

358

Dominik Schmid

Untersuchungen zum Laserstrahlschmelzen von Magnesiumlegierungen

Dominik Schmid

**Untersuchungen zum Laserstrahlschmelzen von
Magnesiumlegierungen**

utzverlag · München 2021

Forschungsberichte iw
Band 358

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7634-7 Version: 1 vom 25.02.2021
Copyright© utzverlag 2021

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4878-8
Copyright© utzverlag 2020

Dominik Schmid

**Untersuchungen zum Laserstrahlschmelzen
von Magnesiumlegierungen**



Forschungsberichte IWB

Band 358

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2020

ISBN 978-3-8316-4878-8

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Untersuchungen zum
Laserstrahlschmelzen von Magnesiumlegierungen**

Dipl.-Ing. Univ.

Dominik Schmid

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
2. Prof. Dr. techn. Rudolf Pichler

Die Dissertation wurde am 11.03.2020 an der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.07.2020 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt 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 Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld 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 mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess 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. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, für die stets wohlwollende Förderung und die Möglichkeit zur Promotion. Bei Herrn Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing. Rudolf Pichler vom Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Graz möchte ich mich sehr herzlich für die Übernahme des Koreferates und die Begutachtung der Arbeit bedanken. Zudem bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen von *iwb* und Fraunhofer IGCV für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die spannende gemeinsame Zeit. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Fabian Bayerlein sowie Herrn Dr. Georg Schlick für die kritischen und hilfreichen Anmerkungen zu dieser Arbeit. Vielen Dank auch meinen ehemaligen Studierenden, welche mit der Durchführung und Auswertung von Versuchen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Bei dem Team der mechanischen Werkstatt um Herrn Kurt Hartmann möchte ich mich für die Unterstützung der praktischen Arbeiten bedanken. Herrn Dr. Manuel Wacinski danke ich für die freundliche Aufnahme in das Kennametal-Team und den Zuspruch in der Endphase der Dissertation.

Meiner Partnerin Julia Heuchler danke ich in ganz besonderem Maße für Ihre ausdauernde Unterstützung und Motivation. Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Familie bedanken, die meine Ausbildung ermöglicht und damit den Grundstein zu dieser Arbeit gelegt hat.

Fürth, im August 2020

Dominik Schmid

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	V
Verzeichnis der Formelzeichen.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen.....	7
2.1 Laserstrahlschmelzen	7
2.1.1 Verfahrensprinzip	7
2.1.2 Stützstrukturen	8
2.1.3 Kenngrößen.....	9
2.1.4 Laserstrahl-Werkstoff-Wechselwirkung.....	11
2.2 Magnesium und Magnesiumlegierungen.....	13
2.2.1 Vorkommen	13
2.2.2 Eigenschaften.....	14
2.2.3 Legierungssysteme.....	15
2.2.4 Magnesium als Werkstoff für Strukturbauteile.....	18
2.2.5 Verwendung von Magnesiumlegierungen in der Medizintechnik	19
3 Stand der Wissenschaft und Technik.....	21
3.1 Umfang	21
3.2 Additive Verarbeitung von Magnesiumlegierungen.....	21
3.2.1 Hong Kong Polytechnic University	22
3.2.2 Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.....	23
3.2.3 LZH e.V.....	23
3.2.4 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics	25
3.2.5 Fraunhofer ILT.....	26
3.2.6 Weitere Einrichtungen/Publicationen.....	26
3.3 Einsatz korrodierbarer Magnesiumstrukturen	28
3.3.1 Lösliche Stützstrukturen	28
3.3.2 Resorbierbare Magnesiumimplantate	29
3.4 Sicherheit beim Laserstrahlschmelzen.....	32
3.4.1 Rechtliche Grundlagen des Arbeitsschutzes.....	32
3.4.2 Thermische Wirkung von Pulverwerkstoffen.....	33
3.4.3 Biologische Wirkung von Pulverwerkstoffen.....	35

3.4.4	Bestehende Sicherheitskonzepte	36
3.5	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	37
4	Versuchsaufbau und Methodik	39
4.1	Versuchsumgebung	39
4.1.1	Magnesiumpulver	39
4.1.2	Laserstrahlschmelzanlage	41
4.1.3	Analyse der aufgebauten Proben	43
4.1.4	Beobachtung des Strahlschmelzprozesses	44
4.2	Empirische Forschungsmethoden	45
4.2.1	Induktion und Deduktion	46
4.2.2	Reduktion der unabhängigen Variablen und Störgrößen	46
4.2.3	Statistische Versuchsplanung	47
4.2.4	Regressionsanalyse	49
4.3	Zusammenfassung	50
5	Untersuchungen zum Prozessverständnis	51
5.1	Struktur des Kapitels	51
5.2	Spurgeometrie ohne Pulverschicht	52
5.3	Spurgeometrie mit Pulverschicht	58
5.4	Temperaturen im Schmelzbad	62
5.5	Analyse der Verdampfung	67
5.5.1	Ursachen	67
5.5.2	Auswirkungen auf den LBM-Prozess	69
5.6	Pulverdynamik	72
5.7	Oxidschichten und Oxidation	75
5.8	Oberflächenmorphologie	77
5.9	Zusammenfassung	80
6	Prozesseinflüsse beim Aufbau von mehrlagigen Körpern	83
6.1	Struktur des Kapitels	83
6.2	Empirisches Prozessmodell	84
6.2.1	Vorversuch 1: Scangeschwindigkeit	84
6.2.2	Vorversuch 2: Spurabstand	86
6.2.3	Einfluss und Wechselwirkungen der Hauptparameter	87
6.3	Einfluss der Schichtstärke	91
6.4	Einfluss der Scanstrategie	93
6.5	Einfluss des Restsauerstoffgehalts	95
6.6	Wiederverwendbarkeit des Pulvers	96
6.7	Mikrostruktur der aufgebauten Proben	100

6.8	Verarbeitbarkeit von MgCa _{0,9} -Pulver	104
6.9	Zusammenfassung	107
7	Magnesium als lösliches Stützstrukturmaterial beim Laserstrahlschmelzen	109
7.1	Struktur des Kapitels.....	109
7.2	Einsatz in der additiven Prozesskette.....	109
7.3	Prozessentwicklung für den Materialübergang.....	112
7.3.1	Übergang Aluminium–Magnesium	112
7.3.2	Übergang Magnesium–Aluminium	114
7.4	Chemische Supportentfernung.....	116
7.4.1	Auswahl geeigneter Reaktionsmedien	116
7.4.2	Analyse der selektiven Korrosion	119
7.4.3	Funktionsnachweis an einer einfachen Stützstruktur.....	121
7.5	Zusammenfassung	125
8	Anwendungspotenziale im Bereich der Medizintechnik.....	127
8.1	Struktur des Kapitels.....	127
8.2	Technologieanalyse	128
8.2.1	Ermittlung der relevanten Funktionen	128
8.2.2	Analyse der Konkurrenztechnologien.....	129
8.2.3	Institutionen im Wettbewerb.....	130
8.3	Applikationsanalyse.....	130
8.3.1	Aktuelle Applikationen.....	130
8.3.2	Ermittlung potenzieller Applikationen aus interner Sicht	131
8.3.3	Bewertung potenzieller Applikationen aus externer Sicht.....	131
8.3.4	Spezifikation der Attribute bzw. der Anforderungen	133
8.4	Potenzialermittlung.....	136
8.4.1	Identifikation relevanter Anwendungen	136
8.4.2	Technologieentwicklungsstrategie.....	138
8.5	Konzept für ein patientenindividuelles Magnesiumimplantat	139
8.5.1	Ausgangssituation und medizinische Problemstellung.....	139
8.5.2	Darstellung des Implantatkonzepts	140
8.5.3	Ablauf einer möglichen Behandlung	142
8.5.4	Nutzenbetrachtung	142
8.6	Zusammenfassung	144
9	Arbeitssicherheit	145
9.1	Struktur des Kapitels.....	145
9.2	Bewertung der Explosionsgefährdung.....	145
9.2.1	Brand- und Explosionseigenschaften von Magnesium.....	146

9.2.2	Analyse der Gefährdung entlang der Prozesskette	147
9.3	Ableitung von Maßnahmen zum Explosionsschutz.....	152
9.3.1	Vermeidung explosionsfähiger Atmosphären.....	152
9.3.2	Vermeidung von Zündquellen	153
9.3.3	Begrenzung der Auswirkung	154
9.3.4	Weitere Maßnahmen.....	155
9.4	Bewertung der Gesundheitsgefährdung.....	156
9.4.1	Biologische Wirkung des Magnesiums	156
9.4.2	Analyse der Gefährdung entlang der Prozesskette	157
9.5	Ableitung von Maßnahmen zum Gesundheitsschutz.....	159
9.5.1	Technische Maßnahmen	159
9.5.2	Organisatorische Maßnahmen	159
9.5.3	Persönliche Maßnahmen.....	159
9.6	Zusammenfassung	160
10	Schlussbetrachtung.....	161
10.1	Zusammenfassung	161
10.2	Ausblick.....	163
11	Literaturverzeichnis	165
12	Anhang.....	193
12.1	Streckenleistungsdichte bei anderen Werkstoffen.....	193
12.2	Ergänzungen zur Technologiepotenzialanalyse	195
12.2.1	Erläuterung der medizinischen Applikationen.....	195
12.2.2	Erläuterung zu Erfüllbarkeit und Anwendungshorizont	199
12.3	Berechnung des pH-Werts von 25%iger Essigsäure	201
13	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	203

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Abkürzung	Bedeutung
A-Staub	alveolengängige Pulverfraktion
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
aq	flüssig (von lateinisch aqua: Wasser)
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATEX	Richtlinien zum Explosionsschutz (franz. ATmosphères EXplosives)
BG ETEM	Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse
BSE	Betriebsart eines Rasterelektronenmikroskops (engl. Back-scattered Electrons)
CCC	umschlossener zentral zusammengesetzter Versuchsplan (engl. Central Composite Circumscribed)
CCD	zentral zusammengesetzter Versuchsplan (engl. Central Composite Design)
CCF	flächenzentrierter zentral zusammengesetzter Versuchsplan (engl. Central Composite Face Centered)
CLI	im Bereich der additiven Fertigung übliches Dateiformat (engl. Common Layer Interface)
CT	Computertomografie
D-optimal	Versuchsplan, der die Determinante der Informationsmatrix maximiert
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DoE	statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E-Staub	einatembare Pulverfraktion
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (engl. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
EN	Europäische Norm (engl. European Standard)
engl.	englisch
Esre	Essigsäure
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Abkürzung	Bedeutung
g	gasförmig
HNO	Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde
HV	Vickershärte
LBM	Laserstrahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting)
LD ₅₀	mittlere letale Konzentration
LOC	begrenzende Sauerstoffkonzentration
max.	maximal
MKG	Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie
NFPA	US-Amerikanische Vereinigung zur Förderung des Brand- schutzes (eng. National Fire Protection Association)
nmd	New Materials Development GmbH
o. N.	ohne Nummerangabe
o. S.	ohne Seitenangabe
OFAT	One Factor at a Time
OM	Oxidationsmittel
pH-Wert	Maß für den sauren oder basischen Charakter einer Lösung
ppm	Millionstel (engl. parts per million)
Redox-Reaktion	Reduktions-Oxidations-Reaktion
REM	Rasterelektronenmikroskop
RM	Reduktionsmittel
RT	Raumtemperatur
s	fest
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Zeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	–	Absorptionsgrad
A_N	–	Aspektverhältnis
D	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
E_F	J/mm^2	Flächenenergiedichte
E_L	J/mm	Linienenergiedichte
E_V	J/mm^3	Volumenenergiedichte
F	$\text{J}/(\text{mol}\times\text{K})$	Faraday-Konstante
F_P	N	Reibkraft
ΔH	kJ/mol	Reaktionsenthalpie
H_{vap}	kJ/mol	Verdampfungsenthalpie
I_L	W/mm^2	Peak-Intensität des Lasers
J	W/m	Steckenleistungsdichte
K	$\text{mm}/(\text{m}\times\text{K})$	Wärmeausdehnungskoeffizient
K_{St}	$(\text{bar}\times\text{m})/\text{s}$	Druckanstiegsgeschwindigkeit
P_A	W	absorbierte Leistung
P_L	W	Leistung des Lasers
$P_{L\text{Max}}$	W	maximale Leistung des Lasers
P_{Ln}	–	normierte Laserleistung
P_R	W	reflektierte Leistung
P_T	W	transmittierte Leistung
Q^2	–	Vorhersagemaß
R	$\text{J}/(\text{mol}\times\text{K})$	allgemeine Gaskonstante
R^2	1	Bestimmtheitsmaß
R_a	μm	mittlere arithmetische Höhe (Linie)
S_a	μm	mittlere arithmetische Höhe (Fläche)
T	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	Temperatur
T_S	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	Schmelzpunkt
T_V	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	Verdampfungspunkt

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
U	V	elektrisches Potenzial
U^\ominus	V	Standardpotenzial der Elektrode
W	mol/s	Verdampfungsrate
X	–	Vektor in Bauebene/Beschichterrichtung
Y	–	Vektor in Bauebene/Baukammeröffnung zur Rückseite
Z	–	Baurichtung

Kleine lateinische Zeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	–	Modellparameter
\hat{a}_j	–	ermittelter Modellparameter zum Einflussfaktor j
a_p	m/s ²	Beschleunigung des Partikels
b	µm	Spurbreite
c_0	mol/l	chemische Konzentration
c_p	kJ/(kg×K)	spezifische Wärmekapazität
d_L	µm	Laserfokusedurchmesser
d_L	µm	Fokusedurchmesser
h_L	µm	Spurabstand
i	–	Nummer des Einzelversuchs
j	–	Laufvariable der Einflussfaktoren
k	–	Anzahl der Einflussfaktoren
l_b	mm	Kantenlänge
l_Z	µm	Schichtstärke im Bauprozess
m_p	g	Masse des Partikels
n	–	Anzahl der bekannten Kombinationen
p	–	Maß für die Signifikanz von Ergebnissen
pK	–	Säureexponent
p_{max}	bar	maximaler Explosionsdruck
p_{sig}	–	Mindestwert für Signifikanz

Symbol	Einheit	Bedeutung
q_{evap}	kJ/s	zeitbezogener Wärmeverlust durch Verdampfung
r_p	mm	Partikelradius
t	μm	Spurtiefe/Einschweißtiefe
t	h	Zeit
v_G	mm/s	Geschwindigkeit der Gasströmung
v_L	mm/s	Scangeschwindigkeit des Lasers
v_{Ln}	–	normierte Scangeschwindigkeit
v_P	mm/s	Geschwindigkeit des Partikels
x	–	Einflussfaktor/Versuchsparameter
x_i	–	Einflussfaktor zum Versuch i
x_{ij}	–	Einflussfaktor j zum Versuch i
y	–	Versuchsergebnis
\bar{y}	–	Mittelwert der Versuchsergebnisse
y_i	–	Versuchsergebnis zum Versuch i
\hat{y}_i	–	Vorhersage des Modells zum Versuch i
$\hat{\hat{y}}_i$	–	Vorhersage für den ausgeschlossenen Messwert zum Versuch i
z	–	Zahl der bei der Oxidation abgegebenen Elektronen

Griechische Zeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
ε_i	–	Residuum zum Teilversuch i
η_G	$\text{N}\times\text{s}/\text{m}^2$	dynamische Viskosität
κ	$\text{W}/(\text{m}\times\text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
λ_L	nm	Wellenlänge des Lasers
Π_{aOM}	–	Ionenkonzentration des Oxidationsmittels
Π_{aRM}	–	Ionenkonzentration des Reduktionsmittels
ρ	g/cm^3	Dichte
ρ_{Mg}	g/cm^3	Dichte von Magnesium
σ_{Tm}	mN/m	Oberflächenspannung am Schmelzpunkt
ϕ	–	Porosität

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die additive Fertigung ist eine Verfahrensgruppe, bei der ein Werkstück schicht- bzw. elementweise aufgebaut wird (VDI 3405). Historisch ist die Sterolithografie das erste Verfahren, das digitalgesteuert zum Aufbau von Werkstücken genutzt wurde (WOHLERS et al. 2016). Erste kommerzielle Anwendungen der Technologie fanden sich im Bereich des Prototypenbaus. Über den Einsatz im Werkzeugbau hat sich die Technologie inzwischen für die Produktion kleiner und mittlerer Serien etabliert. Hierdurch konnte die additive Fertigung in den vergangenen Jahren signifikant an Bedeutung gewinnen. Wie in Abbildung 1-1 zu erkennen ist, hat sich der Markt für additive Anlagen, Ausgangsmaterialien und Services von 1998 bis 2018 nahezu verzwanzigfacht. Auf Basis von Markterhebungen geht die Wirtschaftsprüfungsgesellschaft Ernst & Young von einem weiteren jährlichen Wachstum von ca. 25 % bis 2023 aus (ERNST & YOUNG 2019).

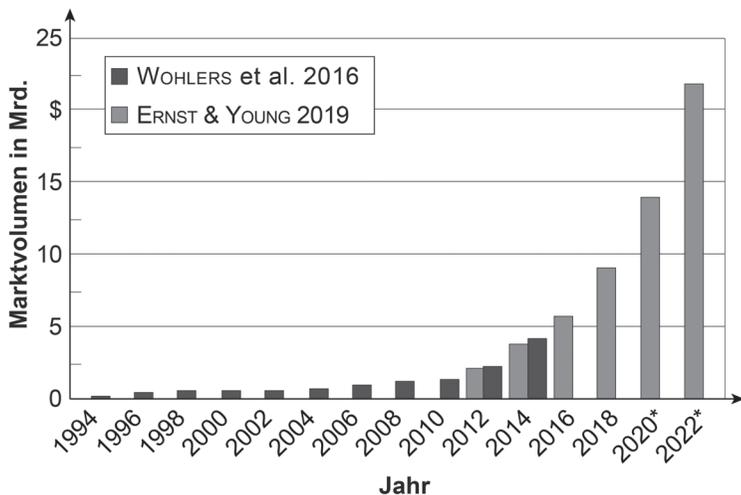


Abbildung 1-1: Marktentwicklung für Produkte und Dienstleistungen im Bereich der additiven Fertigung (nach WOHLERS et al. 2016 und ERNST & YOUNG 2019), Prognosen mit * gekennzeichnet

Ein besonders starkes Wachstum ist dabei im Bereich der additiven Metallverarbeitung zu verzeichnen, insbesondere durch das Laserstrahlschmelz-Verfahren (WOHLERS et al. 2016). Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung geometrisch

komplexer Bauteile, wobei die resultierenden Festigkeiten in der Regel denen konventionell bearbeiteter Werkstücke entsprechen bzw. diese sogar übertreffen können (u. a. HANZL et al. 2015). Neben der Technologie zur Verarbeitung von verschiedenen Stählen, Nickelbasiswerkstoffen und Kobalt-Chrom-Legierungen sind inzwischen auch Fertigungsanlagen für den Einsatz von Aluminium- und Titanwerkstoffen kommerziell erhältlich. Durch die bisher verfügbaren Werkstoffe werden jedoch nicht alle Anwendungen abgedeckt. So wird die Verarbeitbarkeit zusätzlicher Werkstoffe in einer Befragung der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (ACATECH 2016, S. 25) als kritischer Erfolgsfaktor für die additive Fertigung gesehen.

Eine Werkstoffgruppe, die bisher durch das Laserstrahlschmelzen nicht bzw. nur unzureichend verarbeitet werden kann, sind die Magnesiumlegierungen (GIESEKE 2015). Diese verfügen über eine geringe Dichte bei hoher spezifischer Festigkeit, weshalb sie für eine Vielzahl an Leichtbauanwendungen eine interessante Alternative sind (OSTROVSKY & HENN 2007). Im Bereich der Medizintechnik erfährt Magnesium zunehmend Aufmerksamkeit als Implantatmaterial, da es natürlicherweise im menschlichen Körper vorhanden ist und vom Organismus resorbiert werden kann (vgl. Unterabschnitt 2.2.5, S. 19). Ein weiterer Vorteil des Magnesiums besteht in der weltweiten Verfügbarkeit der mineralischen Ausgangsstoffe in „nahezu unbegrenzter“ Menge (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2008).

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die wissenschaftlichen Grundlagen für einen industriellen Einsatz des Laserstrahlschmelzens von Magnesiumlegierungen zu schaffen. Hierzu ist zunächst ein Verständnis für die bei der Verarbeitung von Magnesium auftretenden Effekte erforderlich. Einsichten in die Prozessabläufe können durch die Analyse der Prozessergebnisse, die Prozessbeobachtung oder mathematische Modelle erlangt werden. Darüber hinaus sind die Einflussfaktoren beim Aufbau von mehrlagigen Körpern zu ermitteln und zu quantifizieren. Zudem soll untersucht werden, ob das Laserstrahlschmelzen von Magnesiumlegierungen in Kombination mit anderen Werkstoffen genutzt werden kann, um die Technologie der laseradditiven Metallverarbeitung um lösliche Stützstrukturen zu erweitern. Weiterhin ist zu analysieren, welche Einsatzmöglichkeiten sich im Bereich der Medizintechnik für die Kombination der Technologien Laserstrahlschmelzen und biokompatible Magnesiumlegierungen ergeben. Für den am besten geeigneten Anwendungsfall ist beispielhaft ein Implantatkonzept zu entwickeln.