. 4):

- Temperatur, Größe und Emissionskoeffizient der zu messenden Oberfläche (vgl. Wärmestrahlung in Abschnitt 2.2.2) und
- Abstand und Winkel der Infrarot-Thermografie-Kamera zur Oberfläche.

2.5 Potentiometrische Sauerstoff-Festelektrolyt-Sensoren

2.5.1 Potentiometrie

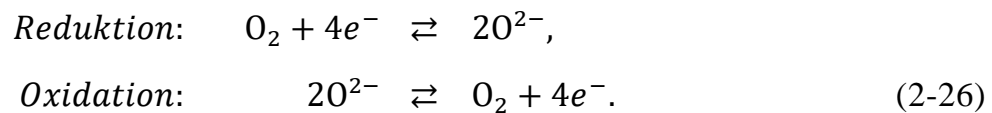
Die Potentiometrie zählt zu den elektroanalytischen Verfahren, bei denen Potenzialänderungen genutzt werden, um elektrische Spannungsdifferenzen U an einer Mess- und Referenzelektrode zu messen (WIEGLEB 2016, S. 232). Die Grundlage für eine Erkennung der Potenzialänderungen ist ein vorherrschender Redoxvorgang an der Messelektrode (LATSCHA ET AL. 2004, S. 317).

Die *Nernst-Gleichung* beschreibt das Redoxpotenzial U eines Redoxpaares. Das Redoxpotenzial wird in Abhängigkeit von den Konzentrationen der oxidierten und der reduzierten Form des Redoxpaares wie folgt definiert (ADAM ET AL. 2009, S. 217):

$$U = U_0 + \frac{R \cdot T_a}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{c_{\text{ox}}}{c_{\text{red}}}. \quad (2-25)$$

Hierbei entsprechen U_0 dem Normalpotenzial des Redoxpaares, R der Gaskonstanten mit einem Wert von $8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, T_a der absoluten Temperatur, F der *Faraday-Konstanten* mit einem Wert von $96485 \text{ C}/\text{mol}$ und z der Anzahl der ausgetauschten Elektronen während der Reaktion. Mit dem zu logarithmierenden Term aus der oxidierten (c_{ox}) und der reduzierten (c_{red}) Form bzw. aus der Aktivität des Oxidationsmittels und des Reduktionsmittels erhält man die Konzentrationsabhängigkeit. (RITGEN 2020, S. 88)

Im Kontext der Sauerstoffmessung ergeben sich zwei O_2 -Partialdrücke. Daraus resultieren eine Reduktion und eine Oxidation und damit ein Elektronentransfer zwischen der Kathode und der Anode (AHLERS 1997, S. 64):



Daraus ergibt sich für die Anzahl der ausgetauschten Elektronen $z = 4$. Folglich kann Gleichung 2-25 vereinfacht werden (WIEGLEB 2016, S. 232):

$$U = U_0 + \frac{R \cdot T_a}{4 \cdot F} \cdot \ln \frac{p_{\text{O}_2, \text{Atm}}}{p_{\text{O}_2, \text{Ref}}}. \quad (2-27)$$

Das Normalpotenzial U_0 kann in den meisten Anwendungsfällen als vernachlässigbar klein angesehen werden (WIEGLEB 2016, S. 233).

Für die Umrechnung des Partialdrucks in die Gaskonzentration gilt das *Dalton-Gesetz*, welches den Gesamtdruck p_{ges} aus der Summe aller Partialdrücke p_i für a Komponenten definiert (WIEGLEB 2016, S. 231):

$$p_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^a p_i. \quad (2-28)$$

Daraus folgt, dass der Quotient aus dem Partialdruck p_i und dem Gesamtdruck p_{ges} mit dem Quotienten aus der Teil-Stoffmenge n_i und der Gesamt-Stoffmenge n_{ges} gleichgesetzt werden kann:

$$\frac{n_i}{n_{\text{ges}}} = \frac{p_i}{p_{\text{ges}}}. \quad (2-29)$$

Bei idealen Gasen ist das Verhältnis der beiden Stoffmengen gleich dem Verhältnis der beiden Konzentrationen, sodass Folgendes gilt (WIEGLEB 2016, S. 231):

$$\frac{c_i}{c_{\text{ges}}} = \frac{p_i}{p_{\text{ges}}},$$

$$\Rightarrow c_i = \frac{p_i}{p_{\text{ges}}} \cdot c_{\text{ges}}. \quad (2-30)$$

Bei einem Gesamtdruck von $p_{\text{ges}} = 1013 \text{ hPa}$ lässt sich unter Verwendung der Nernst-Gleichung (vgl. Gleichung 2-27) bei verschiedenen Temperaturen die elektrische Spannungsdifferenz U in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration c_{O_2} beschreiben (siehe Abbildung 8).

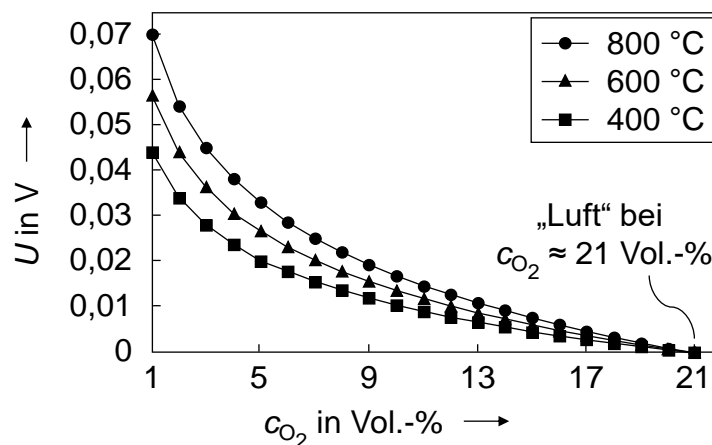


Abbildung 8: Nach der Nernst-Gleichung bestimmte elektrische Spannung über der Sauerstoffkonzentration für unterschiedliche Temperaturen (in Anlehnung an WIEGLEB 2016, S. 233)

2.5.2 Messprinzip

Im Zusammenhang mit der Sauerstoffmessung mithilfe von Festelektrolyt-Sensoren wird bspw. Zirkoniumdioxid als Elektrolyt eingesetzt, welches auf beiden Seiten mit einer gasdurchlässigen Platinschicht als Elektroden¹³ bestückt wird. Abbildung 9 zeigt einen schematischen Aufbau eines potentiometrischen Sauerstoff-Festelektrolyt-Sensors. Die Temperatur der Sonde wird durch eine Heizung mit einem Thermoelement-Signal auf ca. 650 °C erhöht und geregelt. Bei dieser Sonden-Temperatur leiten Festkörper-Elektrolyte Sauerstoffionen (HAMMER 2014, S. 377). Dadurch kann eine Spannungsdifferenz U bestimmt werden (vgl.

¹³ bestehend aus einer Kathode und einer Anode

Gleichung 2-27), wenn verschiedene O_2 -Partialdrücke auf den beiden Seiten (Kathode und Anode) existieren. Dabei werden beide Elektroden (Kathode und Anode) an einer Position kontaktiert und die Signale der Spannungsdifferenz verarbeitet. (WIEGLEB 2016, S. 232 ff.)

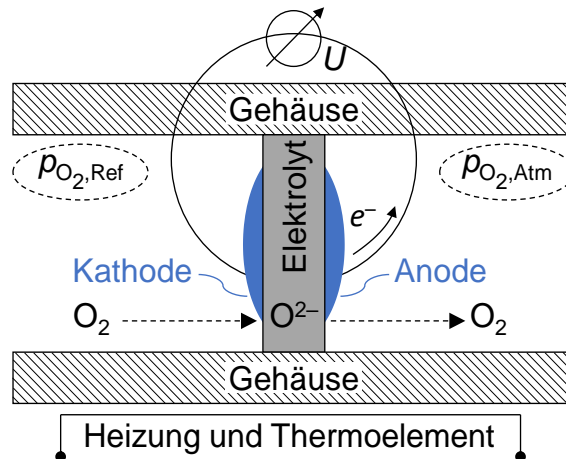


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Messprinzips eines potentiometrischen Sauerstoff-Festelektrolyt-Sensors (in Anlehnung an KASTELIK 2020, S. 33)

Für den Einsatz im industriellen Umfeld wird die Sauerstoffkonzentration c_{O_2} halblogarithmisch aufgetragen. Dadurch ergibt sich aus dem Kurvenverlauf in Abbildung 8 ein linearer Kurvenverlauf (siehe Abbildung 10). Die Abszisse wird von den Kurven bei der Sauerstoffkonzentration von 21 % geschnitten. Die Steigung wird von der Sonden-Temperatur T_S bestimmt, welche damit die Empfindlichkeit des Messverfahrens definiert. Höhere Sonden-Temperaturen führen zu einer höheren Empfindlichkeit als geringere Sonden-Temperaturen. (WIEGLEB 2016, S. 237)

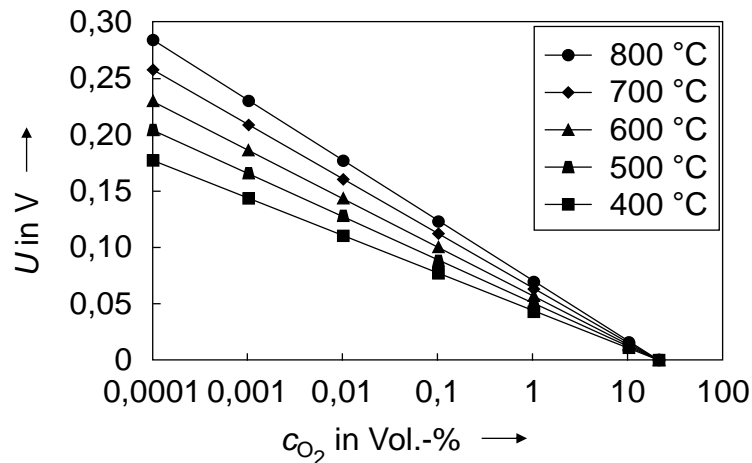


Abbildung 10: Nach der Nernst-Gleichung bestimmte elektrische Spannungsdifferenz über der Sauerstoffkonzentration für unterschiedliche Temperaturen in halblogarithmischer Form (in Anlehnung an WIEGLEB 2016, S. 237)

2.6 Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung

2.6.1 Einordnung im Kontext dieser Dissertation

Der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“, wird in der DIN EN ISO 9000 als Qualität definiert. Im Kontext der industriellen Fertigung wird Qualität als die Einhaltung von definierten Produktspezifikationen beschrieben. Ein zuverlässiges und prognosefähiges Ergebnis kann effektiver und effizienter erreicht werden, wenn Prozesse als ein kohärentes System umgesetzt werden (DIN EN ISO 9000). Die *Qualitätssicherung* ist ein Teilbereich des Qualitätsmanagements und ein Garant für den Nachweis einer reproduzierbar erzeugten Produktqualität. (JUNG ET AL. 2013, S. 7 ff.)

Die Qualitätssicherung wird unter Verwendung statistischer Methoden durchgeführt, bei denen Ansätze der statistischen Qualitätslenkung (engl. *statistical process control*, kurz SPC) auf der Basis von Qualitätsregelkarten gewählt werden (WÄLDER & WÄLDER 2013, S. 3). Die SPC kann mit einer geeigneten Prozessüberwachung bzw. Prüfung in den Fertigungsablauf integriert werden (WÄLDER & WÄLDER 2013, S. 151). Ein schematischer Ablauf einer SPC ist in Abbildung 11 dargestellt.

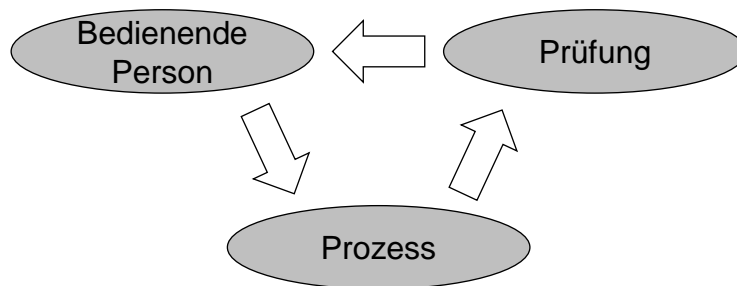


Abbildung 11: Schematischer Ablauf einer SPC (in Anlehnung an WÄLDER & WÄLDER 2013, S. 151)

Die SPC kann in Kombination mit einer vorliegenden Prozessfähigkeit bzw. einer Messsystemfähigkeit umgesetzt werden (WÄLDER & WÄLDER 2013, S. 152). Die Prozessfähigkeit wird durch das Erfüllen von Produktanforderungen erreicht. Unter anderem kann der minimale Prozessfähigkeitsindex C_{pk} als Maß für die Prozessfähigkeit herangezogen werden. C_{pk} wird durch den Quotienten aus der dreifachen Prozessstreuung und der Breite der Toleranz unter Berücksichtigung der mittleren Prozesslage (Mittelwert) definiert (WÄLDER & WÄLDER 2013, S. 102 f.):

$$C_{pk} = \min\left(\frac{OSG - \bar{x}}{3 \cdot \sigma_S}, \frac{\bar{x} - USG}{3 \cdot \sigma_S}\right). \quad (2-31)$$

Dabei sind OSG und USG die obere und untere Spezifikationsgrenze, \bar{x} entspricht der Lage des Prozess-Mittelwerts und σ_S steht für die Streuung des Prozessergebnisses (DIETRICH & SCHULZE 2014, S. 355 ff.). Abbildung 12 zeigt eine schematische Darstellung der relativen Häufigkeit eines Merkmalswerts für die Bestimmung des Wertes von C_{pk} .

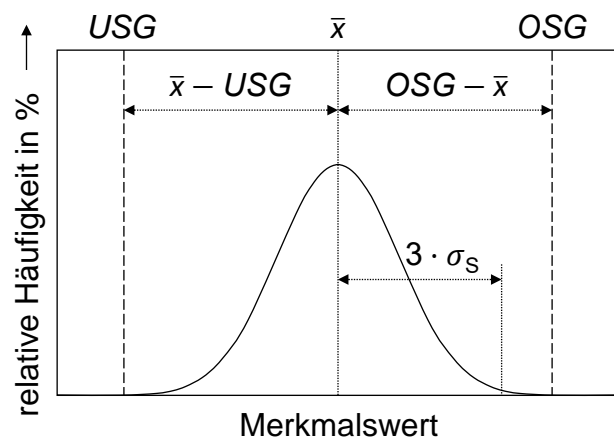


Abbildung 12: Schematische Darstellung der für die Bestimmung des minimalen Prozessfähigkeitsindex benötigten Größen (in Anlehnung an DIETRICH & SCHULZE 2014, S. 357 und WÄLDER & WÄLDER 2013, S. 103 ff.)

2.6.2 Industrielle Anwendungen in der Luftfahrttechnik

Die Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Luftfahrttechnik sind in der DIN EN 9100 definiert. Dabei müssen Qualitätsziele u. a. Anforderungen berücksichtigen, messbar sein, überwacht und bei Bedarf aktualisiert werden, um erreicht werden zu können. Für eine betriebliche Planung und Steuerung müssen Prozesse für die Anforderungserfüllung ausgelegt werden. Dabei werden u. a. Kriterien für die Prozesse und Produkte definiert. Die Kriterien beinhalten bspw. eine Selektion von Qualitätsmerkmalen, eine SPC, geeignete Versuchsplanungen und Prozessfähigkeitsmessungen. Eingesetzte Ressourcen müssen im Rahmen der Qualitätssicherung für die Messung und Überwachung geeignet sein, um zuverlässig die Erfüllung der Anforderungen nachzuweisen. Für den Nachweis wird eine Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit der eingesetzten Prozesse gefordert, wodurch Divergenzen zwischen den Ist- und den Soll-Zuständen während der Fertigung durchgehend aufgezeigt werden.

Im Allgemeinen hilft beim Schweißen die Anwendung einer Qualitätssicherung, um die geforderten Schweißraupeneigenschaften bzw. -güten zu erreichen. In Abhängigkeit vom Einsatzgebiet werden verschiedene Eigenschaften gefordert. Solche Anforderungen an Schweißverbindungen können bspw. das Erscheinungsbild der Schweißraupen-Oberfläche, mechanische Eigenschaften oder eine Korrosionsbeständigkeit sein. Geometrische Schweißraupen-Unregelmäßigkeiten, die bei Abweichungen von den Anforderungen entstehen können, werden bspw. in der DIN EN ISO 6520-1 aufgeführt. (MATTHES & SCHNEIDER 2016, S. 56)

Die Anforderungen an das Schweißen von metallischen Bauteilen in der Luftfahrttechnik können der DIN 29595 entnommen werden. Bauteilverbindungen werden in Abhängigkeit von ihren Einsatzgebieten in drei Sicherheitsklassen unterteilt. In der Sicherheitsklasse I werden Verbindungen verortet, welche beim Versagen zum Verlust des Luftfahrzeugs führen oder eine Personengefährdung hervorrufen. Verbindungen der Sicherheitsklasse II können beim Versagen zu Funktionsbeeinträchtigungen führen. Der Betrieb des Luftfahrzeugs wird davon jedoch nicht gefährdet und kann aufrechterhalten werden. Verbindungen werden der Sicherheitsklasse III zugeordnet, sobald diese beim Versagen keinen Einfluss auf die Sicherheit des Luftfahrzeugs aufweisen. In der DIN EN ISO 6520-1 werden u. a. Sicht- und Maßprüfungen von Anlauffarben, ungleichmäßige Nahtbreiten sowie zu große Nahtüberhöhungen aufgeführt. Im Rahmen der industriellen Fertigung wird die Sicht- und Maßprüfung bei allen drei Bauteil-Sicherheitsklassen bzw. bei allen Schweißraupen durchgeführt.

Die Anforderungen an den WAAM-Prozess und dessen Qualifizierung für die Luftfahrttechnik werden in der DIN 17024-2 beschrieben. Eine Prozessqualifizierung wird durch eine Anweisung zur Additiven Fertigung (engl. *Additive Manufacturing Procedure Specification*, kurz AMPS) nachgewiesen. Die AMPS beinhaltet sowohl die zu berücksichtigenden WAAM-Prozessparameter als auch die Einflussgrößen, welche die Bauteilqualität beeinflussen. Eine Prozessüberwachung muss für den Nachweis im Rahmen der AMPS umgesetzt und Prozessdaten müssen dokumentiert werden. Die mindestens zu überwachenden Prozessparameter sind der Schweißstrom, die Schweißspannung und die Drahtvorschub-Geschwindigkeit.

3 Stand der Wissenschaft und Forschung

3.1 Überblick

In dieser Dissertation werden neben dem Stand der Wissenschaft und Forschung im WAAM-Bereich auch Erkenntnisse von verwandten AM-Verfahren aufgezeigt. Aufgrund einiger Übertragungsmöglichkeiten von Prozess- und Bauteil-Charakteristiken werden das Laser- und Elektronenstrahl-basierte DED sowie Pulverbett-basierte additive Fertigungstechnologien in die Betrachtung des Stands der Wissenschaft und Forschung einbezogen. Kapitel 3 beinhaltet die für die vorliegende Arbeit relevanten Literaturquellen, auf welche in Abschnitt 3.2 hinsichtlich der Prozessuntersuchungen beim WAAM mit Blick auf Prozessführungsstrategien und geometrische Bauteileigenschaften Bezug genommen wird. Aufgrund potenzieller Übertragungsmöglichkeiten werden in Abschnitt 3.3 weitere Prozessuntersuchungen bei verwandten additiven Fertigungsverfahren aufgeführt. In Abschnitt 3.4 wird das übergeordnete Thema der Qualitätssicherung beleuchtet, wobei der Fokus auf der thermischen Prozessüberwachung und der Überwachung des Oxidationsverhaltens von Bauteilen aus Ti 6Al 4V liegt. Aus Gründen weiterer Transfermöglichkeiten werden Schnittstellen zu verwandten additiven Fertigungsverfahren im Bereich der Qualitätssicherung in Abschnitt 3.5 beschrieben. Das Kapitel schließt mit einem Fazit zu dem für die Dissertation betrachteten relevanten Stand der Wissenschaft und Forschung sowie mit einem abgeleiteten Handlungsbedarf in Abschnitt 3.6.

3.2 Prozessuntersuchungen beim WAAM

3.2.1 Prozessführung und -stabilität

Bisher kann aus der Literatur keine geeignete Definition der Prozessstabilität für den Kontext der vorliegenden Dissertation entnommen werden. Aus diesem Grund wird die *Prozessstabilität* definiert als die Prozessfähigkeit, welche auf reproduzierbare Prozess-Charakteristiken (bspw. homogene Lichtbogen-Eigenschaften und schweißbedingte Spritzerbildungen) auf der Basis der gewählten Prozessführungsstrategien schließen lässt. Die Stabilität des WAAM-Prozesses wird vor allem durch die Wahl der Aufbaustrategie und der Prozessparameter bestimmt. Der Pfad, auf welchem der Schweißkopf im Bauraum bewegt wird und Schweißraupen erzeugt werden, wird als *Aufbaustrategie* bezeichnet. Als *Prozessparameter* werden alle an der WAAM-Fertigungsanlage einstellbaren Größen beschrieben.

In Abhängigkeit von der geometrischen Bauteilform und -größe können verschiedene Aufbaustrategien für die Bauteilherstellung gewählt werden. Die Aufbaustrategie beeinflusst unmittelbar die Bauteilgeometrie und den thermischen Haushalt im Bauteil (PAUL ET AL. 2021; TREUTLER & WESLING 2021). Wandgeometrien können bspw. mit einer uni- oder bidirektionalen Aufbaustrategie gefertigt werden (siehe Abbildungen 13 a) und b)). Eine bidirektionale Aufbaustrategie entspricht einer alternierenden Aufbaustrategie in Aufbau- bzw. z-Richtung. Für einfache bzw. schmale Wandgeometrien können geradlinige Schweißraupen mit einer geradlinigen Schweißbahnführung direkt aufeinander abgelegt werden (siehe Abbildung 13 c)) (DONOGHUE ET AL. 2016). Die Breite der Wand kann abhängig vom gewählten Drahtdurchmesser durch die Variation der Prozessparameter verändert werden. Für komplexe bzw. breitere Wände können verschiedene Aufbaustrategien bzw. Schweißbahnführungen angewendet werden. Eine mögliche Schweißbahnführung besteht aus geradlinigen Schweißraupen, welche parallel aufgetragen werden (siehe Abbildung 13 d)) (SURYAKUMAR ET AL. 2011). Häufig werden für die Herstellung breiter Wände beim WAAM-Prozess gependelte Schweißraupen verwendet. Dabei kann mit der gewählten Pendelstrategie eine nahezu beliebig breite Wand generiert werden. Abbildung 13 d) zeigt eine schematische Darstellung einer möglichen Pendelstrategie.

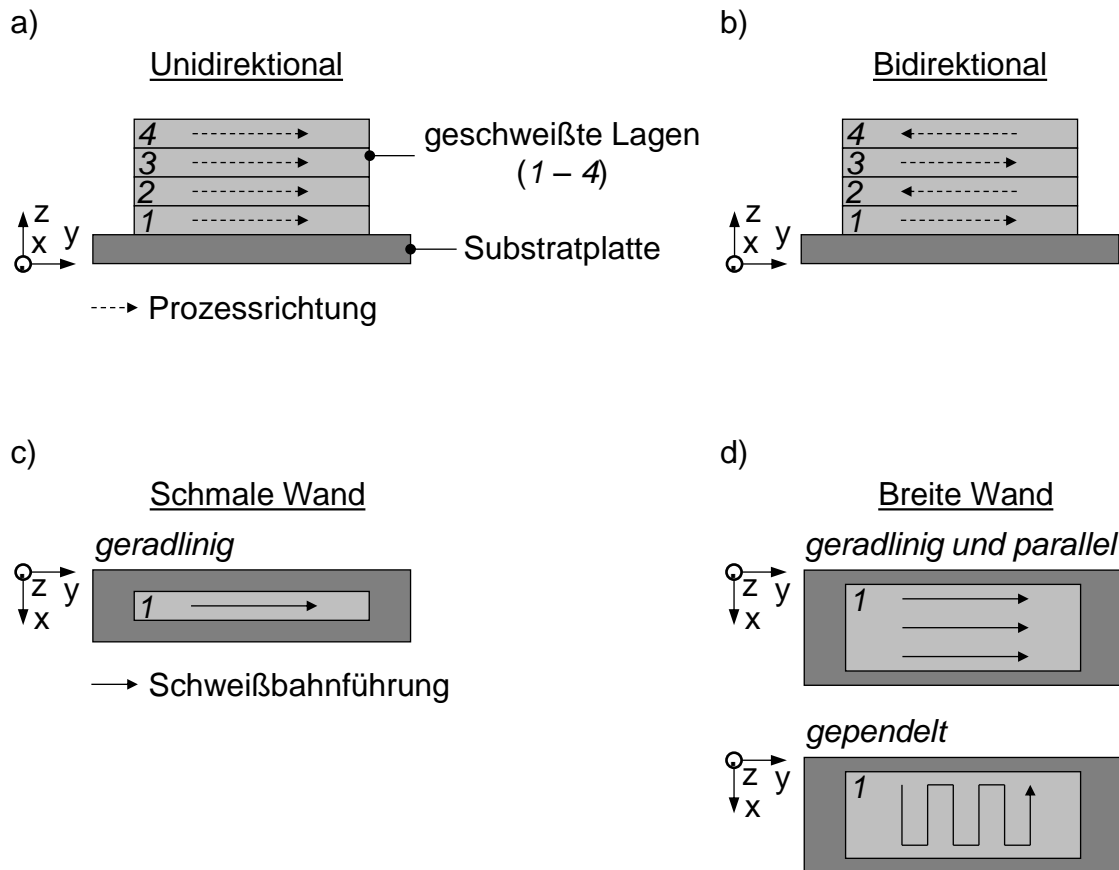


Abbildung 13: Darstellung und Übersicht verschiedener Aufbaustrategien für Wandgeometrien mit a) unidirektionaler und b) bidirektionaler Aufbaustrategie zur Herstellung von c) schmalen und d) breiten Wänden (in Anlehnung an SURYAKUMAR ET AL. 2011, DONOGHUE ET AL. 2016 und BRAND ET AL. 2022)

Schmale Wände wurden beim WIG-basierten WAAM von BRANDL ET AL. (2010) aus Ti 6Al 4V mit einer geradlinigen unidirektionalen Aufbaustrategie hergestellt. Dabei konnten Bauteile mit Wand-Breiten von 9 mm erzielt werden. XIONG ET AL. (2018) wendeten eine bidirektionale Aufbaustrategie für schmale geradlinige Wände aus 1.0038¹⁴ an. Beim WIG-basierten WAAM wurde bei der Verarbeitung von Hastelloy X, einer Nickelbasis-Legierung, kein Unterschied zwischen einer uni- und einer bidirektionalen Aufbaustrategie hinsichtlich des geometrischen Bauteil-Ergebnisses beobachtet (DINOVITZER ET AL. 2019). Eine breite Wandgeometrie fertigten CONG ET AL. (2017) mittels des CMT-basierten WAAMs aus geradlinig und parallel abgelegten Schweißraupen aus Aluminium. Bei zehn

¹⁴ Werkstoffnummer für die Bezeichnung eines Stahls gemäß DIN EN 10027-2, wenn nicht anders gekennzeichnet

geradlinig und parallel abgelegten Schweißraupen erreichten die Autoren bis zu 42 mm breite Wände. BELHADJ ET AL. (2022) wendeten die gleiche Aufbaustrategie, geradlinig und parallel abgelegte Schweißraupen, für breite Wände aus 1.4430 an. Die Überlappung der zwei nebeneinander abgelegten Schweißraupen betrug 4 mm. NGUYEN ET AL. (2020) definierten als optimale Überlappung der Schweißraupen für breite Aufbaustrategien für Bauteile aus 1.5130, wenn die Überlappung der Hälfte einer Schweißraupen-Breite entspricht. Breite Wände aus 1.4430 wurden durch eine gependelte Aufbaustrategie von BRAND ET AL. (2022) hergestellt. Die Autoren verwendeten eine bidirektionale Aufbaustrategie, die sie damit begründeten, dass die Anfangs- und Endbereiche einer Schweißraupe nach jeder Lage aufeinanderliegen und damit eine konstante und gleichmäßige Wandgeometrie entsteht.

Der Abstand zwischen dem Substrat¹⁵ und der Schutzgasdüse beeinflusst maßgeblich die Lichtbogen-Eigenschaften und sollte während des WAAM-Prozesses konstant gehalten werden. Abstandsabweichungen können zu einem instabilen Lichtbogen führen. Deswegen hielten BELHADJ ET AL. (2022) während der Experimente den Abstand konstant auf 10 mm. Einen weiteren Einfluss auf die Lichtbogen-Stabilität hat der Quotient aus den Prozessparametern Prozess- und Drahtvorschub-Geschwindigkeit. Dieser Quotient soll möglichst konstant gehalten werden, damit der Lichtbogen während des WAAM-Prozesses stabil gezündet wird. Der Quotient wurde während der Versuche von BELHADJ ET AL. (2022) auf 1,42 konstant gehalten. Während des thermisch-basierten Fertigungsprozesses entstehen Temperaturfelder im Bauteil (vgl. Abschnitt 2.2), welche als Bauteil-Temperaturen bezeichnet werden. Während des Schmelzvorgangs im WIG-basierten WAAM-Prozess mit Ti 6Al 4V als Ausgangswerkstoff konnten von WU ET AL. (2017) die Einflüsse verschiedener Temperaturniveaus auf die Lichtbogen-Stabilität und auf den Werkstofftransfer beobachtet werden. Daran anschließend analysierten BELHADJ ET AL. (2022) den Einfluss erhöhter Bauteil-Temperaturen auf die Vergrößerung des Schmelzbades. Nach dem Überschreiten eines bestimmten Temperaturniveaus bildete sich ein zu großes Schmelzbad, was zu einem Abfließen des Werkstoffs an den Bauteilrändern führte. In diesem Fall konnte keine Prozessstabilität mehr sichergestellt werden.

Schmale Wände aus 1.0038 und aus 1.5130 mit einer jeweils geradlinigen bidirektionalen Aufbaustrategie wurden von XIONG ET AL. (2018) und ROSLI ET AL. (2020) gefertigt. XIONG ET AL. (2018) stellten fest, dass die Prozessstabilität von

¹⁵ Als Substrat werden in diesem Kontext bereits gefertigte Lagen oder die Substratplatte selbst bezeichnet.

einer erhöhten Prozess-Geschwindigkeit negativ beeinflusst wird, da Lichtbogen-Instabilitäten während der Experimente auftraten. Ferner konnte gezeigt werden, dass die Entstehung von schweißbedingten Spritzern bei einer Erhöhung der Prozess-Geschwindigkeit deutlich mehr verstärkt auftritt als bei einer erhöhten Drahtvorschub-Geschwindigkeit. Dennoch kann eine erhöhte Drahtvorschub-Geschwindigkeit bspw. bei der Verwendung von Inconel 825, einer Nickelbasis-Legierung, ebenfalls zu schweißbedingten Spritzerbildungen führen (BHARAT KUMAR & ANANDAKRISHNAN 2020). Die Autoren begründeten die Spritzerbildung durch den mit der Drahtvorschub-Geschwindigkeit zunehmenden Schweißstrom. ROSLI ET AL. (2020) erklärten die erhöhten Prozessinstabilitäten in Kombination mit erhöhten Drahtvorschub-Geschwindigkeiten mit einer erhöhten Streckenenergie (vgl. Gleichung 2-1) und einem erhöhten Werkstoffauftrag. Letzteres führte zu einer Veränderung des Abstands zwischen dem Bauteil und der Schutzgasdüse. Durch eine Veränderung anderer Prozessparameter konnten die Streckenenergie bei erhöhten Drahtvorschub-Geschwindigkeiten konstant gehalten und die Prozessstabilität wieder verbessert werden.

3.2.2 Bauteileigenschaften

Die Einflüsse auf die Bauteileigenschaften werden im Rahmen dieser Dissertation auf die geometrischen Bauteileigenschaften bezogen. Die Bauteilgeometrie wird primär vom CAD-Modell bestimmt und die damit verbundene Bauteil-Formtreue wird unter Einhaltung der Prozessstabilität überwiegend von der Wahl der Prozessparameter, der Zwischenlagen-Wartezeit t_W und der Zwischenlagen-Temperatur T_{ZL} beeinflusst. Die Wartezeit zwischen dem Schweißende einer abgelegten Lage und dem Schweißbeginn einer neuen Lage wird als Zwischenlagen-Wartezeit bezeichnet. Die Zwischenlagen-Temperatur T_{ZL} wird als die Bauteil-Oberflächen-Temperatur definiert, welche unmittelbar vor Schweißbeginn der darauffolgenden Lage vorherrscht (vgl. Abschnitt 2.2).

Im Kontext der Additiven Fertigung besteht ein Bauteil aus mehreren aufgetragenen Lagen. Im Bauteil befindliche geometrische Lagen-Unregelmäßigkeiten können sich in darauffolgenden Lagen akkumulieren, wodurch die Bauteilgeometrie und die Prozessstabilität signifikant beeinflusst werden können. (DING ET AL. 2015A)

Empirische Modelle und statistische Methoden für die Untersuchung der Prozessparameter-Einflüsse auf schmale Wandgeometrien aus Ti 6Al 4V wurden beim CMT-basierten WAAM von SEQUEIRA ALMEIDA & WILLIAMS (2010) und beim WIG-basierten WAAM von MARTINA ET AL. (2013) erarbeitet. SEQUEIRA

ALMEIDA & WILLIAMS (2010) modellierten die Bauteil- bzw. Wand-Breite in Abhängigkeit von der Drahtvorschub-Geschwindigkeit und dem Drahtdurchmesser. Dabei konnten mit einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm Bauteil-Breiten zwischen 3,2 mm und 5,2 mm erreicht werden (SEQUEIRA ALMEIDA 2012). MARTINA ET AL. (2013) konnten Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern und Wand-Breiten sowie -Höhen bestimmen. Während des WIG-basierten Prozesses beeinflusst der Wärmeeintrag in das Bauteil die Lagen-Breite und -Höhe (MARTINA ET AL. 2012). BAUFELD ET AL. (2010) fertigten mit dem WIG-basierten WAAM unter der Anwendung von schmalen geradlinigen Aufbaustrategien Wände mit Breiten im Bereich von 5 bis 20 mm.

Die Verarbeitung von Aluminiumlegierungen mittels des CMT-basierten WAAM-Prozesses wurde von AYARKWA ET AL. (2015) und FANG ET AL. (2019) untersucht. AYARKWA ET AL. (2015) beobachteten, dass das Verhältnis aus der Drahtvorschub-Geschwindigkeit v_D und der Prozess-Geschwindigkeit v_P die geometrischen Bauteileigenschaften beeinflusst. Auf dieser Basis wurde ein Prozessfenster definiert, welches sich an diesem Verhältnis bemisst. Bei zunehmenden Lagenzahlen konnten gleichzeitig kleiner werdende Lagen-Höhen bei der Verwendung von 1.5130 beobachtet werden (GONZÁLEZ ET AL. 2017). Daraufhin folgten weitere experimentelle Versuchsdurchführungen, welche die Beobachtungen der Einflüsse von v_D und v_P auf die Bauteilgeometrie für Aluminiumlegierungen bestätigten (CONG ET AL. 2017). Ähnliche Einflüsse auf die Bauteilgeometrie von schmalen Wänden wurden von LEHMANN ET AL. (2020) und ROSLI ET AL. (2020) ebenfalls unter Verwendung von 1.5130 beobachtet. Für den Werkstoff Inconel 825 konnten BHARAT KUMAR & ANANDAKRISHNAN (2020) eine hohe Signifikanz der Drahtvorschub-Geschwindigkeit für die Breite einfacher, geradliniger und einlagiger Schweißraupen bestimmen.

LEHMANN ET AL. (2020) stellten zudem beim CMT-basierten WAAM und bei der Verwendung von 1.5130 den Einfluss von Zwischenlagen-Wartezeiten auf die Bauteilgeometrie fest. Kürzere t_W führten zu einer Agglomeration des Werkstoffs im Schmelzbad. Dabei wurden variierende, ungleichmäßige Bauteil-Breiten beobachtet. Daran anknüpfend wurden von BELHADJ ET AL. (2022) die Einflüsse der Zwischenlagen-Wartezeit und der Prozess-Geschwindigkeit auf die Bauteil- bzw. Wand-Höhe und -Breite untersucht. Das Ergebnis zeigte, dass die Bauteil-Höhe sowohl von der Zwischenlagen-Wartezeit als auch von der Prozess-Geschwindigkeit beeinflusst wurde. Obwohl die Streckenenergie (vgl. Gleichung 2-1) und das abgelegte Werkstoffvolumen während der Experimente konstant gehalten wurden, resultierte aus einer Erhöhung der Prozess-Geschwindigkeit eine Zunahme der

Schmelzbad-Temperatur. Dies führte anschließend zu einer höheren Bauteil-Breite.

Der Zusammenhang zwischen zunehmender Bauteil-Höhe und kleiner werdenden Temperaturgradienten zwischen dem Schmelzbad und dem Bauteil wurde von ZHAO ET AL. (2011) bei der Verwendung von 1.0038 beschrieben. YANG ET AL. (2017) beobachteten den Effekt von höheren Temperaturgradienten bei höheren Zwischenlagen-Wartezeiten. Eine höhere geometrische Bauteil-Formtreue konnte durch das Halten der Zwischenlagen-Wartezeiten in einem definierten Bereich erzielt werden.

Beim WIG-basierten WAAM wurde eine Größenzunahme des Schmelzbades bei der Verwendung von Inconel 625 in höheren Bauteil-Lagen beobachtet (WANG ET AL. 2016). Überdies wurde von WU ET AL. (2017) gezeigt, dass variierende Temperaturen entlang der Bauteil-Höhe geometrische Bauteilabweichungen hervorrufen können. Die Autoren beschrieben geometrische Abweichungen zwischen den ersten Lagen. Diese Abweichungen wurden durch den sich ändernden Wärmefluss im Bauteil erklärt. In den ersten Lagen wird die Wärme vorwiegend in die Grundplatte abgeführt. Bei weiteren aufgebauten Lagen findet die Wärmeleitung innerhalb des Bauteils statt, bevor die Wärme in die Grundplatte abgeführt wird.

Ein Wärmestau konnte bei einfachen geradlinigen Schweißraupen von RÍOS ET AL. (2018) nachgewiesen werden. In höheren Bauteil-Lagen beobachteten die Autoren eine Zunahme der einzelnen Lagen-Breiten und eine Abnahme der einzelnen Lagen-Höhen. Durch den Einsatz einer aktiven Kühlvorrichtung konnte der entstehende Wärmestau auch für Aluminiumbauteile in kürzerer Zeit reduziert werden als ohne den Einsatz einer aktiven Kühlvorrichtung (DA SILVA ET AL. 2020).

Zwischenlagen-Temperaturen zwischen den einzelnen Bauteil-Lagen beeinflussen Kenngrößen der geometrischen Bauteil-Formtreue, wie die Oberflächen-Welligkeit (GENG ET AL. 2017). Die niedrige thermische Leitfähigkeit von Ti 6Al 4V begünstigt das Auftreten von Wärmestaus im Bauteil, sodass in höheren Bauteil-Lagen höhere Temperaturen entstehen als in niedrigeren Bauteil-Lagen (MICHALERIS 2014; DA SILVA ET AL. 2020). WANG ET AL. (2021) untersuchten die Korrelationen zwischen der Zwischenlagen-Temperatur und den geometrischen Bauteileigenschaften von einfachen geradlinigen Schweißraupen. Die Autoren setzten den CMT-basierten Schweißprozess ein, um Untersuchungen mit Stahlwerkstoffen durchzuführen. Sie beobachteten, dass unter Einsatz konstanter Prozess- und Drahtvorschub-Geschwindigkeiten sowie zunehmender Zwischenlagen-Temperaturen die Schweißraupen um 0,5 mm breiter wurden und sich die Höhen zugleich um ca. 0,5 mm reduzierten.

VÁZQUEZ ET AL. (2020) untersuchten verschiedene Zwischenlagen-Wartezeiten in Kombination mit einer aktiven Kühlvorrichtung während des CMT-basierten WAAM-Prozesses mit Ti 6Al 4V. Ohne den Einsatz einer Kühlvorrichtung führten kurze Zwischenlagen-Wartezeiten zu geometrischen Bauteil-Unregelmäßigkeiten. Mit der Kühlvorrichtung konnte die Wärme aus dem Bauteil schneller abgeführt werden, sodass sich die Zwischenlagen-Wartezeiten bei gleichbleibenden Bauteilgeometrie-Eigenschaften reduzieren ließen. Eine Reduzierung der Prozessbrachzeiten, die durch Zwischenlagen-Wartezeiten verursacht werden, wurde ebenfalls von KOZAMERNIK ET AL. (2020) unter Einsatz von Kühltechniken für Stahlbauteile beobachtet.

3.3 Prozessuntersuchungen bei verwandten AM-Verfahren

Einige grundlegende Prozess- und Bauteil-Charakteristiken, die bei Laser- und Elektronenstrahl-basierten DED-Verfahren auftreten, können auf den WAAM-Prozess übertragen werden. Insbesondere helfen die Untersuchungen der Prozessparameter-Einflüsse auf die Bauteilgeometrie dabei, ein umfassendes Verständnis des WAAM-Prozesses zu erlangen.

Mit dem Laserstrahl-basierten DED fertigten BRANDL ET AL. (2010) schmale und BRANDL ET AL. (2012) breite Wandgeometrien aus Ti 6Al 4V basierend auf einer geradlinigen und unidirektionalen Aufbaustrategie. Im Verlauf der Experimente wurden die einzelnen Lagen jeweils mit einer Zwischenlagen-Temperatur von 300 °C gefertigt. Hierfür wurde nach jeder aufgetragenen Lage gewartet, bis die Lage auf 300 °C abgekühlt war, bevor die nächste Lage aufgetragen wurde. BRANDL ET AL. (2011) variierten die Prozessparameter, welche die Streckenenergie definieren (vgl. Gleichung 2-1), und stellten bei einer erhöhten Streckenenergie eine größere WEZ am Bauteil fest. Darüber hinaus beschrieben die Autoren die Zusammenhänge zwischen diesen Prozessparametern und den geometrischen Bauteileigenschaften. Es konnten höhere Bauteil- bzw. Wand-Breiten durch eine Erhöhung der Drahtvorschub-Geschwindigkeit oder durch eine Reduzierung der Prozess-Geschwindigkeit umgesetzt werden (DING ET AL. 2015A; BRANDL ET AL. 2011).

Beim Laserstrahl-basierten DED untersuchten FARSHIDIANFAR ET AL. (2016) die sich einstellende Geometrie von Stahlbauteilen in Abhängigkeit von verschiedenen Schmelzbad-Temperaturen. Es wurden Experimente zu geradlinigen

Schweißraupen durchgeführt. Die Autoren stellten einen Einfluss der Schmelzbad-Temperatur auf die Lagen-Höhe fest, wobei erhöhte Schmelzbad-Temperaturen zu niedrigeren Lagen-Höhen führten. BENNETT ET AL. (2017) korrelierten beim Einsatz von Inconel 718 die auftretenden Bauteil-Temperaturen mit der finalen Bauteilgeometrie. Es konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der Vorschub-Geschwindigkeit des Zusatzwerkstoffs Inconel 718 und der Lagen-Höhe beschrieben werden. Außerdem besaß diese Vorschub-Geschwindigkeit einen höheren Einfluss auf die Lagen-Höhe als die Streckenenergie (vgl. Gleichung 2-1). Eine Reduzierung der Oberflächen-Welligkeit konnte durch eine Erhöhung der Streckenenergie erzielt werden. BURKHARDT ET AL. (2018) untersuchten für Titanlegierungen die Korrelationen zwischen Prozessparametern und geometrischen Bauteileigenschaften. Dabei konnten bei reduzierten Prozess-Geschwindigkeiten geringere Bauteil-Breiten festgestellt werden. Darauf aufbauend folgten Studien, in deren Rahmen bei Stahlbauteilen der Einfluss von Wärmestaus auf die Schmelzbad-Größe beobachtet wurde (MAZZUCATO ET AL. 2019). Die Länge der Schweißraupe wurde in die Betrachtung einbezogen. HEDAYATNEJAD ET AL. (2021) konkludierten, dass beim Laserstrahl-basierten DED eine erhöhte Zwischenlagen-Wartezeit zu geringeren Bauteil-Temperaturen führt und damit die Verwendung der Wartezeiten bei größeren und komplexeren Bauteilen an Bedeutung gewinnt. Versuche mit dem Ziel der Beschreibung der UWZ zwischen den Prozessparametern und den geometrischen Bauteileigenschaften wurden von ZAPATA ET AL. (2022) für Aluminiumlegierungen sowie für Stähle angestellt. Lineare Regressionsmodelle beschreiben die einzelnen Auswirkungen der Prozessparameter Drahtvorschub-Geschwindigkeit und Prozess-Geschwindigkeit auf die Lagen-Breite und -Höhe am besten. Eine erhöhte Drahtvorschub-Geschwindigkeit führte zu einer zunehmenden Lagen-Höhe. Die Lagen-Höhe wurde von der Laserleistung nicht signifikant beeinflusst. Die Lagen-Breite hingegen konnte mit einer erhöhten Laserleistung signifikant vergrößert werden. Die Drahtvorschub-Geschwindigkeit besitzt einen geringfügigen Einfluss auf die Lagen-Breite.

3.4 Qualitätssicherung beim WAAM

Wie in den Abschnitten 3.2 und 3.3 erläutert, sind unter anderem die Prozessparameter von großer Bedeutung, die einen maßgeblichen Einfluss auf den thermischen Bauteil-Haushalt besitzen (bspw. die Drahtvorschub- oder die Prozess-Geschwindigkeit). In Abschnitt 2.3 wurde beschrieben, dass beim Schweißen von

Titanlegierungen oxidationsbedingte Anlauffarben der Bauteiloberfläche entstehen können. Verschiedene Konzepte für den Aufbau und die Implementierung einer thermischen Prozessüberwachung und einer Überwachung des Bauteil-Oxidationsverhaltens können dabei helfen, die Prozess- und die Bauteilqualität zu verbessern.

3.4.1 Thermische Prozessüberwachung

Verschiedene Studien zeigten, dass eine thermografische Temperaturmessung während des Prozesses möglich ist und für eine Bauteil-Zustandsüberwachung eingesetzt werden kann (WU ET AL. 2017; BAGAVATHIAPPAN ET AL. 2013). Ohne den Einsatz eines Temperaturmanagements bzw. einer Bauteil-Temperatur-Überwachung während des WAAM-Prozesses stellten CARTER ET AL. (2019) signifikante geometrische Bauteilabweichungen fest, weswegen der Prozess abgebrochen werden musste. Die Überwachung und Einhaltung der Zwischenlagen-Temperatur während des WAAM-Prozesses führen zu einer erhöhten Bauteil-Formtreue bei der Verwendung von Aluminium (DA SILVA ET AL. 2020) und Stahl (CARTER ET AL. 2019).

Einen Vorschlag für den Aufbau einer thermischen Prozessüberwachung unterbreiteten XU ET AL. (2018) im Rahmen einer Multi-Sensor-Umgebung. Die Autoren betrachteten basierend auf STANISAW (2012) zwei separate Überwachungsgruppen: eine aus der allgemeinen Schweißtechnik überführte Maschinenüberwachung und eine Überwachung, welche direkt Rückschlüsse auf die Bauteileigenschaften zuließ. Bei der Maschinenüberwachung wurden Prozessparameter wie die Drahtvorschub-Geschwindigkeit oder die Prozess-Geschwindigkeit genannt. Bei der Überwachung der Bauteileigenschaften wurden optische und thermische Messverfahren aufgeführt. Die Autoren konkludierten u. a., dass eine Messung der finalen Bauteileigenschaften nach dem Beenden des WAAM-Prozesses häufig zu spät ist und durch eine Prozessüberwachung vorzeitige Prozessabbrüche oder Bauteilausschüsse vermieden werden können.

Eine Übersicht über Prozessüberwachungs-Technologien wurde von XIA ET AL. (2020) erstellt. Thermische Sensoren überzeugten dabei v. a. durch eine hohe Robustheit¹⁶ und einen hohen Informationsgehalt der erzeugten Daten. Als nachteilig an thermischen Sensoren wurde die unzureichende Messgenauigkeit genannt, da

¹⁶ Dies entspricht einer geringen Defektanfälligkeit der Messtechnik während der aktiven Messung.

diese von zahlreichen Größen beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 2.4.1), welche durch die die Messtechnik bedienende Person bestimmt werden.

ÜNSAL ET AL. (2020) setzten Thermoelemente ein, welche vor Schweißbeginn an der Position befestigt wurden, an der weiter geschweißt wurde. Damit konnte eine Zwischenlagen-Temperatur von 300 °C eingehalten werden. Eine Infrarot-Thermografie-Kamera wurde von CARTER ET AL. (2019) senkrecht zur Substratplatte in die WAAM-Anlage implementiert, um die Zwischenlagen-Temperatur zu erfassen. Bei unterschiedlich großen Bauteilen und gleichbleibenden Prozessparametern wurden von ARTAZA ET AL. (2017) während des PS-basierten WAAM-Prozesses unter Verwendung von Stahl unterschiedliche Bauteil-Temperaturen mittels eines Infrarot-Pyrometers beobachtet.

WU (2018) setzte beim WIG-basierten WAAM Thermoelemente und ein Infrarot-Pyrometer ein. Für Bauteile aus Ti 6Al 4V kalibrierte er die Infrarot-Messtechnik anhand diverser Experimente. Es wurden Bauteile außerhalb des Bauraums und ohne Inertgas-Atmosphäre von 50 °C auf 500 °C erwärmt und Thermoelemente an der Bauteiloberfläche befestigt. Auf der Bauteiloberfläche konnten oxidationsbedingte Anlauffarben detektiert werden. Im Rahmen der Pyrometer-Kalibrierung wurde nach einem Vergleich der Messsignale beider Sensortechnologien ein Bauteil-Emissionskoeffizient von 0,45 ermittelt. Für den Temperaturbereich zwischen 50 °C und 500 °C konnte ein maximaler Temperatur-Messfehler von 10 K am Infrarot-Pyrometer bestimmt werden.

Schweißbedingter Schmauch und atmosphärische Gase in der Messstrecke beeinflussen das detektierbare Messsignal spürbar. Dieser Einfluss muss beim Einsatz von Thermografie-basierten Technologien berücksichtigt werden, um reproduzierbare Messdaten erzeugen zu können (vgl. VOLLMER & MÖLLMANN 2017, S. 143). Dies führt dazu, dass Literaturwerte für bspw. den Emissionsgrad eines Werkstoffs nicht direkt übernommen werden können und die individuelle Bestimmung des Emissionskoeffizienten notwendig ist (MCINTOSH & HUFF 2018).

Für Wandgeometrien aus 1.0038, bestehend aus geradlinigen Schweißraupen, wurde von YANG ET AL. (2017) die Infrarot-Thermografie eingesetzt. Ziel der Untersuchungen war es u. a., Abkühlraten innerhalb des Bauteils zu erfassen. Dabei kamen Thermoelemente und eine Infrarot-Thermografie-Kamera während des WAAM-Prozesses zum Einsatz. Die Kamera wurde im Bauraum so platziert, dass sie mit einem Abstand von 1 m auf die y-z-Ebene des Bauteils (vgl. Abbildung 13 a)) unter einem Winkel von 90° senkrecht ausgerichtet war. Auf der Basis des Stefan-Boltzmann-Gesetzes (vgl. Gleichung 2-16) wurden Kalibrierungen für die Ermittlung des Emissionskoeffizienten durchgeführt. Dabei wurde ein Bauteil von

Raumtemperatur bis auf ca. 1200 °C erwärmt. Es wurden zwei Thermolemente des Typs K an zwei Bauteilpositionen eingesetzt. Die Signale der Infrarot-Thermografie-Kamera und der Thermolemente wurden simultan aufgezeichnet und nach der erneuten Abkühlung bis auf Raumtemperatur miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass bei einem Emissionskoeffizienten von 0,84 die geringsten Signalabweichungen zwischen den Sensortechnologien vorherrschten. Die durchschnittliche Abweichung lag bei 3,05 %. Während weiterer Experimente konnten negative Einflüsse des Lichtbogens und des Werkstofftransfers auf das thermografische Messsignal festgestellt werden. Das flüssige Schmelzbad des Stahls wurde mit der Kamera fälschlicherweise mit einer Temperatur von 530 °C gemessen. Jedoch besitzt das flüssige Schmelzbad des Stahls 1.0038 eine tatsächliche Temperatur, die höher als der Werkstoff-Schmelzpunkt (ca. 1450 °C) ist. Die Autoren begründeten diese Temperaturdiskrepanz mit den Aggregatzuständen der erfassten festen und flüssigen Körperoberfläche. Die Infrarot-Thermografie-Kamera wurde für einen Feststoff und nicht für eine Flüssigkeit kalibriert, wodurch Emissionskoeffizienten nicht direkt übernommen werden konnten, um die Messgenauigkeit aufrechtzuerhalten. Die negativen Einflüsse auf das thermografische Messsignal konnten bei einem inaktiven Lichtbogen und bei erstarrter Schmelze beseitigt werden (YANG ET AL. 2017).

Auch RICHTER ET AL. (2019) demonstrierten ein Vorgehen zur Überwachung der Schmelzbad-Temperatur beim WAAM-Prozess. In der Studie konnte der Lichtbogen während des Schweißprozesses ausgeblendet werden, wodurch eine quantitative Messung des Temperaturfelds im Schmelzbad ermöglicht wurde. Dennoch wurden Reflexionen, welche das thermografische Messsignal beeinflussten, festgestellt. Diese Reflexionen sollten während der Messung abgedeckt und damit reduziert oder, falls möglich, vermieden werden.

KOZAMERNIK ET AL. (2020) beschrieben, dass eine Überwachung und Steuerung der Zwischenlagen-Temperatur für eine konstante Lagen-Höhe bei der Verwendung von Stahl förderlich sind. Die Zwischenlagen-Temperatur wurde mit einem Infrarot-Pyrometer gemessen. Die Wahl des thermischen Sensors fiel aus Kostengründen auf ein Pyrometer, mit dem auf kleinen Flächen gemessen werden kann. Das Pyrometer wurde fest mit dem Schweißkopf verbunden, sodass der thermische Sensor mit dem Schweißkopf im Prozess bewegt wurde. Zusätzlich wurde ein Schutzsystem an das Pyrometer angebracht, wodurch nur bei ausgeschaltetem Lichtbogen gemessen werden konnte.

Wände aus Stahl wurden von LEE (2020) beim CMT-basierten WAAM mithilfe eines Infrarot-Pyrometers überwacht. Das Pyrometer wurde in der Nähe der Substratplatte befestigt, sodass der Sensor während der gesamten Bauteilfertigung auf einen Punkt auf der Bauteiloberfläche in Aufbaurichtung fixiert war. Für den Einsatz des Pyrometers wurde der Sensor durch Thermoelemente des Typs K kalibriert. Hierzu wurde das Thermoelement an der gleichen Position fixiert, auf welche das Pyrometer gerichtet war. Das Bauteil wurde mithilfe eines Gasbrenners erwärmt und die Signale des Thermoelements und des Pyrometers wurden aufgezeichnet. Aus diesen Temperaturmessungen wurde ein Emissionskoeffizient für das Stahlbauteil von 0,96 bestimmt.

BELHADJ ET AL. (2022) implementierten eine Infrarot-Thermografie-Kamera beim CMT-basierten WAAM bei der Verwendung von 1.4430. Der Abstand von der Kamera zur y-z-Bauteil-Ebene wurde auf 500 mm konstant eingestellt. Im Verlauf der Experimente wurde der Emissionsgrad von 0,6 verwendet, welcher zuvor bei den Untersuchungen von FARSHIDIANFAR ET AL. (2016) ermittelt wurde. Die Bauteilaufnahmen fanden mit einer Frequenz von 60 Hz statt. Mithilfe dieses Aufbaus einer thermischen Prozessüberwachung konnten größere WEZ bei zunehmender Bauteil-Höhe beobachtet werden. Die Autoren begründeten die Änderung des WEZ durch den im Bauteil auftretenden Wärmestau. Der Wärmefluss im Bauteil ist in Aufbaurichtung größer als in Prozessrichtung, wodurch hohe Temperaturgradienten bzw. größere WEZ bei höheren Bauteil-Lagen entstehen.

3.4.2 Überwachung des Oxidationsverhaltens von Bauteilen aus Ti 6Al 4V

Beim WIG-basierten WAAM-Prozess beobachteten BAUFELD ET AL. (2010) und BAUFELD ET AL. (2011) blaue Verfärbungen der Bauteiloberflächen trotz des Einsatzes einer auf Argon basierenden Inertgas-Atmosphäre im Bauraum. Die Verfärbungen deuteten auf eine entstandene Oxid-Schicht hin, welche sich die Autoren nicht erklären konnten. WU ET AL. (2018) analysierten den Einfluss verschiedener Zwischenlagen-Temperaturen auf den Oxidationsgrad der Bauteiloberflächen. Das Ergebnis zeigte, dass bei höheren Temperaturen stärkere Anlauffarben auf den Oberflächen entstehen. Die Zunahme des Oxidationsgrads wurde von MARTINA ET AL. (2012) und ZHOU ET AL. (2022) bei einer Erhöhung des Sauerstoffgehalts im Bauraum festgestellt.

CABALLERO ET AL. (2019) untersuchten das Oxidationsverhalten von Werkstoffen aus Ti 6Al 4V während des PS-basierten WAAM-Prozesses. Der Oxidationsgrad der Bauteiloberfläche wurde signifikant von der Expositionszeit des Bauteils im

Bauraum und vom Sauerstoffgehalt im Bauraum beeinflusst. Bei Bauteil-Größen von 150 mm Länge führten Zwischenlagen-Wartezeiten von 30 s in Kombination mit einem Sauerstoffgehalt von 40 ppm zu starken Anlauffarben der Bauteiloberfläche. Weitere Untersuchungen folgten von ARTAZA ET AL. (2020). Die Autoren fluteten den Bauraum mit Argon und fertigten Wandgeometrien bei einem Sauerstoffgehalt im Bauraum von kleiner als 100 ppm. Für die Bestimmung des Sauerstoffgehalts kam ein Sauerstoff-Messgerät zum Einsatz. Dieses Messgerät initiierte einen Fertigungsstopp, sobald der Sauerstoffgehalt den Wert von 100 ppm überschritt. Erst nach dem Unterschreiten dieses Wertes wurde der Fertigungsprozess fortgeführt.

ELMER & GIBBS (2019) implementierten an der CMT-basierten Versuchsanlage eine geschlossene Schutzgaskammer, um den Sauerstoffgehalt im Bauraum u. a. auf 130 ppm, 40 ppm und 1 ppm zu reduzieren. Die Schutzgaskammer besaß ein Volumen von ca. 0,75 m³. Die Autoren beschrieben zudem, dass eine erhöhte schweißbedingte Spritzerbildung auftrat, wenn keine Inertgas-Atmosphäre während des WAAM-Prozesses vorherrschte.

Weitere Studien ergaben, dass der Sauerstoffgehalt im Schweißdraht zusätzlich zu den oben genannten Größen den Oxidationsgrad der Bauteiloberflächen während des WAAM-Prozesses beeinflussen kann (BERMINGHAM ET AL. 2018; DING ET AL. 2015B).

3.5 Qualitätssicherung bei verwandten AM-Verfahren

In der Literatur werden Ansätze für die Qualitätssicherung bei Laser- und Elektronenstrahl-basierten DED-Prozessen sowie bei Pulverbett-basierten additiven Fertigungstechnologien beschrieben. Einige der dabei erarbeiteten und eingesetzten Methoden sowie Versuchsaufbauten können im Kontext der Dissertation auf den WAAM-Prozess übertragen werden.

RODRIGUEZ ET AL. (2015) setzten eine Infrarot-Thermografie-Kamera beim Pulverbett-basierten Schmelzen mittels Elektronenstrahl ein. Um die Kamera vor äußeren Einflüssen zu schützen, verwendeten die Autoren ein Schutzglas, welches vor der Kameralinse befestigt wurde. Damit eine Temperaturmessung ermöglicht werden konnte, musste der Transmissionskoeffizient des Schutzglases bestimmt werden. Hierzu platzierten RODRIGUEZ ET AL. (2015) einen schwarzen Körper im Bauraum. Die Temperaturmessungen wurden zuerst ohne und im Anschluss mit

Schutzglas an der Oberfläche des schwarzen Körpers durchgeführt. Beide Temperaturwerte der Messungen wurden miteinander verglichen und ein Transmissionskoeffizient von 93 % für das Schutzglas ermittelt. Beim Pulverbett-basierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (engl. *powder bed fusion of metals using a laser beam*, kurz PBF-LB/M) implementierte KRAUSS (2016) eine Infrarot-Thermografie-Kamera am Versuchsstand, um u. a. Prozess-Unregelmäßigkeiten und Bauteilqualitäten während des PBF-LB/M-Prozesses zu erfassen. Hierfür wurde eine Methode vorgestellt, welche eine lagenweise Interpretation von Qualitätsmerkmalen zulässt.

Beim Laserstrahl-basierten DED verwendeten FARSHIDIANFAR ET AL. (2016) eine Infrarot-Thermografie-Kamera am Versuchsstand, um die Stahlbauteil-Abkühlraten während des Prozesses gezielt zu beeinflussen. Weitere Untersuchungen folgten von RUIZ ET AL. (2018), die ein Infrarot-Pyrometer beim Laserstrahl-basierten DED einsetzten. Dieses Pyrometer kalibrierten die Autoren am Beispiel von Inconel 718 mithilfe von Thermoelementen in einem Wärmeofen. BENNETT ET AL. (2017) setzten bei den Temperaturmessungen eine Infrarot-Thermografie-Kamera ein, welche die Strahlungsleistung der Bauteiloberfläche mit einem Emissionsgrad von 0,1 überwachte. Die Schmelzbad-Temperatur des Werkstoffs Ti 6Al 4V wurde beim Laserstrahl-basierten DED von KHANZADEH ET AL. (2019) ermittelt und mit den resultierenden Schmelzbad-Geometrien korreliert. Für die Messung der Schmelzbad-Temperatur kam ein Infrarot-Pyrometer zum Einsatz. Außerdem wurde das Temperaturfeld in Aufbaurichtung mithilfe einer Infrarot-Thermografie-Kamera erfasst. Aufbauend auf vorangegangenen Arbeiten (KHANZADEH ET AL. 2016) beschrieben die Autoren, dass die Temperaturfeld-Historie des Bauteils bei einer Überwachung der Schmelzbad-Temperatur berücksichtigt werden sollte.

BERNAUER ET AL. (2022) untersuchten breite Wandgeometrien durch den Einsatz von gependelt aufgetragenen Schweißraupen. Im Rahmen der Experimente wurde die Schmelzbad-Temperatur mithilfe eines Infrarot-Pyrometers überwacht. Das Temperaturmanagement während des Prozesses war wichtig, um ein Überhitzen des Bauteils und damit einen Prozessabbruch zu vermeiden.

Beim Elektronenstrahl-basierten DED konnten PIXNER ET AL. (2021) zeigen, dass Temperaturmessungen von außerhalb des Bauraums mit hohen Messunsicherheiten behaftet sind. Die Autoren betrachteten dabei den Transmissionskoeffizienten der Pyrometerlinse, welcher sich durch die schweißbedingten Einflussgrößen veränderte. Die Experimente wurden mit Ti 6Al 4V unter Einsatz eines Vakuums im Bauraum durchgeführt.

Bei den Untersuchungen von RAPLEE ET AL. (2017) kam es beim Elektronenstrahl-basierten DED zu einem Beschlagen des eingesetzten Schutzglases. Die dabei entstandene Beschichtung auf dem Schutzglas führte zu einer Verminderung des Transmissionskoeffizienten. Die Autoren beobachteten daher niedrigere Messwerte der Temperatur. Die angezeigten verminderten Temperaturen erklärten sich die Autoren durch eine reduzierte Strahlungsleistung, die an der thermografischen Messeinheit ankam.

AL-BERMANI ET AL. (2010) beobachteten die hohe Affinität des Werkstoffs Ti 6Al 4V, bei erhöhten Temperaturen Sauerstoff aus der Atmosphäre während des Pulverbett-basierten Schmelzens mittels Elektronenstrahl aufzunehmen. QIU ET AL. (2015) setzten beim Laserstrahl-basierten DED eine Argon-Inertgas-Atmosphäre ein, um Bauteile aus Ti 6Al 4V herzustellen. Der Sauerstoffgehalt im Bauraum wurde während des Prozesses kleiner als 500 ppm gehalten. Die Substratplatten wurden vor jedem Prozessstart gesäubert. Andere Studien zeigten, dass der Sauerstoffgehalt im Bauraum zwischen 200 ppm und 2500 ppm gehalten werden sollte, damit keine Bauteil-Oxidation stattfindet (GUSHCHINA ET AL. 2018).

Unter dem Einsatz von mehreren Inertgas-Zuführungen stellten HOEFER & MAYR (2018) und HOEFER ET AL. (2019) Bauteile aus dem Werkstoff Ti 6Al 4V her. Die Autoren verwendeten Argon, um den Bauraum mit zwei verschiedenen Techniken mit einem Volumenstrom von 20 l/min zu fluten. Zum einen wurde das Schutzgas ungefähr auf Höhe der Substratplatte von außen durch die Schutzgaskammerwand in den Bauraum eingeleitet. Zum anderen wurde dem Bauraum von oben über mehrere Gasauslässe Argon zugeführt. Eine dritte Form der Gaszufuhr wurde über ein Formiergas¹⁷ mit einem Volumenstrom von 12 l/min umgesetzt.

Beim PBF-LB/M untersuchten DIETRICH ET AL. (2020) den Einfluss verschiedener Sauerstoffgehalte im Bauraum auf die Oxidation von Bauteilen aus Ti 6Al 4V. Die Autoren konkludierten, dass die Inertgas-Atmosphäre im Bauraum überwacht und kontrolliert werden muss, damit keine Abweichungen in der Bauteilfestigkeit entstehen. Bei einer Erhöhung des Sauerstoffgehalts im Bauraum von 2 ppm auf 977 ppm führte eine Gas-Diffusion in den Werkstoff zu einer Versprödung und damit zu einem Zähigkeitsverlust und zu einer Zunahme der Festigkeit des Bauteils.

¹⁷ Bei einem Formiergas findet eine Gaszufuhr über den Schweißkopf unmittelbar in die Prozesszone statt.

3.6 Fazit und Handlungsbedarf

Die hohen Ansprüche an die Bauteil- und Prozessqualitäten erschwerten bisher die erfolgreiche Überführung des WAAM-Prozesses in die Anwendung in der Luftfahrttechnik (WILLIAMS ET AL. 2016). Die additive Fertigungstechnologie kann bspw. in eine Prozesskette integriert werden, welche im ersten Prozessschritt endkonturnahe Bauteile mithilfe von WAAM erzeugt und im zweiten Prozessschritt durch eine Zerspanung die Bauteil-Endkontur erzielt (WILLIAMS ET AL. 2016). Der Titanwerkstoff Ti 6Al 4V besitzt eine geringe Wärmeleitfähigkeit, wodurch es bei seiner Zerspanung zu erhöhten Temperatur- und Verschleißbeanspruchungen am Werkzeug kommt (ALLEN 2006). Um die anwendungsseitigen Prozess- und Bauteilanforderungen erfüllen zu können, ist ein fundamentales Verständnis der Prozessparameter sowie ihrer UWZ (bspw. zwischen der Zwischenlagen-Temperatur und der -Wartezeit) und ihrer Einflüsse auf die Bauteilqualität von signifikanter Bedeutung. Daraus lassen sich folgende Fazite aus dem betrachteten Stand der Wissenschaft und Forschung ziehen:

- In Abschnitt 3.2 und 3.3 wurden u. a. die verschiedenen Möglichkeiten der Prozessführung und die Einflüsse auf die Prozessstabilität beschrieben. Studien zeigten, dass die Prozessstabilität von diversen Größen beeinflusst wird. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Prozessstabilität die Bauteileigenschaften unmittelbar beeinflusst. Beim Auftreten von Prozessinstabilitäten kann ein Prozessabbruch notwendig sein. Bspw. kann die Wahl der Aufbaustrategie und der Prozessparameter zu Prozessinstabilitäten führen, welche durch Lichtbogen-Instabilitäten und sich ändernde Werkstofftransfer-Eigenschaften hervorgerufen werden. Aus diesem Grund muss die Prozessstabilität zu jedem Prozesszeitpunkt gegeben sein, damit WAAM-Bauteile reproduzierbar hergestellt werden können.
- Die Prozessparameter und deren Einflüsse auf die Bauteilgeometrie wurden für diverse WAAM-Prozesse, verwandte additive Fertigungsverfahren und verschiedene Werkstoffe anhand weiterer Prozessuntersuchungen in den Abschnitten 3.2 und 3.3 aufgezeigt. Die Ausführungen in der Literatur belegen, dass die Bauteilgeometrie während des Prozesses formtreu aufgebaut werden kann, wenn die Prozessstabilität gegeben ist. Bei einer Veränderung der Prozessparameter innerhalb definierter Prozessfenster konnten unterschiedlich signifikante Änderungen der geometrischen Bauteileigenschaften festgestellt werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die

Zwischenlagen-Temperatur während des WAAM-Prozesses von großer Bedeutung ist. Die Zwischenlagen-Temperatur besitzt einen signifikanten Einfluss auf die finale Bauteilgeometrie bzw. die Formtreue.

- In den Abschnitten 3.4 und 3.5 wurde zum einen dargelegt, dass im Kontext einer Qualitätssicherung eine thermische Prozessüberwachung umgesetzt werden kann. Verschiedene Ansätze können für die Überwachung des thermischen Bauteil-Haushalts bzw. der Zwischenlagen-Temperatur gewählt werden. Es ist bspw. möglich, kontaktlose oder berührende Temperaturmessungen zu verschiedenen Prozesszeitpunkten und an diversen Bauteilpositionen mithilfe verschiedener Sensortechnologien durchzuführen. Bei diversen Versuchsaufbauten können unterschiedliche Methoden für die Kalibrierung der Messtechnik angewendet werden.
- Zum anderen konnte in den Abschnitten 3.4 und 3.5 hervorgehoben werden, dass der Sauerstoffgehalt im Bauraum während der Bauteilfertigung überwacht und kontrolliert werden muss, um Anlauffarben der Bauteiloberflächen zu vermeiden. In der Literatur werden verschiedene Angaben zu Grenzwerten von Sauerstoffgehalten im Bauraum bei der Verarbeitung von Ti 6Al 4V aufgeführt. Darüber hinaus erlauben Korrelationen zwischen weiteren Parametern, z. B. der Oberflächen-Expositionszeit und erhöhten Temperaturen, Rückschlüsse auf das Oxidationsverhalten. Für den Inertgas-Einsatz zur Abschirmung des Schweißguts gegenüber der Atmosphäre gibt es verschiedene Konzepte. In Abhängigkeit vom Versuchsaufbau können neben Schleppegasdüsen mit Inertgas geflutete Schutzgaskammern als zielführend erachtet werden.

Die in diesem Kapitel aufgezeigten Komplexitäten der UWZ zwischen Prozessparametern und geometrischen Bauteileigenschaften sowie unterschiedlicher Überwachungskonzepte führen zu einer sehr begrenzten Vergleichbarkeit der qualitativen und quantitativen Ergebnisse aus der Literatur. Diese Ergebnisse sind abhängig von den verschiedenen Prozessen, Werkstoffen und angewendeten Methoden. Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Dissertation können dennoch die folgenden wissenschaftlichen Handlungsbedarfe abgeleitet und aufgezeigt werden:

- Die Einflüsse von Prozessparametern auf die Bauteilgeometrie bei der Verwendung des CMT-basierten WAAM-Prozesses und des Werkstoffs Ti 6Al 4V müssen qualitativ und quantitativ intensiver untersucht werden. Außerdem müssen verschiedene Aufbaustrategien betrachtet werden, um sowohl einfache bzw. schmale Wände mit geradlinigen Schweißraupen als

auch komplexe bzw. breite Wände mit gependelten Schweißraupen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus der Literatur zu prüfen.

- Die Herstellung von formtreuen Bauteilen stellt gemäß der Literatur eine Herausforderung dar, wobei die Gründe hierfür u. a. auftretende Prozessinstabilitäten oder eine falsche Wahl von Prozessparametern sein können und diese daher weiter untersucht werden müssen. Es besteht Handlungsbedarf zur Ermittlung der UWZ zwischen den Zwischenlagen-Wartezeiten und -Temperaturen. Außerdem müssen die jeweiligen Einflüsse auf geometrische Bauteileigenschaften quantifiziert werden, um die Formtreue auf Lagen- und folglich auf Bauteilniveau gezielt zu verbessern.
- Eine allgemeine Methodik für den Einsatz einer thermischen Prozessüberwachung beim WAAM-Prozess muss beschrieben werden. Damit wird ermöglicht, dass gemessene und absolute Temperaturwerte reproduzierbar verglichen werden können. Mit einer einheitlichen Methodik könnten Zwischenlagen-Temperaturen zum einen während des Prozesses konstant gehalten und zum anderen in Zukunft zwischen WAAM-Anlagen rückverfolgbar übertragen werden.
- Die Einflüsse des Sauerstoffgehalts im Bauraum auf den Oxidationsgrad der Bauteiloberfläche während des WAAM-Prozesses müssen für den Werkstoff Ti 6Al 4V intensiver untersucht werden. Neben den in der Literatur sehr begrenzt betrachteten Zusammenhängen sind weitere Korrelationen zwischen Bauteil-Größen und Anlauffarben der Bauteiloberflächen zu ermitteln. Die Ermittlungen dieser Korrelationen sind für die Erarbeitung von grundlegendem Prozessverständnis notwendig.

4 Wissenschaftliches Vorgehen und Lösungsweg

4.1 Überblick

In Kapitel 4 werden das wissenschaftliche Vorgehen und der Lösungsweg im Hinblick auf das Forschungsziel beschrieben. Die in Kapitel 2 dargestellten Grundlagen und der in Kapitel 3 erläuterte Stand der Wissenschaft und Forschung dienen hierzu als Basis. Der Abschnitt 4.2 beinhaltet die Vorgehensweise im Rahmen der Arbeit. Das umfasst die Zielsetzung und die damit einhergehenden Forschungsfragen (FF), welche anhand definierter Lösungsbausteine (LB) beantwortet und für den Lösungsweg herangezogen werden sollen. Die Integration der vier Veröffentlichungen in diese Dissertation und deren Zuordnung zu den Lösungsbausteinen wird in Abschnitt 4.3 erläutert. Eine Abgrenzung zu Forschungsthemen, welche nicht im Rahmen dieser Arbeit adressiert werden, wird in Abschnitt 4.4 dargelegt.

4.2 Vorgehensweise

Aufgrund des abgeleiteten Handlungsbedarfs in Abschnitt 3.6 lässt sich eine wissenschaftliche Vorgehensweise hinsichtlich des Forschungsziels dieser Arbeit formulieren, die in den vier Publikationen verfolgt wurde und darin dargelegt ist. Die übergeordnete Zielsetzung lautet, eine qualifizierte, reproduzierbare und formtreue Additive Fertigung geometrisch komplexer Bauteile aus Ti 6Al 4V mittels WAAM zu realisieren und eine Online-Qualitätssicherung zu befähigen.

Zur Erreichung dieses Ziels werden drei Forschungsfragen formuliert, welche im Rahmen dieser Dissertation beantwortet werden sollen:

- FF 1:** Wie können Bauteile formtreu mittels WAAM für Anwendungen in der Luftfahrttechnik gefertigt werden?
- FF 2:** Wie können signifikante Veränderungen von relevanten Prozessgrößen messtechnisch erfasst werden?
- FF 3:** Wie können aufgezeichnete Daten für eine Qualitätssicherung genutzt werden?

Damit die drei Forschungsfragen beantwortet werden können, wurden Lösungsbausteine (LB) definiert. Jeder LB adressiert eine Forschungsfrage:

- LB 1:** Prozessuntersuchungen an geometrisch einfachen Körpern und an komplexen Bauteilen

In diesem LB wurden geeignete Probekörper zur Herstellung mittels WAAM identifiziert. Daran anschließend galt es, Prozessuntersuchungen an den definierten Volumenprimitiven anzustellen. Die UWZ zwischen Prozessparametern und geometrischen Bauteileigenschaften konnten modellbasiert beschrieben werden, um geeignete Methoden der Prozessüberwachung und Qualitätssicherung in LB 2 und LB 3 abzuleiten.

- LB 2:** Messtechnische Erfassung von signifikanten Prozessgrößen

Simultan zu LB 1 wurde in LB 2 eine Methode zur thermischen Prozessüberwachung beim WAAM-Prozess beschrieben. Darauf aufbauend konnten geeignete Prozessführungsstrategien zur Fertigung formtreuer Bauteile identifiziert werden.

- LB 3:** Befähigung einer Online-Qualitätssicherung

Die Ergebnisse aus LB 1 und LB 2 fließen zusammen in LB 3 ein. In LB 3 wurde eine Methode zur Sensitivitätsanalyse definiert, um den Einfluss der Zwischenlagen-Temperatur auf individuelle Lagen-Breiten beim WAAM-Prozess weiter untersuchen zu können. Es folgte eine Identifizierung von Grenzwerten für den Sauerstoffgehalt im Bauraum

während des WAAM-Prozesses, welche bei Anwendungen in der Luftfahrttechnik eingehalten werden können. Ein Funktionsdemonstrator für den Nachweis einer Online-Qualitätssicherung schließt den LB 3 ab.

4.3 Einordnung der Publikationen

Im Laufe der Forschungsaktivitäten sind vier Publikationen (P) entstanden, welche die wissenschaftlichen Inhalte für diese Dissertation darlegen. Abbildung 14 zeigt, wie die einzelnen Veröffentlichungen den jeweiligen Lösungsbausteinen zugeordnet sind. Die Publikationen I, II und IV sind inhaltlich bei den LB 1, 2 und 3 verortet. Dabei können die Inhalte der ersten Publikation (P I) in den LB 1, die der zweiten Publikation (P II) in den LB 2 und die der vierten Publikation (P IV) in den LB 3 eingebunden werden. Die dritte Publikation (P III) kombiniert die erarbeiteten Inhalte der LB 1 und 2, sodass die Inhalte der P III sowohl in den LB 1 als auch in den LB 2 einfließen. Die vier Publikationen werden in Kapitel 5 zusammengefasst und die wissenschaftlichen Erkenntnisse aufgezeigt, wodurch Forschungsfortschritte im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschrieben werden können.

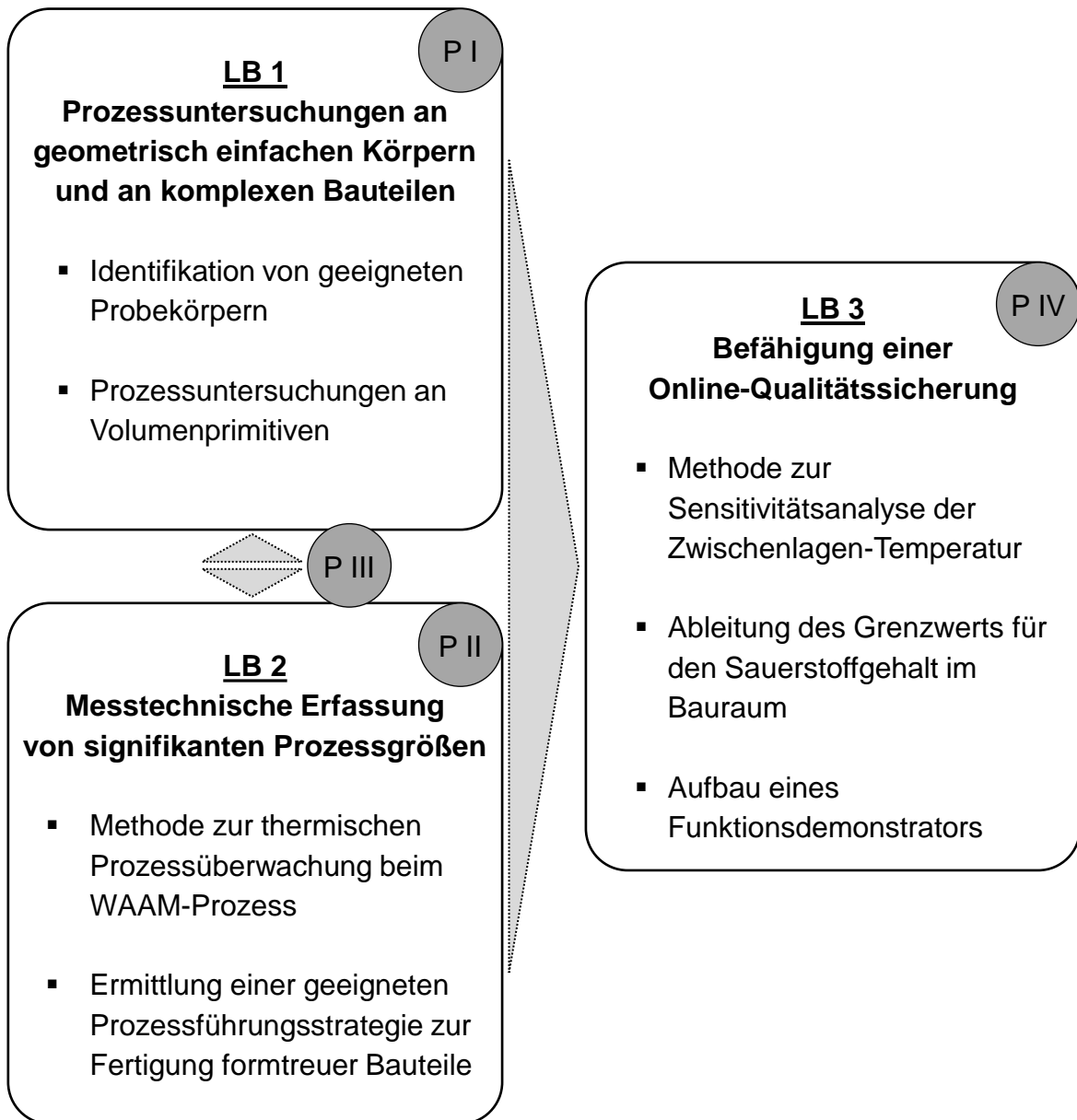


Abbildung 14: Einordnung der vier Publikationen P I bis P IV in die Übersicht der in Abschnitt 4.2 definierten Lösungsbausteine (in Anlehnung an BAIER ET AL. 2020)

4.4 Abgrenzung

In der vorliegenden Dissertation werden die folgenden inhaltlichen Themenschwerpunkte nicht betrachtet:

- Thermisch bedingte Eigenspannungen

Aufgrund des thermisch-basierten Fertigungsprozesses können beim WAAM weitere Bauteil-Defekte auftreten, u. a. thermisch bedingte Eigenspannungen, welche zu Bauteilverzügen führen können (DING ET AL. 2015A). Die Versuchsdurchführungen konzentrierten sich auf die gesamtheitliche Lagen- und Bauteilgeometrie. Aus diesem Grund können die Einflüsse von thermisch bedingten Eigenspannungen mit einer unbestimmten Signifikanz in die Geometrie-Untersuchungen einfließen. Die spezifischen UWZ zwischen thermisch bedingten Eigenspannungen und Bauteilverzügen wurden in Anbetracht der übergeordneten Zielsetzung der vorliegenden Dissertation nicht adressiert.

- Mechanische und mikrostrukturelle Bauteileigenschaften

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgeführten Prozessparameter und Prozessführungsstrategien beeinflussen neben den geometrischen Bauteileigenschaften auch die mechanischen und mikrostrukturellen Bauteileigenschaften (SEQUEIRA ALMEIDA 2012). Diese beiden Bauteileigenschaftsgruppen sind nicht Teil des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit, da der inhaltliche Schwerpunkt auf der Bauteilgeometrie liegt. Bauteile müssen neben den mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften zunächst geometrische Anforderungen erfüllen, bevor sie im konsekutiven Prozessschritt zerspannt werden können.

5 Forschungsergebnisse

5.1 Überblick

Gemäß dem wissenschaftlichen Vorgehen, das in Kapitel 4 erläutert wurde, werden in Kapitel 5 die wesentlichen forschungsrelevanten Ergebnisse aufgezeigt. Diese sind in vier Publikationen eingeflossen, welche im Rahmen dieser Dissertation zusammengefasst werden und den kumulativen Charakter dieser Dissertation ausmachen. In Abschnitt 5.2 wird zunächst in jede Publikation mit einer Kurzfassung eingeleitet, bevor die wissenschaftlichen Erkenntnisse dargelegt und die Autorinnen- und Autorenbeiträge erläutert werden. Eine Ergebnis-Bewertung in Bezug auf die in Abschnitt 4.2 genannte Zieldefinition wird in Abschnitt 5.3 diskutiert.

5.2 Zusammenfassung der wissenschaftlichen Publikationen

5.2.1 Publikation I: Der Weg zur Additiven Fertigung von qualitativ hochwertigen Teilen mit Draht und Lichtbogen¹⁸

Kurzfassung

In der ersten Publikation wurden das Vorgehen für die Fertigung von qualitativ hochwertigen Bauteilen beim WAAM und eine WAAM-Prozessüberwachung vorgestellt. Geeignete Probengeometrien mit einer bewusst geringen Anzahl an

¹⁸ englischer Originaltitel: *Towards Wire and Arc Additive Manufacturing of High-Quality Parts*

geometrischen Bauteilmerkmalen wurden für die experimentellen Prozessuntersuchungen definiert, um die Einflüsse geometrischer Bauteileigenschaften auf die Prozessstabilität zu reduzieren. Es galt, die Einflüsse der Aufbaustrategie, der Prozessparameter und der Bauteil-Temperatur auf die Prozessstabilität zu bestimmen. Als Aufbaustrategie hat sich gemäß der Literatur eine alternierende Prozessrichtung bewährt (siehe Abschnitt 3.2), an welche die Experimente anknüpften. Unter Anwendung dieser Aufbaustrategie beim CMT-basierten WAAM wurden mit geradlinigen Schweißraupen schmale Wandstrukturen aus Ti 6Al 4V hergestellt. Der Fokus lag auf der Untersuchung der geometrischen Merkmale Bauteil-Breite und -Höhe sowie deren jeweiliger Abhängigkeit von den Prozessparametern Drahtvorschub-Geschwindigkeit, Lichtbogenlängen-Korrekturfaktor und Prozess-Geschwindigkeit. Mit eingestellten Parameterkombinationen wurden Prozessfenster experimentell bestimmt und Regressionsanalysen durchgeführt. Die Bauteil-Temperatur wurde mithilfe eines thermografischen Linienscanners ermittelt, welcher die zuletzt erzeugte Lagen-Temperatur des Bauteils erfasste.

Im Vergleich zu anderen betrachteten Prozessparametern beeinflusst die Drahtvorschub-Geschwindigkeit die Lagen-Temperatur gemäß der Regressionsanalyse signifikant. Die Bauteil-Breite kann mit niedrigen Prozess-Geschwindigkeiten und hohen Drahtvorschub-Geschwindigkeiten maßgeblich erhöht werden. Die Bauteil-Höhe wird von der Drahtvorschub-Geschwindigkeit linear und von der Prozess-Geschwindigkeit annähernd quadratisch beeinflusst.

Wissenschaftliche Erkenntnisse

Die wichtigsten forschungsrelevanten Ergebnisse aus der Publikation von BAIER ET AL. (2020) können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es wurde ein Konzept für das CMT-basierte WAAM und den Einsatz von Ti 6Al 4V erarbeitet, welches für die Herstellung von endkonturnahen Bauteilen angewendet werden kann. Dieses Konzept ermöglicht es, Rückschlüsse auf die die Geometrie beeinflussenden Prozessparameter (bspw. die Drahtvorschub- und die Prozess-Geschwindigkeit) zu ziehen, indem Messdaten-Aufzeichnungen mit Prozessparametern korreliert werden.
- Erste Prozessuntersuchungen im Rahmen des Konzepts wurden bei Einsatz von Ti 6Al 4V erfolgreich durchgeführt. Folglich konnte beschrieben werden, dass der Einfluss des Lichtbogenlängen-Korrekturfaktors auf die Wand-Breite und -Höhe kleiner ist als der Einfluss der Drahtvorschub- oder der Prozess-Geschwindigkeit.

- Der thermografische Linienscanner zeigte Potenzial, die Bauteil-Temperaturen bei einfachen und geradlinigen Bauteil-Lagen während des WAAM-Prozesses zu überwachen.

Erläuterungen zur Autorenschaft

Daniel Baier war der Hauptverantwortliche für die Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente. Er initiierte die Ideenentwicklung für die Definition geeigneter Probekörper und die Prozessuntersuchungen für die Beschreibung der UWZ zwischen den Prozessparametern und den Bauteileigenschaften. Außerdem verfasste er die Publikation, welche mit den Co-Autoren diskutiert und von ihnen kommentiert wurde. Nach Abstimmung mit den Co-Autoren präsentierte Daniel Baier die Inhalte auf der „Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM 2020)“ an der ETH Zürich, Schweiz.

5.2.2 Publikation II: Zugrundeliegende Methodik für ein thermisches Prozessüberwachungssystem für die Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen¹⁹

Kurzfassung

In der zweiten Publikation, welche in dieser Dissertation integriert ist, konnte eine Methodik beschrieben werden, mit der ein thermisches Prozessüberwachungssystem für den WAAM-Einsatz befähigt werden kann. Es wurden methodische Einzelschritte definiert, welche eine Messung von Absolutwerten der Zwischenlagen-Temperaturen mithilfe einer Infrarot-Thermografie-Kamera ermöglichen. Eingangs wurden der Emissionskoeffizient ε der WAAM-Bauteiloberfläche aus Ti 6Al 4V und der Transmissionskoeffizient τ des verwendeten Schweiß-Schutzglases experimentell bestimmt.

Die erste Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Emissions- und des Transmissionskoeffizienten fand im Bauraum ohne den Einsatz eines aktiven Schweißprozesses statt. Somit konnten schweißbedingte Einflussgrößen²⁰ auf das

¹⁹ englischer Originaltitel: *Underlying Methodology for a Thermal Process Monitoring System for Wire and Arc Additive Manufacturing*

²⁰ Diese können bspw. Schmauch oder Schutzgas sein.

thermografische Messsignal ausgeschlossen werden. Für die Erfassung der Oberflächen-Temperaturen wurde eine Infrarot-Thermografie-Kamera am Versuchstand mit definiertem Abstand und Winkel zur Oberfläche implementiert. Für die Temperaturmessung wurde ein „Bereich von Interesse“ (von engl. *region of interest*, kurz ROI) auf der Bauteiloberfläche definiert. Thermoelemente wurden für eine Vergleichsmessung auf der gleichen Bauteiloberfläche positioniert. Damit konnten die Oberflächen-Temperatur-Messsignale der Kamera mit den Temperatur-Messsignalen der Thermoelemente verglichen werden. Durch die Bestimmung bzw. die Adaption der Emissions- und Transmissionskoeffizienten mithilfe der Kamera-Software konnten beide Temperatur-Messsignale einander angeglichen werden.

Die zweite Versuchsdurchführung wurde in einem aktiven WAAM-Prozess umgesetzt. Dadurch konnte der Einfluss von schweißbedingtem Schmauch und der Einfluss des Schutzgases auf das Kamera-Messsignal qualifiziert und quantifiziert werden.

Eine Validierung der Methodik fand durch die Verschiebung der zuvor definierten ROI-Position an die Schweiß-Startposition einer Lage statt, um die Messgenauigkeit entlang einer Lage zu demonstrieren.

Zuletzt wurde die Methodik für die simultane Erfassung mehrerer Oberflächen-Temperaturen entlang einer Bauteil-Lage angewendet. Dabei wurden drei individuelle ROI gleichmäßig auf der Bauteiloberfläche verteilt, sodass anhand der individuellen Abkühlraten ein Wärmestau entlang einer Bauteil-Lage festgestellt werden konnte.

Wissenschaftliche Erkenntnisse

Anhand der Publikation von BAIER ET AL. (2023A) können folgende wissenschaftliche Erkenntnisse hervorgehoben werden:

- Der Emissions- und der Transmissionskoeffizient müssen für eine Messung der Oberflächen-Temperatur für den Einsatz beim WAAM kalibriert werden.
- Während des WAAM-Prozesses beeinflussen Schweißnebenprodukte wie Schmauch oder Gase das thermografische Signal. Dieser Einfluss kann durch eine Kalibrierung der Messsignale kompensiert werden.

- Im Anschluss an die Messsignal-Kalibrierung erlaubte der in den Experimenten eingesetzte Versuchsaufbau eine robuste Messung der Oberflächen-Temperaturen an verschiedenen Positionen entlang einer Bauteil-Lage.
- Entlang einer Bauteil-Lage konnte ein Wärmestau aufgrund verschiedener Abkühleigenschaften nachgewiesen werden.

Erläuterungen zur Autorenschaft

Daniel Baier war für die Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente hauptverantwortlich. Er entwickelte die Idee, eine Methodik für ein thermisches Prozessüberwachungssystem zu definieren. Zudem leitete er die Prozessuntersuchungen, welche den Aufbau, die Kalibrierung, die Validierung sowie die Übertragung auf einen Anwendungsfall beinhalteten. Er überwachte die experimentellen Versuchsdurchführungen, welche gemeinsam mit den beiden studentischen Hilfskräften Tobias Weckenmann und Franz Wolf stattfanden. Daniel Baier verfasste hauptverantwortlich die Publikation. Alle Ergebnisse wurden von den Co-Autoren kommentiert und mit ihnen diskutiert.

5.2.3 Publikation III: Thermische Prozessüberwachung und -steuerung für eine endkonturnahe Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen²¹

Kurzfassung

Die UWZ zwischen verschiedenen Zwischenlagen-Temperaturen und verschiedenen -Wartezeiten wurden u. a. in der dritten Publikation präsentiert. Daran anschließend konnte ein geeignetes Temperaturmanagement durch den Einsatz einer Infrarot-Thermografie-Kamera beschrieben werden. Der quantitative Einfluss von verschiedenen Zwischenlagen-Wartezeiten auf verschiedene -Temperaturen wurde wechselseitig analysiert. Außerdem konnten die individuellen Einflüsse der Zwischenlagen-Wartezeit und der -Temperatur auf die geometrischen Bauteil-Qualitätsmerkmale untersucht werden. Die Qualitätsmerkmale wurden in grundlegende geometrische Bauteildimensionen und geometrische Bauteilabweichungen unterteilt. Zu den Dimensionen zählten die gefertigte Wand-Länge,

²¹ englischer Originaltitel: *Thermal process monitoring and control for a near-net-shape Wire and Arc Additive Manufacturing*

die -Breite und die -Höhe. Die Bauteilabweichungen wurden u. a. durch die Oberflächen-Welligkeit beschrieben. Die breiten Wände wurden der alternierenden Aufbaustrategie folgend mit gependelten Schweißraupen gefertigt.

Damit die Temperatur im Bauteil während des Fertigungsprozesses konstant gehalten werden konnte, musste bei der Verwendung von Ti 6Al 4V entweder eine geringe Zwischenlagen-Wartezeit oder eine hohe Zwischenlagen-Temperatur eingesetzt werden. Durch die Verarbeitung von Ti 6Al 4V beim CMT-basierten WAAM-Prozess konnte gezeigt werden, dass die Zwischenlagen-Temperatur für eine reproduzierbare Fertigung von Wandgeometrien überwacht und gesteuert werden muss. Indem geringe Zwischenlagen-Wartezeiten oder hohe Zwischenlagen-Temperaturen eingestellt wurden, ergab sich erst in den höheren Bauteil-Lagen ein thermisches Bauteil-Gleichgewicht aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Bauteil-Werkstoffs. Bei einer Zwischenlagen-Temperatur von 300 °C konnte eine höhere Formtreue der Wanddimensionen mit geringeren geometrischen Abweichungen erzielt werden als bei den Zwischenlagen-Temperaturen 50 °C und 550 °C. Außerdem führte eine Zwischenlagen-Temperatur von 300 °C zu einer hohen Prozessstabilität, da bei dieser keine schweißbedingten Spritzer und keine variierenden Lichtbogen-Eigenschaften auftraten.

Wissenschaftliche Erkenntnisse

Die experimentellen Prozessuntersuchungen von BAIER ET AL. (2022) führten zu Schlussfolgerungen, welche wie folgt zusammengefasst werden können:

- Bereits bei einer kleinen Bauteil-Größe ergeben sich bei der Verwendung von niedrigen Zwischenlagen-Temperaturen sehr lange Zwischenlagen-Wartezeiten.
- Konstant eingestellte Zwischenlagen-Wartezeiten führen bei dem verwendeten Werkstoff vermehrt zu geometrischen Abweichungen bezüglich der gesamten Bauteil-Breite und -Höhe.
- Die Bauteil-Gesamthöhe kann durch konstant eingestellte Zwischenlagen-Temperaturen stärker beeinflusst werden als durch konstant eingestellte Wartezeiten.
- Weder die Zwischenlagen-Wartezeit noch die Zwischenlagen-Temperatur haben einen signifikanten Einfluss auf die Bauteil-Oberflächen-Welligkeit.

Erläuterungen zur Autorenschaft

Daniel Baier war Hauptverantwortlicher für die Planung, Durchführung und Auswertung der experimentellen Untersuchungen. Die Idee für die Ermittlung der UWZ zwischen den beiden Prozessparametern Zwischenlagen-Temperatur und -Wartezeit und die Ermittlung der individuellen Einflüsse beider Prozessparameter auf die geometrischen Bauteileigenschaften wurden von ihm initiiert. Die Experimente wurden gemeinsam mit den studentischen Hilfskräften Franz Wolf und Tobias Weckenmann umgesetzt und von Daniel Baier überwacht. Daniel Baier verfasste hauptverantwortlich die Publikation, welche gemeinsam mit den Co-Autorinnen und -Autoren diskutiert und von ihnen kommentiert wurde.

5.2.4 Publikation IV: Ansatz für ein Qualitätssicherungssystem für die Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen²²

Kurzfassung

Auf der Basis der vorangegangenen Publikationen lag der Fokus der vierten Publikation auf der Identifikation von geeigneten Limitationen der Zwischenlagen-Temperatur und des Sauerstoffgehalts im Bauraum. In der Publikation III konnten u. a. die Einflüsse der Zwischenlagen-Temperatur auf die gesamte Wandgeometrie quantifiziert werden. Im ersten Teil der Publikation IV lag das Augenmerk auf der Untersuchung einzelner Bauteil-Lagen und nicht auf der Analyse der gesamtlichen Bauteilgeometrie. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse der individuellen Lagen-Breiten konnte der Einfluss einer variierenden Zwischenlagen-Temperatur, welche aufgrund von unerwarteten Anlagen-Stillständen auftreten kann, untersucht werden.

Für den zweiten Teil der Publikation IV wurden unterschiedlich große Wände mit verschiedenen Sauerstoffgehalten im Bauraum hergestellt. Es folgten eine qualitative und eine quantitative Interpretation der oxidationsbedingten Anlauffarben der Bauteiloberfläche in Abhängigkeit von der Bauteil-Größe und vom Sauerstoffgehalt. Für die qualitative bzw. visuelle Analyse wurden die Anlauffarben tabellarisch dargestellt und die Farbunterschiede beschrieben. Im Rahmen der quantitativen Analyse wurde eine Methode vorgestellt, mit der Bildaufnahmen der

²² englischer Originaltitel: *Approach towards a Quality Assurance System for Wire and Arc Additive Manufacturing*

Bauteiloberflächen angefertigt und digital verarbeitet werden können. Die einzelnen Farbwerte der Bauteilaufnahmen wurden in Histogrammen und Flächen-Diagrammen in Abhängigkeit von der Bauteil-Größe und vom Sauerstoffgehalt dargestellt.

Mit den Ergebnissen des ersten Publikationsteils konnte gezeigt werden, dass verschiedene Lagen-Breiten gezielt durch das systematische Variieren der Zwischenlagen-Temperaturen eingestellt werden können. Dabei wurde mithilfe eines Regressionsmodells ein kubischer Zusammenhang beschrieben.

Im Rahmen des zweiten Publikationsteils konnte nachgewiesen werden, dass der Sauerstoffgehalt im Bauraum und die Bauteil-Größe die oxidationsbedingten Anlauffarben der Bauteiloberflächen signifikant beeinflussen. Infolge der qualitativen Bewertung ergab die quantitative Auswertung, dass Bauteile mit entstandenen Anlauffarben deutlich höhere einzelne Spektral-Farbwerte im Rot-Grün-Blau-Farbraum aufweisen als Bauteile ohne Anlauffarben. Dieser Zusammenhang kann folglich genutzt werden, um Bauteile mit Anlauffarben mithilfe einer automatisierten Spektral-Farbwert-Analyse zu erkennen.

Wissenschaftliche Erkenntnisse

Aus der Publikation von BAIER ET AL. (2023B) können die folgenden forschungsrelevanten Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Während des WAAM-Prozesses werden die Bauteil-Lagen in ihrer Breite stärker von höheren Zwischenlagen-Temperaturen beeinflusst als von niedrigeren Zwischenlagen-Temperaturen.
- Die Bauteil-Lage kann im Zwischenlagen-Temperaturbereich von 200 °C bis 450 °C um bis zu 0,01 mm/K in ihrer Breite variiert werden.
- Die Entstehung von oxidationsbedingten Anlauffarben auf der Bauteiloberfläche wird durch die Bauteil-Größe und durch den Sauerstoffgehalt im Bauraum signifikant beeinflusst.
- Oxidationsbedingte Anlauffarben der Bauteiloberflächen können durch eine quantitative Interpretation der Spektral-Farbwerte erkannt werden.

Erläuterungen zur Autorenschaft

Daniel Baier leitete als Hauptverantwortlicher die Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente. Er arbeitete die Idee für die Prozessuntersuchungen,

welche die Sensitivitätsanalyse der Zwischenlagen-Temperatur und die Ableitung der Grenzwerte für den Sauerstoffgehalt im Bauraum beinhalteten, aus. Er überwachte die Experimente, welche gemeinsam mit der studentischen Hilfskraft Tobias Weckenmann durchgeführt wurden. Daniel Baier war für die Ausarbeitung der Publikation hauptverantwortlich. In gemeinsamen Absprachen mit den Co-Autoren wurden alle Ergebnisse diskutiert und diese von ihnen kommentiert.

5.3 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die in der Dissertation vorgestellten vier Publikationen diskutiert und mit der einschlägigen Fachliteratur in Verbindung gesetzt. In der vorliegenden Arbeit wurde das übergeordnete Ziel verfolgt, eine qualifizierte, reproduzierbare und formtreue Additive Fertigung geometrisch komplexer Bauteile aus Ti 6Al 4V mittels WAAM zu realisieren und eine Online-Qualitätssicherung zu befähigen. Die wesentlichen Forschungsfortschritte (FFS) können wie folgt beschrieben, dem Stand der Wissenschaft und Forschung gegenübergestellt und den in Abschnitt 4.2 dargelegten Lösungsbausteinen und Forschungsfragen zugeordnet werden:

FFS 1: Im Rahmen der Experimente, die in der ersten (P I) und der dritten (P III) Publikation vorgestellt wurden, konnten einfache und komplexe Wandgeometrien gemäß einer bidirektionalen Aufbaustrategie gefertigt und analysiert werden. Die Inhalte beider Publikationen können dem LB 1 zugeordnet werden (vgl. Abschnitt 4.3). Vorarbeiten, die in der Literatur geschildert werden, zeigen, dass für diverse metallische Werkstoffe und WAAM-Schweißverfahren verschiedene Aufbaustrategien angewendet werden können, um Wandgeometrien zu fertigen (vgl. Abschnitt 3.2). WU ET AL. (2017) beobachteten die Einflüsse von Bauteil-Temperaturen auf die Prozessstabilität. Die Autoren stellten zudem geometrische Bauteilabweichungen bei schmalen Wänden entlang der Aufbaurichtung fest, wenn sich die Bauteil-Temperaturen ändern. Grundlegende UWZ zwischen der Zwischenlagen-Temperatur und den geometrischen Bauteileigenschaften konnten außerdem von GENG ET AL. (2017) nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 3.2). Die in der Publikation I vorgestellten Experimente lassen eine Übertragung der Erkenntnisse auf den CMT-basierten WAAM-Prozess zu. Eine weitere Übertragung erfolgte auf breite Wände im Rahmen der

Publikation III, in welcher eine einzuhaltende absolute Zwischenlagen-Temperatur definiert werden konnte, um die Prozessstabilität aufrechtzuerhalten und eine gleichmäßige Bauteilgeometrie zu erzeugen. Mit den Ergebnissen aus den beiden Publikationen kann die FF 1 beantwortet werden.

FFS 2: Mit den Inhalten der zweiten Publikation wurde die reproduzierbare Bauteilfertigung und deren Abhängigkeit von der Bauteil-Temperatur adressiert. Diese Forschungsinhalte knüpfen an die in den Abschnitten 3.4 und 3.5 vorgestellten Arbeiten zum Thema der thermischen Prozessüberwachung an. XU ET AL. (2018) und XIA ET AL. (2020) stellten Konzepte für eine thermische Prozessüberwachung vor, welche im Rahmen von Experimenten umgesetzt wurden. In der Literatur werden verschiedene thermische Messinstrumente (bspw. Infrarot-Pyrometrie oder Infrarot-Thermografie) aufgeführt, die mit verschiedenen Vorgehensweisen kalibriert wurden. Die Inhalte der zweiten Publikation (P II) richten sich thematisch an den LB 2. Diese Veröffentlichung beinhaltet eine Methodik für zuverlässige Temperaturmessungen an Bauteiloberflächen bei der Herstellung von Bauteilen aus Ti 6Al 4V unter der Verwendung des CMT-basierten Schweißens. Eine Ermittlung und eine Quantifizierung von Einflussgrößen für die Befähigung der thermografischen Messmethode fanden durch den Abgleich der Infrarot-Thermografie-Signale mit den Signalen von Thermoelementen statt. Der Funktionsnachweis des Messprinzips für die reproduzierbare Erfassung der Zwischenlagen-Temperaturen wurde mithilfe einer Infrarot-Thermografie-Kamera erbracht. Die Zwischenlagen-Temperatur konnte als relevante Prozessgröße sowohl identifiziert als auch methodisch und messtechnisch in Absolutwerten erfasst werden. Wie in FFS 1 beschrieben, wurde mit der Publikation III die thermisch begründete Prozessführungsstrategie für eine Fertigung formtreuer Bauteile adressiert. Die Inhalte der beiden Publikationen II und III werden für die Beantwortung der FF 2 herangezogen.

FFS 3: In der Publikation IV dieser Dissertation wurden wissenschaftliche Herangehensweisen aufgezeigt, um die Grenzwerte der zu überwachenden Zwischenlagen-Temperatur und des Sauerstoffgehalts im Bauraum während des WAAM-Prozesses zu ermitteln. Auf dieser Grundlage konnte ein Funktionsdemonstrator aufgebaut und in Betrieb

genommen werden, welcher als Online-Qualitätssicherungssystem dient. Diese Publikation kann in den LB 3 eingeordnet werden. In den Abschnitten 3.4 und 3.5 wurden Methoden für den Einsatz von Qualitätssicherungssystemen dargelegt, welche es erlauben, die Bauteil-Temperaturen thermisch basiert zu überwachen und zu kontrollieren. YANG ET AL. (2017) implementierten eine Infrarot-Thermografie-Kamera an einem WAAM-Versuchsaufbau, welche die Erfassung von Bauteil-Temperaturen ermöglichte. In der Publikation IV wurde zunächst eine Methode zur Sensitivitätsanalyse der Zwischenlagen-Temperatur vorgestellt. Es folgte eine Quantifizierung des Einflusses der Zwischenlagen-Temperatur auf individuelle Bauteillagen. Des Weiteren wurden in den Abschnitten 3.4 und 3.5 Methoden für die potentiometrische Ermittlung des Sauerstoffgehalts im Bauraum vorgestellt und die Einflüsse verschiedener Sauerstoffgehalte auf den Bauteil-Oxidationsgrad beschrieben. CABALLERO ET AL. (2019) untersuchten bei der Verarbeitung von Ti 6Al 4V den Sauerstoffgehalt im Bauraum. Die Autoren korrelierten die oxidationsbedingten Anlauffarben mit den Sauerstoffgehalten. Im Rahmen der vierten Publikation wurde an die Vorarbeiten angeknüpft und die Einflüsse verschiedener Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Bauteil-Größe auf den Oxidationsgrad der Bauteiloberfläche wurden untersucht. Dabei konnte eine Methodik zur quantitativen Auswertung erarbeitet werden. Daraufhin konnte in den Ergebnissen festgestellt werden, dass während des WAAM-Prozesses verschiedene Grenzwerte der Sauerstoffgehalte in der Inertgas-Atmosphäre für verschiedene Bauteil-Größen berücksichtigt werden müssen. Mit den Ergebnissen aus der vierten Publikation kann die FF 3 beantwortet werden.

Aus den drei FFS lässt sich das folgende Resümee ableiten:

- Die in der Literatur genannten Aufbaustrategien, die Prozessparameter mit Einfluss auf die Prozessstabilität und die grundlegenden UWZ zwischen der Zwischenlagen-Temperatur und den geometrischen Bauteileigenschaften können von anderen verwandten Verfahren auf den CMT-basierten WAAM-Prozess übertragen werden.
- Es ist möglich, Temperaturen an Bauteiloberflächen bei der Herstellung von Bauteilen aus Ti 6Al 4V unter der Verwendung des CMT-basierten Schweißens zuverlässig zu messen. Für diese Messung ist es notwendig, die Einflussgrößen auf das thermografische Messsignal zu ermitteln, indem

u. a. die Infrarot-Thermografie-Signale mit den Signalen von Thermoelementen verglichen werden.

- Eine konstante Zwischenlagen-Temperatur kann zu einer gleichbleibenden Prozessstabilität und zu einer gleichmäßigen Bauteilgeometrie führen. Dabei können eine Methode zur Sensitivitätsanalyse der Zwischenlagen-Temperatur und die Quantifizierung des Einflusses der Zwischenlagen-Temperatur auf individuelle Bauteil-Lagen helfen, eine geeignete absolute Zwischenlagen-Temperatur zu definieren.
- Verschiedene Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Bauteil-Größe führen zu unterschiedlichen Bauteil-Oxidationsgraden. Aus diesem Grund sollten verschiedene Grenzwerte der Sauerstoffgehalte in der Inertgas-Atmosphäre für unterschiedliche Bauteil-Größen definiert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der von der Europäischen Kommission beschlossene „Europäische Grüne Deal“ stellt ein Konzept dar, anhand dessen die Mitgliedstaaten der Europäischen Union klimaneutral werden sollen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2019). Das Ziel ist es, ab 2050 Emissionen von Netto-Treibhausgasen in der EU gänzlich zu vermeiden. 2018 ließen sich im Transport- und Verkehrssektor rund 16 % der europaweiten Treibhausgas-Emissionen der Luftfahrt zuordnen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2021). Ein Schritt in Richtung einer Klimaneutralität kann durch den Einsatz von Leichtbau-Komponenten umgesetzt werden. Dies würde zu einer erheblichen Emissionseinsparung führen. Leichtbau-Komponenten können mithilfe des WAAM-Prozesses hergestellt werden. Aktuelle Herausforderungen beim WAAM sind die zu erfüllenden Prozess- und Bauteilanforderungen für die Anwendungen in der Luftfahrttechnik. Um die anwendungsbezogenen Qualitätsanforderungen zu erfüllen, müssen Bauteile reproduzierbar, mit hohen Prozessstabilitäten und mit einer lückenlosen Prozessdokumentation hergestellt werden.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, eine qualifizierte, reproduzierbare und formtreue Additive Fertigung geometrisch komplexer Bauteile aus Ti 6Al 4V mittels WAAM umzusetzen und eine Online-Qualitätssicherung zu realisieren. Dabei wurden zum einen geometrische Bauteileigenschaften analysiert, welche während des WAAM-Prozesses von diversen Prozessgrößen beeinflusst werden. Grundsätzlich muss das mittels WAAM hergestellte Bauteil eine geometrische Mindest-Formtreue aufweisen, um im konsekutiven Zerspanungsvorgang wirtschaftlich bearbeitet werden zu können. Zum anderen wurden Ursachen für prozess- bzw. oxidationsbedingte Anlauffarben der Bauteiloberflächen qualitativ und quantitativ untersucht. Bei der Anwendung des WAAM-Prozesses in der Luftfahrttechnik sind oxidationsbedingte Anlauffarben auf den gefertigten Bauteiloberflächen zu vermeiden.

Mitunter wurden in LB 1 Prozessuntersuchungen an definierten und unterschiedlichen Volumenprimitiven durchgeführt, um die UWZ zwischen den individuellen Prozessparametern und den geometrischen Bauteileigenschaften zu beschreiben.

Die signifikanten Erkenntnisse, die im LB 1 erarbeitet wurden, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im Rahmen der Prozessuntersuchungen hat der Lichtbogenlängen-Korrekturfaktor einen weniger signifikanten Einfluss auf die Wandgeometrie als die Prozessparameter Drahtvorschub- und Prozess-Geschwindigkeit.
- Die gesamte Bauteil-Höhe wird durch den Einsatz konstant eingestellter Zwischenlagen-Temperaturen stärker beeinflusst als durch konstant eingestellte Zwischenlagen-Wartezeiten.
- Der Einsatz von konstant eingestellten Zwischenlagen-Wartezeiten führt zu deutlichen geometrischen Bauteilabweichungen.
- Weder die Zwischenlagen-Wartezeit noch die Zwischenlagen-Temperatur weisen einen wesentlichen Einfluss auf die Bauteil-Oberflächen-Welligkeit auf.

Darüber hinaus konnten signifikante Prozessgrößen (bspw. die Zwischenlagen-Temperatur) in LB 2 messtechnisch erfasst werden. Dabei war es möglich, eine Methodik zur thermischen Prozessüberwachung beim WAAM-Prozess zu entwickeln. Zu den Bestandteilen der Methodik zählen sowohl die Analyse des WAAM-Prozesses als auch die Formulierung der resultierenden Restriktionen für den Einsatz eines thermografischen Überwachungssystems. Gemäß der Methodik wurde ein thermografischer Versuchsaufbau für die Bestimmung der Emissions- und Transmissionskoeffizienten in Betrieb genommen. Indem einzelne ROI für die Erfassung der Zwischenlagen-Temperatur an bestimmten Bauteilpositionen platziert wurden, gelang es, eine geeignete Prozessführungsstrategie zur Fertigung von formtreuen Bauteilen zu definieren.

Die signifikanten Erkenntnisse aus LB 2 lassen sich wie folgt formulieren:

- Eine robuste Messung der Zwischenlagen-Temperatur in Form von Absolut-Messwerten kann durch das vorgestellte Messvorgehen im Rahmen von Kalibrierungs-Experimenten befähigt werden.
- Für das Einhalten einer konstanten und niedrigen Zwischenlagen-Temperatur müssen bei kleinen Wandgeometrien aus Ti 6Al 4V hohe Zwischenlagen-Wartezeiten eingesetzt werden.
- Mithilfe einer Signal-Kalibrierung kann der Einfluss von Schweißnebenprodukten, die während des WAAM-Prozesses entstehen, auf das thermografische Messsignal ermittelt und reduziert werden.

In LB 3 wurde ein Funktionsdemonstrator einer Online-Qualitätssicherung befähigt, mit welchem signifikante Prozessgrößen rückverfolgbar analysiert werden können. Zu Beginn wurde in LB 3 eine Methode zur Sensitivitätsanalyse der Zwischenlagen-Temperatur definiert, welche an die Ergebnisse aus LB 1 und LB 2 anknüpfte. Ein geeigneter vollfaktorieller Versuchsplan für die Experimente gemäß Abschnitt 5.2.4 wurde an der WAAM-Forschungsanlage abgearbeitet, sodass der quantitative Einfluss der Zwischenlagen-Temperatur auf die Lagen-Breite untersucht werden konnte. Außerdem wurden oxidationsbedingte Anlauffarben der Bauteiloberfläche beim WAAM-Prozess analysiert. Hierzu wurden Bauteile in diversen Größen in Abhängigkeit von verschiedenen Sauerstoffgehalten im Bauraum hergestellt. Dabei erfolgten eine qualitative und eine quantitative Beschreibung der UWZ.

Im Folgenden werden die signifikanten Erkenntnisse aus LB 3 zusammengefasst:

- Eine Sensitivitätsanalyse erlaubt die quantitative Ermittlung des Einflusses der Zwischenlagen-Temperatur auf individuelle Lagen-Breiten.
- Während des WAAM-Prozesses kann die Lagen-Breite mit einer höheren Zwischenlagen-Temperatur stärker variiert werden als mit einer niedrigeren Zwischenlagen-Temperatur.
- Oxidationsbedingte Anlauffarben auf der Bauteiloberfläche werden vom Sauerstoffgehalt im Bauraum und von der Bauteil-Größe beeinflusst.

Über den Stand der Wissenschaft und Forschung hinaus zeigen die Ergebnisse, dass ein weiterer Schritt in Richtung einer Qualifizierung des WAAM-Prozesses für die Luftfahrttechnik unter Einsatz von Ti 6Al 4V mit diesen Forschungsarbeiten unternommen wurde. Folgende anknüpfende Forschungsschwerpunkte können unter Berücksichtigung der erarbeiteten Forschungsergebnisse und in Kombination mit Auszügen aus der Literatur nachvollziehbar abgeleitet werden:

- Die Prozessstabilität sollte verbessert werden. Im Rahmen der Publikation II konnten Temperaturgradienten entlang einer Bauteil-Lage identifiziert und quantifiziert werden. In der dritten Publikation konnten keine Einflüsse von entstehenden Temperaturgradienten entlang einer Bauteil-Lage auf die Lagengeometrie festgestellt werden. Die Erkenntnisse aus den grundlegenden Prozessuntersuchungen können nur begrenzt auf verschiedene Bauteil-

Größen übertragen werden. Weitere Untersuchungen mit größeren Bauteilen, die zudem weitere Geometrie-Merkmale, wie z. B. Stoß-Geometrien²³, besitzen, könnten die Übertragbarkeit der Ergebnisse überprüfen und verbessern helfen. Aufbaustrategien für Stoß-Geometrien wurden von VENTURINI ET AL. (2016) vorgestellt, die in der Anwendung zu verschiedenen Prozessstabilitäten führten. Diese Studien sollten zum einen um Analysen von Bauteil-Temperaturen erweitert und zum anderen um Untersuchungen an diversen Bauteil-Größen ergänzt werden.

- Ausgehend von den vorgestellten Prozessüberwachungsmethoden sollte der WAAM-Prozess um eine automatisierte Prozessregelung erweitert werden. XIONG ET AL. (2021) befähigten eine automatisierte Bauteil-Höhenregelung auf der Basis optischer Sensoren, mit welchen die Bauteil-Höhe während des WAAM-Prozesses erfasst werden kann. Mithilfe eines Bildverarbeitungsalgorithmus können geometrische Merkmale ausgewertet und Signale für die Regelung der Drahtvorschub-Geschwindigkeit an die Schweiß-Stromquelle übertragen werden. Sowohl thermografische als auch potentiometrische Daten können in Kombination mit weiteren Informationen zu diversen Bauteilgeometrien in die regelungsbasierten Ansätze künftiger Arbeiten eingebunden werden.
- Die im WAAM-Prozess aufgezeichneten Sensordaten können u. a. für Ansätze von Methoden des Maschinellen Lernens verwendet werden. Dies kann für eine Optimierung der Prozessparameter oder der Aufbaustrategie hinsichtlich der Prozessstabilität und entstehender Bauteil-Temperaturen hilfreich sein. In Studien wurden mithilfe von genetischen Algorithmen bereits die Optimierung und die Vorhersage der Bauteil-Oberflächen-Eigenschaften in Abhängigkeit von der Drahtvorschub- oder der Prozess-Geschwindigkeit untersucht (XIA ET AL. 2022; LI ET AL. 2022). Dem Einsatz von maschinellen Lernmethoden sollte sich in künftigen Forschungsarbeiten umfangreicher gewidmet werden.
- Umfangreichere Studien zu der Bauteil-Oxidation in Verbindung mit numerischen Modellierungen sollten Teil künftiger Arbeiten sein. Die Prozessparameter und die Aufbaustrategien beim WAAM-Prozess führen zu thermisch-basierten Eigenspannungen und beeinflussen zudem sowohl die

²³ Eine Stoß-Geometrie (auch Schweißstoß genannt) wird durch die Anordnung einzelner Bauteil-Bereiche eines Bauteils beschrieben, die miteinander verbunden sind. Ein Beispiel für eine Stoß-Geometrie ist ein T-Stoß, bei dem Wände annähernd rechtwinklig (T-förmig) aufeinanderstoßen. (DIN EN ISO 17659)

mechanischen als auch die mikrostrukturellen Bauteileigenschaften. Simulative Ansätze für UWZ-Ermittlungen konnten bereits in der Literatur bspw. mithilfe von Finite-Elemente-Methoden gezeigt werden (ISRAR ET AL. 2020). Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen konnten CABALLERO ET AL. (2019) Einflüsse von Bauteil-Oxidationsgraden auf die mechanischen Eigenschaften nachweisen.

- Die bisherigen Studien zum Aufbau einer übergeordneten Prozesskette für den qualifizierten Einsatz in der Luftfahrttechnik sollten um weitere Studien erweitert werden. Die endkonturnahen WAAM-Bauteile müssen für einen konsekutiven Zerspanungsprozess reproduzierbare und formtreue Oberflächen aufweisen. FUCHS ET AL. (2020) erzielten eine hohe Oberflächenqualität der Bauteil-Endkontur durch das Zerspanen von 125 % der maximalen Oberflächen-Welligkeit des ursprünglich gefertigten WAAM-Bauteils. Diese Untersuchungen könnten künftig um Stoß-Geometrien erweitert werden, da Bauteilbereiche in der Stoß-Nähe innen liegende Bauteil-Defekte wie Poren oder unzureichende Schweißverbindungen beinhalten können (VENTURINI ET AL. 2016).

Die vorliegende Dissertation repräsentiert einen maßgeblichen Schritt in Richtung einer Qualifizierung des WAAM-Prozesses zur reproduzierbaren Fertigung von formtreuen Bauteilen aus Ti 6Al 4V. Die dargelegten wissenschaftlichen Ansätze und Erkenntnisse eröffnen vielversprechende anknüpfende Forschungsschwerpunkte. Damit tragen die Forschungsinhalte dieser Arbeit dazu bei, additive Fertigungstechnologien weiter zu fördern.

7 Literaturverzeichnis²⁴

ADAM ET AL. 2009

Adam, G.; Lauger, P.; Stark, G.: Physikalische Chemie und Biophysik. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2009. ISBN: 978-3-642-00424-7.

AHLERS 1997

Ahlers, Horst (Hrsg.): Multisensorikpraxis. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997. ISBN: 978-3-642-60348-8.

AL-BERMANI ET AL. 2010

Al-Bermani, S. S.; Blackmore, M. L.; Zhang, W.; Todd, I.: The Origin of Microstructural Diversity, Texture, and Mechanical Properties in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A 41 (2010) 13, S. 3422–3434.

ALLEN 2006

Allen, J.: An investigation into the comparative costs of additive manufacturing vs. machine from solid for aero engine parts. Cost Effective Manufacturing via Net-Shape Processing (2006) 137, S. 1–10.

AMERICAN WELDING SOCIETY 2014

American Welding Society: Guide for the fusion welding of titanium and titanium alloys. Miami: World Engineering Xchange, 2014. ISBN: 978-0-87171-848-8.

ARTAZA ET AL. 2017

Artaza, T.; Alberdi, A.; Murua, M.; Gorrotxategi, J.; Frías, J.; Puertas, G.; Melchor, M. A.; Mugica, D.; Suárez, A.: Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine. Procedia Manufacturing 13 (2017), S. 778–785.

²⁴ Wo immer Angaben zu Jahrgang oder Nummer nicht vorhanden sind, existieren diese nicht oder waren durch den Verfasser dieser Dissertation nicht ermittelbar.

ARTAZA ET AL. 2020

Artaza, T.; Suárez, A.; Veiga, F.; Braceras, I.; Tabernero, I.; Larrañaga, O.; Lamikiz, A.: Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres. *Journal of Materials Research and Technology* 9 (2020) 6, S. 15454–15466.

AYARKWA ET AL. 2015

Ayarkwa, K. F.; Williams, S.; Ding, J.: Investigation of pulse advance cold metal transfer on aluminium wire arc additive manufacturing. *International Journal of Rapid Manufacturing* 5 (2015) 1, S. 44.

BAGAVATHIAPPAN ET AL. 2013

Bagavathiappan, S.; Lahiri, B. B.; Saravanan, T.; Philip, J.; Jayakumar, T.: Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology* 60 (2013), S. 35–55.

BAIER ET AL. 2020

Baier, D.; Bachmann, A.; Zaeh, M. F.: Towards Wire and Arc Additive Manufacturing of High-Quality Parts. *Procedia CIRP* 95 (2020), S. 54–59.

BAIER ET AL. 2022

Baier, D.; Wolf, F.; Weckenmann, T.; Lehmann, M.; Zaeh, M. F.: Thermal process monitoring and control for a near-net-shape Wire and Arc Additive Manufacturing. *Production Engineering* 16 (2022), S. 811–822.

BAIER ET AL. 2023A

Baier, D.; Weckenmann, T.; Wolf, F.; Wimmer, A.; Zaeh, M. F.: Underlying Methodology for a Thermal Process Monitoring System for Wire and Arc Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 7 (2023) 1, S. 10.

BAIER ET AL. 2023B

Baier, D.; Weckenmann, T.; Baehr, S.; Zaeh, M. F.: Approach towards a Quality Assurance System for Wire and Arc Additive Manufacturing. *Processes* 11 (2023) 2, S. 612.

BAKER 1920

SCHUTZRECHT US1533300A (14.04.1925). Westinghouse Electric & Manufacturing Company Pr.: 423647, 1920. Baker, R.: Method of making decorative articles.

BAUCH & ROSENKRANZ 2017

Bauch, J.; Rosenkranz, R.: *Physikalische Werkstoffdiagnostik. Ein Kompendium wichtiger Analytikmethoden für Ingenieure und Physiker.* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-53952-1.

BAUFELD ET AL. 2010

Baufeld, B.; van der Biest, O.; Gault, R.: Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials & Design* 31 (2010), S. 106–111.

BAUFELD ET AL. 2011

Baufeld, B.; Brandl, E.; van der Biest, O.: Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 6, S. 1146–1158.

BELHADJ ET AL. 2022

Belhadj, M.; Kromer, R.; Werda, S.; Darnis, P.: Effect of Cold Metal Transfer-Based Wire Arc Additive Manufacturing parameters on geometry and machining allowance. Preprint: Research Square (2022).

BENNETT ET AL. 2017

Bennett, J. L.; Wolff, S. J.; Hyatt, G.; Ehmman, K.; Cao, J.: Thermal effect on clad dimension for laser deposited Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes* 28 (2017), S. 550–557.

BERMINGHAM ET AL. 2018

Birmingham, M. J.; Thomson-Larkins, J.; St John, D. H.; Dargusch, M. S.: Sensitivity of Ti-6Al-4V components to oxidation during out of chamber Wire + Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 258 (2018), S. 29–37.

BERNAUER ET AL. 2022

Bernauer, C.; Merk, T.; Zapata, A.; Zaeh, M. F.: Laser Metal Deposition with Coaxial Wire Feeding for the Automated and Reliable Build-Up of Solid Metal Parts. *Key Engineering Materials* 926 (2022), S. 65–79.

BERNHARD 2014

Bernhard, Frank (Hrsg.): *Handbuch der Technischen Temperaturmessung.* Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-642-24505-3.

BHARAT KUMAR & ANANDAKRISHNAN 2020

Bharat Kumar, C. H.; Anandakrishnan, V.: Experimental investigations on the effect of wire arc additive manufacturing process parameters on the layer geometry of Inconel 825. *Materials Today: Proceedings* 21 (2020), S. 622–627.

BÖCKH & WETZEL 2009

Böckh, P. von; Wetzel, T.: *Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis*. Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-642-03043-7.

BOYER ET AL. 2007

Boyer, R.; Welsch, G.; Collings, E. W.: *Materials properties handbook. Titanium alloys*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. ISBN: 9780871704818.

BRAND ET AL. 2022

Brand, M.; Moeini, G.; Mărginean, G.: Corrosion behavior of 316L additively produced by Directed Energy Deposition-Arc. *Materials Today: Proceedings* (2022).

BRANDL ET AL. 2010

Brandl, E.; Baufeld, B.; Leyens, C.; Gault, R.: Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Physics Procedia* 5 (2010), S. 595–606.

BRANDL ET AL. 2011

Brandl, E.; Michailov, V.; Viehweger, B.; Leyens, C.: Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part II: Hardness and dimensions of single beads. *Surface and Coatings Technology* 206 (2011) 6, S. 1130–1141.

BRANDL ET AL. 2012

Brandl, E.; Schoberth, A.; Leyens, C.: Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM). *Materials Science and Engineering: A* 532 (2012), S. 295–307.

BRUCKNER 2013

Bruckner, J.: *Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie. Cold Metal Transfer – ein neuer Metall-Schutzgas-Schweißprozess*. Fronius International GmbH. Kissing: WEKA-Media, 2013. ISBN: 9783811168794.

BURKHARDT ET AL. 2018

Burkhardt, I.; Visone, R.; Riekehr, S.; Rackel, M. W.; Kashaev, N.; Enz, J.: Parameter development and characterization of laser metal deposited Ti alloy powders for use at elevated temperatures. *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 176–179.

CABALLERO ET AL. 2019

Caballero, A.; Ding, J.; Bandari, Y.; Williams, S.: Oxidation of Ti-6Al-4V During Wire and Arc Additive Manufacturing. *3D Printing and Additive Manufacturing* 6 (2019) 2, S. 91–98.

CARTER ET AL. 2019

Carter, W.; Masuo, C.; Nycz, A.; Noakes, M.; Vaughan, D.: Thermal Process Monitoring for Wire-Arc Additive Manufacturing Using IR Cameras.

<<https://www.osti.gov/biblio/1606951>>. (Besucht am 18.01.2023).

CONG ET AL. 2017

Cong, B.; Qi, Z.; Qi, B.; Sun, H.; Zhao, G.; Ding, J.: A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. *Applied Sciences* 7 (2017) 3, S. 275.

DA SILVA ET AL. 2020

Da Silva, L. J.; Souza, D. M.; Araújo, D. B. de; Reis, R. P.; Scotti, A.: Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107 (2020) 5-6, S. 2513–2523.

DIETRICH ET AL. 2020

Dietrich, K.; Diller, J.; Dubiez-Le Goff, S.; Bauer, D.; Forêt, P.; Witt, G.: The influence of oxygen on the chemical composition and mechanical properties of Ti-6Al-4V during laser powder bed fusion (L-PBF). *Additive Manufacturing* 32 (2020), S. 100980.

DIETRICH & SCHULZE 2014

Dietrich, E.; Schulze, A.: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. München: Carl Hanser, 2014. ISBN: 9783446440555.

DILTHEY 1994

Dilthey, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1. Schweiß- und Schneidtechnologien*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. ISBN: 978-3-662-12982-1.

DILTHEY 2005

Dilthey, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2. Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*. Berlin: Springer, 2005. ISBN: 3-540-21674-X.

DIN 17024-2

DIN 17024-2: *Additive Fertigung – Prozessanforderungen und Qualifizierung – Teil 2: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unter Verwendung von Draht und Lichtbogen in der Luft- und Raumfahrt*. Berlin: Beuth 2020.

DIN 1910-100

DIN 1910-100: Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe – Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005. Berlin: Beuth 2008.

DIN 29595

DIN 29595: Schweißen im Luft- und Raumfahrzeugbau – Schmelzgeschweißte metallische Bauteile – Anforderungen. Berlin: Beuth 2007.

DIN EN 10027-2

DIN EN 10027-2: Bezeichnungssysteme für Stähle – Teil 2: Nummernsystem. Berlin: Beuth 2015.

DIN EN 9100

DIN EN 9100: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung. Berlin: Beuth 2018.

DIN EN ISO 13916

DIN EN ISO 13916: Schweißen – Messung der Vorwärm-, Zwischenlagen- und Haltetemperatur (ISO 13916:2017). Berlin: Beuth 2018.

DIN EN ISO 17659

DIN EN ISO 17659: Schweißen – Mehrsprachige Benennungen für Schweißverbindungen mit bildlichen Darstellungen (ISO 17659:2002). Berlin: Beuth 2005.

DIN EN ISO 6520-1

DIN EN ISO 6520-1: Schweißen und verwandte Prozesse – Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Schmelzschweißen (ISO 6520-1:2007). Berlin: Beuth 2007.

DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2015.

DIN EN ISO/ASTM 52900

DIN EN ISO/ASTM 52900: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie. Berlin: Beuth 2022.

DING ET AL. 2015A

Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81 (2015) 1–4, S. 465–481.

DING ET AL. 2015B

Ding, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Williams, S.; Wiktorowicz, R.; Palt, M. R.: Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture. *Journal of Materials Processing Technology* 226 (2015), S. 99–105.

DINOVITZER ET AL. 2019

Dinovitzer, M.; Chen, X.; Laliberte, J.; Huang, X.; Frei, H.: Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. *Additive Manufacturing* 26 (2019), S. 138–146.

DLR 2021

DLR: Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt. Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal. <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/04/20211215_auf-dem-weg-zu-einer-emissionsfreien-luftfahrt>. (Besucht am 23.05.2023).

DONOGHUE ET AL. 2016

Donoghue, J.; Antonysamy, A. A.; Martina, F.; Colegrove, P. A.; Williams, S. W.; Prangnell, P. B.: The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V. *Materials Characterization* 114 (2016), S. 103–114.

DUTTA & FROES 2016

Dutta, B.; Froes, F. H.: *Additive Manufacturing of Titanium Alloys. State of the Art, Challenges and Opportunities*. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2016. ISBN: 978-0-12-804782-8.

DVS 2713

DVS 2713: *Schweißen von Titanwerkstoffen Werkstoffe – Prozesse – Fertigung – Prüfung und Bewertung von Schweißverbindungen*. Düsseldorf: DVS Media 2016.

ELMER & GIBBS 2019

Elmer, J. W.; Gibbs, G.: The effect of atmosphere on the composition of wire arc additive manufactured metal components. *Science and Technology of Welding and Joining* 24 (2019) 5, S. 367–374.

EUROPÄISCHE KOMMISSION 2019

Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der europäische Grüne Deal. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>>. (Besucht am 15.03.2023).

EUROPÄISCHE KOMMISSION 2021

Europäische Kommission: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates. zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG in Bezug auf den Beitrag der Luftfahrt zum gesamtwirtschaftlichen Emissionsreduktionsziel der Union und die angemessene Umsetzung eines globalen marktbasierten Mechanismus. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0552>>. (Besucht am 26.01.2023).

FANG ET AL. 2019

Fang, X. W.; Ren, C. Q.; Bai, H.; Wang, C. X.; Lu, B. H.: Analysis of characteristics of process parameters in CMT additive manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 504 (2019), S. 12018.

FARSHIDIANFAR ET AL. 2016

Farshidianfar, M. H.; Khajepour, A.; Gerlich, A.: Real-time control of microstructure in laser additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 82 (2016) 5-8, S. 1173–1186.

FUCHS ET AL. 2020

Fuchs, C.; Baier, D.; Semm, T.; Zaeh, M. F.: Determining the machining allowance for WAAM parts. Production Engineering 14 (2020) 5-6, S. 629–637.

GEBHARDT 2016

Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. München: Carl Hanser, 2016. ISBN: 978-3-446-44401-0.

GENG ET AL. 2017

Geng, H.; Li, J.; Xiong, J.; Lin, X.: Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining 22 (2017) 6, S. 472–483.

GERTHSEN & MESCHÉDE 2006

Gerthsen, C.; Meschede, D.: Physik. Mit 1347 meist zweifarbigen Abbildungen, 94 Tabellen, 105 durchgerechneten Beispielen und 1074 Aufgaben mit vollständigen Lösungen und Visualisierungen der Relativitätstheorie auf CD-ROM. Berlin: Springer, 2006. ISBN: 3-540-25421-8.

GONZÁLEZ ET AL. 2017

González, J.; Rodríguez, I.; Prado-Cerqueira, J.-L.; Diéguez, J. L.; Pereira, A.: Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology. *Procedia Manufacturing* 13 (2017), S. 840–847.

GUSHCHINA ET AL. 2018

Gushchina, M. O.; Klimova-Korsmik, O. G.; Vildanov, A. M.; Shalnova, S. A.; Tataru, A. S.; Norman, E. A.: Influence of the protective atmosphere on the structure and properties parts from titanium alloy Ti-6Al-4V produced by direct laser deposition. *Journal of Physics: Conference Series* 1109 (2018), S. 12060.

HAMMER 2014

Hammer, F.: Sensorische Verbrennungsoptimierung von Gasfeuerungsanlagen. <https://www.lamtec.de/downloads/downloads.html?tx_lamtecmemberdownload_memberdownload%5Bdownload%5D=678&cHash=6293658a75c05330d0e568b687ce3a6b>. (Besucht am 15.03.2023).

HEDAYATNEJAD ET AL. 2021

Hedayatnejad, R.; Sabet, H.; Rahmati, S.; Salemi Golezani, A.: Investigation of Additive Manufacturing Process by LMD Method, Affecting Process Parameters on Microstructure and Quality of Deposition Layers. *Journal of Environmental Friendly Materials* 5 (2021) 1, S. 47–58.

HERWIG & MOSCHALLSKI 2014

Herwig, H.; Moschallski, A.: Wärmeübertragung. Physikalische Grundlagen, illustrierende Beispiele, Übungsaufgaben mit Musterlösungen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-658-06207-1.

HOEFER ET AL. 2019

Hofer, K.; Nitsche, A.; Haelsig, A.; Mayr, P.: Manufacturing of Titanium Components with 3DPMD. *Metals* 9 (2019) 5, S. 562.

HOEFER & MAYR 2018

Hofer, K.; Mayr, P.: Additive Manufacturing of Titanium Parts Using 3D Plasma Metal Deposition. *Materials Science Forum* 941 (2018), S. 2137–2141.

INFRA TEC GMBH 2004

InfraTec GmbH: Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie. <www.thermografie.co.at/files/infratec.pdf>. (Besucht am 15.12.2022).

ISO/TR 25901-3

ISO/TR 25901-3: Welding and allied processes – Vocabulary – Part 3: Welding processes. Genf: International Organization for Standardization 2016.

ISRAR ET AL. 2020

Israr, R.; Buhl, J.; Bambach, M.: Numerical Analysis of Different Fixation Strategies in Direct Energy Deposition Processes. *Procedia Manufacturing* 47 (2020), S. 1184–1189.

JUNG ET AL. 2013

Jung, B.; Schweißler, S.; Wappis, J.: *Qualitätssicherung im Produktionsprozess*. München: Carl Hanser, 2013. ISBN: 978-3-446-43763-0.

KARCHIN 2019

Karchin, V. A.: *Thermal Processes in Welding*. Singapur: Springer, 2019. ISBN: 978-981-13-5965-1.

KASTELIK 2020

Kastelik, R.: *Messsysteme für Sauerstoff-Sensoren auf Basis von Festkörperelektrolyten*. Dissertation: Universität Stuttgart. Stuttgart, 2020.

KHANZADEH ET AL. 2016

Khanzadeh, M.; Bian, L.; Shamsaei, N.; Thompson, S.: Porosity Detection in Laser-based Additive Manufacturing Using Melt Pool Morphology Clustering. *Proceedings: International Solid Freeform Fabrication Symposium 27* (2016), S. 1487–1494.

KHANZADEH ET AL. 2019

Khanzadeh, M.; Chowdhury, S.; Tschopp, M. A.; Doude, H. R.; Marufuzzaman, M.; Bian, L.: In-situ monitoring of melt pool images for porosity prediction in directed energy deposition processes. *IISE Transactions* 51 (2019) 5, S. 437–455.

KOZAMERNIK ET AL. 2020

Kozamernik, N.; Bračun, D.; Klobčar, D.: WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110 (2020) 7-8, S. 1955–1968.

KRAUSS 2016

Krauss, H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung. Dissertation: Technische Universität München. München, 2016.

LATSCHA ET AL. 2004

Latscha, H. P.; Linti, G. W.; Klein, H. A.: Analytische Chemie. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. ISBN: 978-3-642-62131-4.

LEE 2020

Lee, S. H.: CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel: Effect of Heat Accumulation on the Multi-Layer Deposits. *Metals* 10 (2020) 2, S. 278.

LEHMANN ET AL. 2020

Lehmann, T.; Jain, A.; Jain, Y.; Stainer, H.; Wolfe, T.; Henein, H.; Qureshi, A. J.: Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing. *Materials & Design* 194 (2020), S. 108841.

LEYENS ET AL. 1996

Leyens, C.; Peters, M.; Weinem, D.; Kaysser, W. A.: Influence of long-term annealing on tensile properties and fracture of near- α titanium alloy Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si. *Metallurgical and Materials Transactions A* 27 (1996) 6, S. 1709–1717.

LI ET AL. 2022

Li, Y.; Dong, Z.; Miao, J.; Liu, H.; Babkin, A.; Chang, Y.: Forming accuracy improvement in wire arc additive manufacturing (WAAM): a review. *Rapid Prototyping Journal* (2022).

MARTINA ET AL. 2012

Martina, F.; Mehnen, J.; Williams, S. W.; Colegrove, P.; Wang, F.: Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 6, S. 1377–1386.

MARTINA ET AL. 2013

Martina, F.; Williams, S. W.; Colegrove, P.: Design of an empirical process model and algorithm for the Tungsten Inert Gas wire+arc additive manufacture of Ti-6Al-4V components. *Proceedings: International Solid Freeform Fabrication Symposium* (2013) 24, S. 697–707.

MATTHES & SCHNEIDER 2016

Matthes, Klaus-Jürgen; Schneider, Werner (Hrsg.): *Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser, 2016. ISBN: 9783446445543.

MAZZUCATO ET AL. 2019

Mazzucato, F.; Aversa, A.; Doglione, R.; Biamino, S.; Valente, A.; Lombardi, M.: Influence of Process Parameters and Deposition Strategy on Laser Metal Deposition of 316L Powder. *Metals* 9 (2019) 11, S. 1160.

MCINTOSH & HUFF 2018

McIntosh, G.; Huff, R.: Emissivity considerations for thermographic fieldwork: why table values don't work. *Proceedings: Thermosense: Thermal Infrared Applications XL* (2018), S. 22–36.

MICHALERIS 2014

Michaleris, P.: Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes. *Finite Elements in Analysis and Design* 86 (2014), S. 51–60.

MOHD YUSUF ET AL. 2019

Mohd Yusuf, S.; Cutler, S.; Gao, N.: Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. *Metals* 9 (2019) 12, S. 1286.

MONTEIRO ET AL. 2022

Monteiro, H.; Carmona-Aparicio, G.; Lei, I.; Despeisse, M.: Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing – A review for the aeronautic and aerospace sectors. *Energy Reports* 8 (2022), S. 298–305.

NGUYEN ET AL. 2020

Nguyen, L.; Buhl, J.; Bambach, M.: Multi-bead Overlapping Models for Tool Path Generation in Wire-Arc Additive Manufacturing Processes. *Procedia Manufacturing* 47 (2020), S. 1123–1128.

PAUL ET AL. 2021

Paul, A. R.; Manivannan, R.; Mukherjee, M.; Kundu, S.; Chatterjee, A.: Development of Y-shape hybrid frame model using wire and arc additive manufacturing process. *Materials Today: Proceedings* 44 (2021), S. 4342–4348.

PETERS & LEYENS 2002

Peters, M.; Leyens, C.: *Titan und Titanlegierungen*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. ISBN: 9783527611089.

PIXNER ET AL. 2021

Pixner, F.; Buzolin, R.; Schönfelder, S.; Theuermann, D.; Warchomicka, F.; Enzinger, N.: Contactless temperature measurement in wire-based electron beam additive manufacturing Ti-6Al-4V. *Welding in the World* 65 (2021) 7, S. 1307–1322.

QIU ET AL. 2015

Qiu, C.; Ravi, G. A.; Dance, C.; Ranson, A.; Dilworth, S.; Attallah, M. M.: Fabrication of large Ti–6Al–4V structures by direct laser deposition. *Journal of Alloys and Compounds* 629 (2015), S. 351–361.

RAPLEE ET AL. 2017

Raplee, J.; Plotkowski, A.; Kirka, M. M.; Dinwiddie, R.; Okello, A.; Dehoff, R. R.; Babu, S. S.: Thermographic Microstructure Monitoring in Electron Beam Additive Manufacturing. *Scientific Reports* 7 (2017) 1, S. 43554.

RICHTER ET AL. 2019

Richter, A.; Rembe, C.; Gehling, T.; Treutler, K.; Wesling, V.: Echtzeittemperaturmessung bei additivem Lichtbogenschweißen. *tm – Technisches Messen* 86 (2019) 1, S. 112–116.

RÍOS ET AL. 2018

Ríos, S.; Colegrove, P. A.; Martina, F.; Williams, S. W.: Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 21 (2018), S. 651–657.

RITGEN 2020

Ritgen, U.: *Analytische Chemie II*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. ISBN: 978-3-662-60507-3.

RODRIGUEZ ET AL. 2015

Rodriguez, E.; Mireles, J.; Terrazas, C. A.; Espalin, D.; Perez, M. A.; Wicker, R. B.: Approximation of absolute surface temperature measurements of powder bed fusion additive manufacturing technology using in situ infrared thermography. *Additive Manufacturing* 5 (2015), S. 31–39.

ROSLI ET AL. 2020

Rosli, N. A.; Alkahari, M. R.; Ramli, F. R.; Sudin, M. N.; Maidin, S.: Influence of Process Parameters in Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. *Journal of Mechanical Engineering* 17 (2020) 2, S. 69–78.

RUIZ ET AL. 2018

Ruiz, J. E.; Cortina, M.; Arrizubieta, J. I.; Lamikiz, A.: Study of the Influence of Shielding Gases on Laser Metal Deposition of Inconel 718 Superalloy. *Materials* 11 (2018) 8, S. 1388.

SCHORGHUBER 2006

SCHUTZRECHT US20090026188A1 (29.01.2009). Fronius International GmbH Pr.: 11/920516, 2006. Schorghuber, M.: Cold-Metal-Transfer Welding Process and Welding Installation.

SCHULER & TWRDEK 2019

Schuler, V.; Twrdek, J.: *Praxiswissen Schweißtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019. ISBN: 978-3-658-24265-7.

SCHULZE 2009

Schulze, G.: *Die Metallurgie des Schweißens. Eisenwerkstoffe – Nichteisenmetallische Werkstoffe*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. ISBN: 978-3-642-03183-0.

SCHUSTER & KOLOBRODOW 2004

Schuster, N.; Kolobrodow, V. G.: *Infrarotthermographie*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. ISBN: 9783527405091.

SEQUEIRA ALMEIDA 2012

Sequeira Almeida, P.: *Process control and development in wire and arc additive manufacturing*. Dissertation: Cranfield University. Cranfield, 2012.

SEQUEIRA ALMEIDA & WILLIAMS 2010

Sequeira Almeida, P.; Williams, S.: Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). *Proceedings: International Solid Freeform Fabrication Symposium* (2010) 21, S. 25–36.

STANISAW 2012

Stanisaw, M.: *Monitoring of Arc Welding Process Based on Arc Light Emission*. In: Kovacevic, R. (Hrsg.): *Welding Processes: InTech 2012*. ISBN: 978-953-51-0854-2.

SURYAKUMAR ET AL. 2011

Suryakumar, S.; Karunakaran, K. P.; Bernard, A.; Chandrasekhar, U.; Raghavender, N.; Sharma, D.: *Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing*. *Computer-Aided Design* 43 (2011) 4, S. 331–344.

TÖNSHOFF 2001

Tönshoff, H. K.: *Sensors in Manufacturing. Sensors Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2001. ISBN: 3-527-60002-7.

TREUTLER & WESLING 2021

Treutler, K.; Wesling, V.: The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review. *Applied Sciences* 11 (2021) 18, S. 8619.

ÜNSAL ET AL. 2020

Ünsal, I.; Hirtler, M.; Sviridov, A.; Bambach, M.: Material Properties of Features Produced from EN AW 6016 by Wire-Arc Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 47 (2020), S. 1129–1133.

VÁZQUEZ ET AL. 2020

Vázquez, L.; Rodríguez, N.; Rodríguez, I.; Alberdi, E.; Álvarez, P.: Influence of interpass cooling conditions on microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V parts manufactured by WAAM. *Welding in the World* 4828 (2020), S. 1.

VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN 2013

VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-642-19981-3.

VENTURINI ET AL. 2016

Venturini, G.; Montevecchi, F.; Scippa, A.; Campatelli, G.: Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. *Procedia CIRP* 55 (2016), S. 95–100.

VOLLMER & MÖLLMANN 2017

Vollmer, M.; Möllmann, K.-P.: *Infrared Thermal Imaging*. Weinheim: Wiley-VCH, 2017. ISBN: 9783527693306.

WÄLDER & WÄLDER 2013

Wälder, K.; Wälder, O.: *Statistische Methoden der Qualitätssicherung. Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP*. München: Carl Hanser, 2013. ISBN: 978-3-446-43217-8.

WANG ET AL. 2016

Wang, J. F.; Sun, Q. J.; Wang, H.; Liu, J. P.; Feng, J. C.: Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. *Materials Science and Engineering A* 676 (2016), S. 395–405.

WANG ET AL. 2021

Wang, Z.; Zimmer-Chevret, S.; Léonard, F.; Abba, G.: Prediction of bead geometry with consideration of interlayer temperature effect for CMT-based wire-arc additive manufacturing. *Welding in the World* 65 (2021) 12, S. 2255–2266.

WIEGLEB 2016

Wiegleb, G.: *Gasmesstechnik in Theorie und Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. ISBN: 978-3-658-10686-7.

WILLIAMS & BOYER 2020

Williams, J. C.; Boyer, R. R.: Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components. *Metals* 10 (2020) 6, S. 705.

WILLIAMS ET AL. 2016

Williams, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P.: Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology* 32 (2016) 7, S. 641–647.

WU 2018

Wu, B.: *Quality improvement in wire arc additive manufacturing*. Dissertation: University of Wollongong. Wollongong, 2018.

WU ET AL. 2017

Wu, B.; Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H.; Han, J.; Fei, Z.: Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology* 250 (2017), S. 304–312.

WU ET AL. 2018

Wu, B.; Pan, Z.; Ding, D.; Cuiuri, D.; Li, H.; Fei, Z.: The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 258 (2018), S. 97–105.

XIA ET AL. 2020

Xia, C.; Pan, Z.; Polden, J.; Li, H.; Xu, Y.; Chen, S.; Zhang, Y.: A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system. *Journal of Manufacturing Systems* 57 (2020), S. 31–45.

XIA ET AL. 2022

Xia, C.; Pan, Z.; Polden, J.; Li, H.; Xu, Y.; Chen, S.: Modelling and prediction of surface roughness in wire arc additive manufacturing using machine learning. *Journal of Intelligent Manufacturing* 33 (2022) 5, S. 1467–1482.

XIONG ET AL. 2018

Xiong, J.; Li, Y.; Li, R.; Yin, Z.: Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 252 (2018), S. 128–136.

XIONG ET AL. 2021

Xiong, J.; Zhang, Y.; Pi, Y.: Control of deposition height in WAAM using visual inspection of previous and current layers. *Journal of Intelligent Manufacturing* 32 (2021) 8, S. 2209–2217.

XU ET AL. 2018

Xu, F.; Dhokia, V.; Colegrove, P.; McAndrew, A.; Williams, S.; Henstridge, A.; Newman, S. T.: Realisation of a multi-sensor framework for process monitoring of the wire arc additive manufacturing in producing Ti-6Al-4V parts. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31 (2018) 8, S. 785–798.

YANG ET AL. 2017

Yang, D.; Wang, G.; Zhang, G.: Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. *Journal of Materials Processing Technology* 244 (2017), S. 215–224.

ZAPATA ET AL. 2022

Zapata, A.; Bernauer, C.; Stadter, C.; Kolb, C. G.; Zaeh, M. F.: Investigation on the Cause-Effect Relationships between the Process Parameters and the Resulting Geometric Properties for Wire-Based Coaxial Laser Metal Deposition. *Metals* 12 (2022) 3, S. 455.

ZHAO ET AL. 2011

Zhao, H.; Zhang, G.; Yin, Z.; Wu, L.: A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 3, S. 488–495.

ZHOU ET AL. 2022

Zhou, S.; Zhang, J.; Wang, J.; Yang, G.; Wu, K.; Qin, L.: Effect of Oxygen Levels in Tent Shielding Atmosphere on Microstructural and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance* (2022).

8 Anhang

A1 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten des Autors als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) entstanden unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors studentische Arbeiten. In diesen wurden unter anderem verschiedene Fragestellungen zur Additiven Fertigung mit Draht und Lichtbogen untersucht. Entstandene Ergebnisse sind in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Nachfolgend sind die Studienarbeiten chronologisch aufgelistet:

Studierende(r)	Studienarbeit
Wolf, Franz	BA, Parameterstudie zum Thermomanagement bei der Lichtbogenbasierten Additiven Fertigung, abgegeben im Juni 2019
Corpancho, Andreas	BA, Analyse verschiedener Simulationsmodelle für Schweißprozesse zur Übertragung auf die Lichtbogenbasierte Additive Fertigung, abgegeben im Juli 2019
Gehrlicher, Philip	SA, Thermische Simulation der draht- und lichtbogenbasierten Additiven Fertigung, abgegeben im Januar 2020
Lindenmeyer, Adrian	MA, In-Situ Detection of Melt Pool Shape and Dimension of a DED Process via Evaluation of X-Ray Images, abgegeben im März 2020

Weckenmann, Tobias	BA, Evaluierung der thermischen Wirkzusammenhänge bei der Lichtbogenbasierten Additiven Fertigung von Titanbauteilen mithilfe einer Wärmebildkamera, abgegeben im Juni 2020
Ferle, Felix	BA, Parameterstudie und thermografische Prozessüberwachung von T-Stößen bei der Additiven Fertigung mit Draht und Lichtbogen, abgegeben im November 2020
Brehmer, Florian	SA, Parameterstudie zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Prozessgrößen und Bauteileigenschaften bei der draht- und lichtbogenbasierten Additiven Fertigung, abgegeben im Dezember 2020
Kollmeier, Daniel	MA, Konzeptentwicklung und Konstruktion einer Spannvorrichtung mit erweitertem Funktionsumfang für den LAF-Versuchsstand, abgegeben im Dezember 2020
Riegger, Felix	SA, Manufacturing and post-process analysis of inclined rebars using Wire and Arc Additive Manufacturing, abgegeben im Dezember 2020
Thiemann, Dorothee	SA, Parameter Identification of Wire and Arc Additive Manufactured Cylindrical Ti-6Al-4V Parts for Aerospace Applications, abgegeben im Dezember 2020
Wolf, Franz	SA, Konzeption, Umsetzung und Test einer Softwareumgebung zur zentralen Erfassung und Protokollierung von anwendungsrelevanten Daten an einer Versuchsanlage zur Lichtbogenbasierten Additiven Fertigung, abgegeben im April 2021

Ferle, Felix	SA, Entwicklung einer Methodik zur geometrischen Qualitätsbewertung und thermischen Prozessüberwachung für die Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen von Stoß-Geometrien, abgegeben im November 2021
--------------	--

Weckenmann, Tobias	SA, Additive Fertigung mit Draht und Lichtbogen eines Demonstrators unter Einsatz von Prozessüberwachungssystemen und Post-Prozess-Analysen, abgegeben im Dezember 2021
--------------------	---

A2 Kernpublikationen der vorliegenden Dissertation

Publikation I:

Baier, D.; Bachmann, A.; Zaeh, M. F.: Towards Wire and Arc Additive Manufacturing of High-Quality Parts. *Procedia CIRP* 95 (2020) o. Nr., S. 54–59.

Publikation II:

Baier, D.; Weckenmann, T.; Wolf, F.; Wimmer, A.; Zaeh, M. F.: Underlying Methodology for a Thermal Process Monitoring System for Wire and Arc Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 7 (2023) 1, S. 10.

Publikation III:

Baier, D.; Wolf, F.; Weckenmann, T.; Lehmann, M.; Zaeh, M. F.: Thermal process monitoring and control for a near-net-shape Wire and Arc Additive Manufacturing. *Production Engineering* 16 (2022) o. Nr., S. 811–822.

Publikation IV:

Baier, D.; Weckenmann, T.; Baehr, S.; Zaeh, M. F.: Approach towards a Quality Assurance System for Wire and Arc Additive Manufacturing. *Processes* 11 (2023) 2, S. 612.