

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss

Christof Lehner

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr. -Ing. E. Beyer,
Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 18.10.2000 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
09.01.2001 angenommen.

Forschungsberichte



Band 147

Christof Lehner

***Beschreibung des Nd:YAG-
Laserstrahlschweißprozesses
von Magnesiumdruckguss***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2001

ISBN 3-8316-0004-X

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Geleitwort des Herausgebers

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 und 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 Produktentwicklung über die Planung von Produktionssystemen hin zu 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.

Gunther Reinhart

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer, dem Inhaber des Lehrstuhls für Oberflächen-technik und Schichttechnologie am Institut für Produktionstechnik der Technischen Universität Dresden und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahl-technik, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

Nicht zuletzt gilt ein ganz besonderer Dank meiner Frau Anja, die mich mit ihrer mentalen Unterstützung sowie ihrer unermüdlichen Geduld bei der Erstellung der Arbeit entscheidend motiviert hat.

München, im Mai 2001

Christof Lehner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung.....	3
1.3	Zielsetzung.....	5
1.4	Vorgehensweise	6
2	Grundlagen und Definitionen	9
2.1	Werkstoff Magnesium.....	9
2.1.1	Einsatz und Verbrauch von Magnesium.....	9
2.1.2	Gewinnung und Herstellung von Magnesium	11
2.1.3	Eigenschaften von Magnesium	12
2.1.4	Magnesiumlegierungen	14
2.1.4.1	Wirkung der Legierungselemente	14
2.1.4.2	Bezeichnungen.....	15
2.1.5	Eigenschaften der Magnesiumlegierungen	16
2.1.5.1	Mechanische Eigenschaften der AZ-Legierungen	17
2.1.5.2	Mechanische Eigenschaften der AM-Legierungen	19
2.1.5.3	Metallurgische Eigenschaften.....	20
2.1.5.4	Thermophysikalische Eigenschaften	22
2.1.6	Magnesiumdruckguss	23
2.1.6.1	Verfahrensbeschreibung	23
2.1.6.2	Eigenschaften druckgegossener Bauteile	26

2.1.7	Sicherheitsaspekte beim Umgang mit Magnesium	26
2.1.8	Zusammenfassung	28
2.2	Laser	29
2.2.1	Laser in der Materialbearbeitung	30
2.2.2	Aufbau einer Laseranlage	31
2.2.3	Laserstrahlquellen	32
2.2.3.1	CO ₂ -Laser	32
2.2.3.2	Nd:YAG-Laser	33
2.2.4	Laserstrahlschweißen	35
2.2.4.1	Vorteile und Potentiale des Laserstrahlschweißens	35
2.2.4.2	Lasergerechte Nahtformen	36
2.2.4.3	Wärmeleitungsschweißen	37
2.2.4.4	Tiefschweißen	38
2.2.4.5	Probleme beim Laserstrahlschweißen	39
2.2.4.6	Einstellparameter beim Laserstrahlschweißprozess	40
2.2.4.7	Ableitung wichtiger Einstellparameter beim Laserstrahlschweißen	41
2.2.4.8	Ableitung wichtiger Zielgrößen beim Laserstrahlschweißen	43
2.3	Statistische Versuchsmethodik (SVM)	44
2.3.1	Ziel der SVM	44
2.3.2	Planung	46
2.3.3	Durchführung	50
2.3.4	Analyse	52

2.4 Zusammenfassung.....	56
3 Stand der Technik und Forschung	57
3.1 Anforderungen an das Prozesswissen für den Einsatz in der Produktion.....	57
3.2 Schweißverfahren für Magnesium	60
3.2.1 Konventionelle Schweißverfahren (MIG/WIG/Plasma)	60
3.2.2 Elektronenstrahlschweißen	63
3.2.3 Pressstumpfschweißen	64
3.3 Laserstrahlschweißen von Magnesium	65
3.3.1 Strahl-Stoff-Wechselwirkung.....	66
3.3.2 Einfluss des Schutzgases.....	67
3.3.2.1 Einfluss der Gasart.....	67
3.3.2.2 Einfluss von Zuführrichtung und Gasmenge.....	68
3.3.3 Metallurgie, Nahtgeometrie	69
3.3.4 Korrosionsverhalten	71
3.3.5 Mechanisch-technologische Erkenntnisse	73
3.3.5.1 Statische Kennwerte.....	73
3.3.5.2 Härte.....	74
3.3.5.3 Dynamisches Verhalten.....	75
3.3.5.4 Einfluss der Raumlagen.....	76
3.3.5.5 Einfluss von Toleranzen.....	76
3.3.5.6 Einfluss der Bauteilvorbereitung und von Verunreinigungen	77
3.4 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs.....	78

4	Eingesetzte Versuchs- und Prüftechnik.....	81
4.1	Beschreibung der aufgestellten Versuchspläne	81
4.1.1	Ermittlung des grundlegenden Prozessverhaltens	81
4.1.2	Ermittlung des Einflusses produktionstypischer Randbedingungen.....	85
4.2	Versuchswerkstoffe und Prozessgas	87
4.3	Beschreibung der verwendeten Laserschweißanlage	88
4.3.1	Lasergerät und Strahlführung.....	88
4.3.2	Bearbeitungsoptik	90
4.3.3	Handhabungsgerät	91
4.4	Versuchsauswertung.....	91
5	Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozess von Magnesiumdruckguss.....	93
5.1	Grundlegendes Prozessverhalten	94
5.1.1	Einfluss der Laserleistung	94
5.1.1.1	Nahtgeometrie.....	94
5.1.1.2	Statische Festigkeitsparameter	97
5.1.2	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit.....	100
5.1.2.1	Nahtgeometrie.....	100
5.1.2.2	Statische Festigkeitsparameter	102
5.1.3	Einfluss der Fokusslage	104
5.1.3.1	Nahtgeometrie.....	104
5.1.3.2	Statische Festigkeitsparameter	107
5.1.4	Zusammenfassung.....	108

5.2	Fertigungstechnische Einflüsse.....	109
5.2.1	Einfluss des Einstrahlwinkels	109
5.2.1.1	Winkel α	109
5.2.1.2	Winkel β	112
5.2.2	Einfluss der lateralen Fokusposition.....	113
5.2.3	Einfluss eines Fügspalts.....	114
5.3	Wechselwirkungen der Einflussparameter	117
5.3.1	Wechselwirkung zwischen Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokuslage.....	118
5.3.2	Wechselwirkung zwischen Einstrahlwinkel und Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokuslage.....	119
5.3.3	Wechselwirkung zwischen lateraler Fokusposition und Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokuslage.....	122
5.3.4	Wechselwirkung zwischen Spaltbreite und Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokuslage.....	123
5.3.5	Wechselwirkung zwischen lateraler Fokusposition, Einstrahlwinkel und Spaltbreite.....	125
5.3.6	Erkenntnisse	127
5.4	Zusammenfassung.....	130
6	Beurteilung des Prozessverhaltens	131
6.1	Definition des Begriffes „Prozessfenster“	131
6.2	Vorgehensweise zur Ermittlung der Prozessfensterbreite.....	136
6.3	Beurteilung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesium.....	137
6.4	Zusammenfassung.....	140

7	Gestaltung von Prozess und Produkt	141
7.1	Schweißbarkeit verschiedener Nahtformen	141
7.2	Verbindung unterschiedlicher Legierungen.....	142
7.3	Prozessgestaltung.....	143
7.3.1	Heften.....	143
7.3.2	Schweißen in Nahtüberlappungsbereichen	143
7.3.3	Toleranzanforderungen	143
7.3.3.1	Spaltbreite.....	143
7.3.3.2	Kantenversatz	145
7.3.3.3	Kantenvorbereitung.....	145
7.3.3.4	Positionierung des Laserfokus	145
7.3.3.5	Zusammenfassung.....	146
7.4	Produktgestaltung	147
7.4.1	Gestaltung und Lage der Fügezone.....	147
7.4.2	Bauteilvor- und -nachbehandlung.....	151
7.5	Zusammenfassung	152
8	Anwendungsbeispiele	153
8.1	Dichtschweißen von Gehäusen	153
8.2	Einschweißen eines Halters in ein Grundbauteil.....	160
9	Bewertung.....	163
10	Zusammenfassung und Ausblick	165
11	Literaturverzeichnis.....	169

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

A	Bruchdehnung [%]
A^*	Bruchdehnung [%], ungenormte Probe
A_{NQ}	Nahtquerschnittsfläche [mm ²]
A_v	Charpy-Schlagfestigkeit [J]
B_N	Nahtbreite [mm]
B_{Prozess}	Breite des Prozessfensters
$B_{\text{Prozess, norm}}$	Normierte Breite des Prozessfensters
B_{Sp}	Spaltbreite [mm]
cov	Kovarianz
c_p	Spezifische Wärmekapazität [J/kg*K]
E	Elastizitätsmodul [MPa]
ET	Einschweißtiefe [mm]
f	Brennweite [mm]
F	Wert aus der F-Verteilung
f_1, f_2	Freiheitsgrade
F_x	Seitliche Fokusposition [mm]
F_z	Fokuslage [mm]
G	Schermodul [MPa]
H	Härte [HB]
K	Wärmeausdehnungskoeffizient [K ⁻¹]
k	Anzahl der Faktoren der statistischen Versuchsplanung
MS	Varianzen ("Mean Squares")
N	Gesamtzahl der Versuche

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

N	Umfang der Stichprobe
P	Druckfestigkeit [MPa]
P	Leistung [kW]
Q_s	Schmelzwärme [kJ/kg]
R	Elektrischer Widerstand [Ω]
R	Korrelationskoeffizient
R_m	Zugfestigkeit [MPa]
R_m^*	Zugfestigkeit [MPa], ungenormte Probe
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze [MPa]
$R_{p0,2}^*$	0,2%-Dehngrenze [MPa], ungenormte Probe
RT	Raumtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
s	Materialdicke [mm]
s	Standardabweichung
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SS	Streuung
SS_{Lof}	Modellschwäche ("Lack of Fit")
SS_{Pe}	Reine Versuchsstreuung ("Pure Error")
SS_{Reg}	Durch das Regressionsmodell erklärte Streuung
SS_{Res}	Durch das Regressionsmodell nicht erklärte Streuung
T_s	Schmelztemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
T_v	Siedetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
U	Standardpotential [V]
v	Geschwindigkeit [m/min]
\bar{x}	Mittelwert der Stichprobe

x_i	Messwerte
y	Versuchswerte
\hat{y}_i	Geschätzte Werte aus dem Regressionsmodell
\bar{y}	Mittelwert der Versuchswerte
α	Sternpunktabstand
α	Wahrscheinlichkeit
α	Einstrahlwinkel in Schweißrichtung [°]
β	Einstrahlwinkel lateral zur Schweißrichtung [°]
η	Dynamische Viskosität [mPas]
λ	Wellenlänge [nm]
λ_{el}	Elektrische Leitfähigkeit [m/Ω*mm²]
λ_{th}	Thermische Leitfähigkeit [W/K*m]
ρ	Dichte [g/cm³]
σ_{Ts}	Oberflächenspannung bei Schmelztemperatur [m/Nm]

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
AM	Aluminium-Mangan
ASTM	Association for the Standardization of Technical Matters
AZ	Aluminium-Zink
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
Cl	Chlor
CO ₂	Kohlendioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
doe	design of experiments (Statistische Versuchsplanung)
EN	Europäische Norm
H ₂	Wasserstoff
HLDL	Hochleistungsdiodenlaser
HP	High Purity
IHU	Innen-Hochdruck-Umformen
ISO	International Standardization Organization
K	Kalium
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation
Leg.	Legierungen
Mg	Magnesium
MIG	Metall-Inert-Gas-Schweißen
Nd:YAG	Mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
O ₂	Sauerstoff

REM-EDX	Raster-Elektronenmikroskop-energy-dispersive analysis of x-rays
SPC	Statistical Process Control
SVM	Statistische Versuchsmethodik
UVV	Unfallverhütungsvorschriften
WIG	Wolfram-Inert-Gas-Schweißen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer

1 Einleitung

1.1 Motivation

„Die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes ebenso wie die eines Unternehmens hängt entscheidend von der Durchsetzung technischer Basisinnovationen ab.“ [RADAJ 1993B] Eine Stärke der deutschen Industrie ist die Entwicklung und der Einsatz neuer, innovativer Technologien. Die Umsetzung innovativer Technologien aus der Grundlagenforschung in Produkte und eine effiziente, unter den Prämissen Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit stehende, Produktion ist dabei von hoher Bedeutung [GEIGER & LUTZ 1995, LEIBINGER 1997, MILBERG 1997, REINHART 1997].

Der langfristige und nachhaltige Erfolg von Produkten kann jedoch nur gewährleistet werden, wenn die Anforderungen an das Produkt über den gesamten Produktlebenszyklus geklärt sind und erfüllt werden. Die Systeme Absatzmarkt, Beschaffungsmarkt und das eigene sowie konkurrierende Unternehmen beeinflussen dabei das Produkt auf verschiedenen Anforderungsebenen. Diese sind die technische, die wirtschaftliche, die rechtlich-politische, die soziale und die ökologische Ebene. In den letzten Jahren gewinnt dabei die ökologische Ebene eine immer größere Bedeutung [FRIEDRICH & SEBASTIAN 1997, REINHART U.A. 1996].

In der Automobilindustrie sind in diesem Zusammenhang die Gesetze und Verordnungen hinsichtlich der Verringerung der Abgasemissionen beziehungsweise des Kraftstoffverbrauchs von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus steigen die Anforderungen an die aktive und passive Fahrzeugsicherheit und die Ansprüche der Kunden an den Komfort der Fahrzeuge. Dies führt neben Entwicklungszielen wie beispielsweise der Optimierung der Antriebssysteme oder der Bereitstellung von Informationssystemen über die Verkehrsumfeldsituation zu der Forderung nach einer Verringerung der rotatorischen und translatorischen Massen. Dabei muss „...das technisch Mögliche mit dem wirtschaftlich Machbaren in einem für den Verbraucher attraktiven Produkt in Einklang...“ gebracht werden [HALDENWANGER 1997].

Der technologisch orientierte Leichtbau für alle Komponenten eines Produktes insbesondere im Fahrzeugbau spielt somit eine entscheidende Rolle. Die Konstruktionsprinzipien beim Leichtbau lassen sich unter anderem in den Form-, den Stoff-, den Verbund- und den Konzeptleichtbau klassifizieren [HALDENWANGER 1997]. Das Ziel all dieser Prinzipien ist die Einstellung einer gewichtsoptimalen Kombination aus Werkstoff und Geometrie des Bauteils für das jeweilige Belastungs- bzw. Anforderungskollektiv. Neue Verarbeitungstechnologien wie das Innenhochdruckumformen (IHU) und die Lasermaterialbearbeitung tragen dazu bei, optimale Kombinationen überhaupt erst zu ermöglichen [POHL & Schultz 1997].

Im Stoffleichtbau werden als "leichte" Werkstoffe Aluminiumlegierungen, Kunststoffe (insbesondere faserverstärkt), aber auch höherfeste Stähle und in letzter Zeit verstärkt Magnesiumlegierungen verwendet [AUTOMOBIL 1996, BÖNDEL 1992, REINHART & LEHNER 1997].

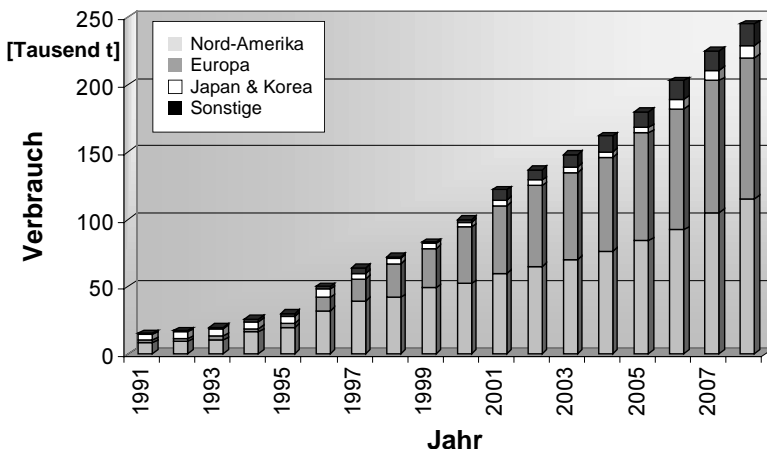


Abbildung 1.1: Verbrauchsprognose von Magnesiumdruckguss bis 2008 [RIENAS 1999]

Magnesiumlegierungen eignen sich aufgrund der geringen Dichte von etwa $1,8 \text{ kg/dm}^3$, einer relativ guten Steifigkeit von etwa 45.000 MPa und ihrer äußerst guten Gieß- und Zerspanbarkeit sehr gut für Leichtbauanwendungen [ASM 1990, DRAUGELATES U.A. 1996B, KLOCKE & FRITSCH 1998, TIKAL U.A. 1997]. Die Tendenz, Magnesium für Druckgussteile einzusetzen, wird durch den stark zunehmenden Verbrauch der letzten Jahre belegt [AUTOMOBIL 1996, METALL 1994, RIENAU 1999, SCHUHMANN & FRIEDRICH 1998]. Abbildung 1.1 kann der Verbrauch von Magnesium in Druckgussanwendungen in den letzten Jahren entnommen werden. Ferner ist eine Prognose bis zum Jahr 2008 [nach RIENAU 1999] dargestellt.

Beispiele für derzeit in der Automobilindustrie eingesetzte Magnesiumbauteile sind Abbildung 1.2 zu entnehmen. Weitere Anwendungsfelder von Magnesium finden sich beispielsweise in der Luftfahrt-industrie, der Handhabungstechnik, der Kommunikationstechnik und bei Büromaschinen [REINHART U.A. 1997, WOLTER 1997].

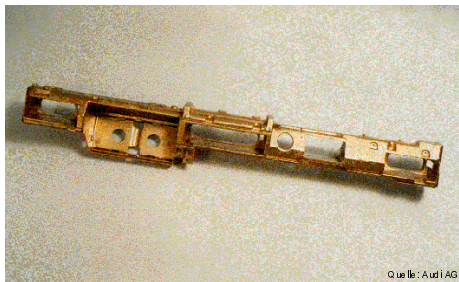
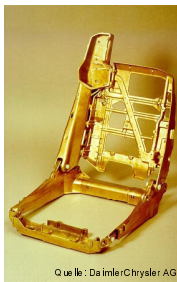


Abbildung 1.2: Sitzgestell und Instrumententafelträger aus Magnesium

1.2 Problemstellung

Im Fahrzeugbau soll langfristig ein Magnesiumanteil von etwa 40 kg im Fahrzeug realisiert werden [CLOW 1998]. Das bedeutet, dass ein erheblicher Volumenanteil (aufgrund der geringen Dichte der Magnesiumlegierungen) des Fahrzeugs aus Magnesiumbauteilen bestehen wird.

Zur Realisierung einer solchen Menge an Bauteilen ist es notwendig, das Potential an konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten für Magnesiumdruckgussteile erheblich zu erweitern. Insbesondere muss neben der für Druckgussbauteile besonders geeigneten und daher meist eingesetzten Integralbauweise [HERTEL 1960] auch das Potential eröffnet werden, Differentialbauweisen zu realisieren. Die Bereitstellung von produktions-tauglichen Fügeverfahren für Magnesiumlegierungen ist daher von besonderer Bedeutung [DANZER & LEHNER 1997, POPRAWA & BEHLER 1997, HENNEMANN U.A. 1996, DILTHEY 1999].

Derzeit werden für die Verbindung von Magnesiumbauteilen nahezu ausschließlich Schraubverbindungen eingesetzt. Bei Schraubverbindungen von Magnesiumbauteilen treten jedoch zum Teil erhebliche Probleme aufgrund von Relaxationserscheinungen auf. Zur Herstellung komplexer Strukturen aus Magnesium sind deshalb Schweißverfahren von großer Bedeutung, da Schweißverbindungen unter anderem die Übertragung von hohen Kräften ermöglichen. Ferner ergeben sich Einsparungsmöglichkeiten von Material und Prozessschritten im Vergleich zu Schraubverbindungen [LINDL U.A. 1995]. Das Laserstrahlschweißverfahren spielt dabei eine große Rolle, da bei hohen Prozessgeschwindigkeiten eine nur geringe Wärmeeinbringung in das Bauteil erfolgt und damit der resultierende Verzug erheblich verringert wird. Eine Nacharbeit des Bauteils kann deshalb in vielen Fällen minimiert oder ganz eingespart werden. Die geringe Wärmeeinbringung ermöglicht darüber hinaus die Realisierung von Strukturelementen wie dünn-dünn oder dick-dünn Verbindungen. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine nur einseitige Zugänglichkeit zur Fügestelle gewährleistet werden muss. Auf diese Weise lassen sich im Gegensatz zu den konventionellen Schweißverfahren (WIG-/MIG-/Plasmaschweißen) oder den Widerstandsschweißverfahren beispielsweise verdeckte T-Stöße, einseitig geschweißte Kehlnähte oder auch punktartige Verbindungen mit einseitiger Zugänglichkeit realisieren [LINDL U.A. 1995].

Obwohl die Lasertechnik eine Reihe von Vorteilen bietet und die Schweißtechnik auf konstruktiver Seite das Gestaltungspotential für Magnesiumbauteile wesentlich vergrößert, wird derzeit, nach Wissen des Verfassers, industriell kein Schweißverfahren für Magnesiumbauteile eingesetzt. Das liegt einerseits daran, dass technische Innovationen zunächst einen mühsamen Durchsetzungsprozess durchlaufen [WEULE 1992]. Andererseits kann die „voreilige, inkonsequente oder unzureichend

durchdachte Anwendung...“ teuer zu stehen kommen [RADAJ 1993B]. Die technologische Beherrschung des umzusetzenden Prozesses bei hoher Prozesssicherheit ist deshalb eine unbedingte Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz des Laserstrahlschweißens von Magnesiumlegierungen. Die genaue Kenntnis des Prozessverhaltens und des unter Produktionsbedingungen realisierbaren Prozessergebnisses ist daher unbedingt erforderlich. Ferner müssen als Entscheidungsgrundlage für den Einsatz eines Verfahrens die wirtschaftlichen Randbedingungen, wie beispielsweise die erreichbaren Prozessgeschwindigkeiten und die benötigte Menge und Art der Prozesshilfsstoffe (beim Laserstrahlschweißen z.B. das einzusetzende Gas), bekannt sein. Beim Einsatz von neuen Verfahren oder neuen Werkstoffen müssen darüber hinaus die Konsequenzen aus dem Verarbeitungsprozess auf die Bauteilgestaltung bekannt sein, um die Anforderungen an das Produkt zu erfüllen und eine wirtschaftliche und sichere Fertigung zu gewährleisten [MATZEIT 1996, ZOPF 1995].

1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Magnesiumdruckguss in erhöhtem Umfang der produktionstauglichen und wirtschaftlichen Nutzung zugänglich zu machen. Im Rahmen dieser Arbeit werden deshalb technologische, wirtschaftliche und konstruktive Gesichtspunkte für das Laserstrahlschweißen von Magnesium behandelt. Damit soll Magnesium verarbeitenden Unternehmen einerseits eine technologische und wirtschaftliche Wissensbasis zur Technologieentscheidung an die Hand gegeben werden. Andererseits soll es den Anwendern ermöglicht werden, anhand des in dieser Arbeit vorgestellten empirisch ermittelten Prozessverhaltens den Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozess in der Produktion schnell und effizient einzustellen. Darüber hinaus sollen Hinweise zur konstruktiven Gestaltung von Magnesiumbauteilen, die aus den Untersuchungen zum Prozessverhalten abgeleitet werden, zur Verfügung gestellt werden.

1.4 Vorgehensweise

Das Ziel soll mit folgender Vorgehensweise erreicht werden. Zur Hinführung an die Thematik werden zunächst im **zweiten Kapitel** die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen und Definitionen vorgestellt. Dazu wird auf die Eigenschaften des Werkstoffs Magnesium insbesondere im Hinblick auf das Laserstrahlschweißen eingegangen. Ferner werden die wichtigsten Lasertypen vorgestellt und die besondere Eignung des Nd:YAG-Lasers zum Schweißen von Magnesiumdruckguss aufgezeigt. Zusätzlich werden die zum Verständnis des Laserstrahlschweißens notwendigen Grundlagen einschließlich der für das Laserstrahlschweißen wichtigsten und im Rahmen dieser Arbeit erwähnten Stoßformen beschrieben. Abgeschlossen wird dieses Kapitel durch die Herleitung und Diskussion der zur Beurteilung des Prozessverhaltens entscheidenden Einflussparameter und Zielgrößen sowie einer Darstellung der Grundlagen der statistischen Versuchsplanung.

Im **dritten Kapitel** wird der Stand der Technik und Forschung im Hinblick auf das Prozessverhalten des Schweißens von Magnesiumlegierungen mit dem Schwerpunkt auf dem Nd:YAG-Laserstrahlschweißen aufgezeigt. Weiterhin werden die Defizite des aktuellen Standes der Technik und Forschung im Hinblick auf das für einen Produktionseinsatz notwendige konstruktive und fertigungstechnische Wissen behandelt.

Das **vierte Kapitel** beschreibt die eingesetzte Versuchs- und Prüftechnik. Dies beinhaltet die aufgestellten statistischen Versuchspläne zur Ermittlung des Prozessverhaltens sowie die für die Versuche eingesetzten Anlagen.

Im **fünften Kapitel** werden die Versuchsergebnisse dargestellt. Daraus wird das Verhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses zum Schweißen von Magnesiumdruckgusslegierungen abgeleitet. Dabei werden insbesondere die Auswirkungen produktionstypischer Bedingungen wie Bauteiltoleranzen auf das Schweißergebnis beschrieben.

Im **sechsten Kapitel** wird eine Vorgehensweise zur Beurteilung der Prozessrobustheit beschrieben. Dabei wird der Begriff "Prozessfenster" zur Beurteilung des Prozesses herangezogen.

Im **siebten Kapitel** wird das für den Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens in der Produktion benötigte Wissen zur Prozess- und

Produktgestaltung aus den im dritten und im fünften Kapitel beschriebenen Ergebnissen sowie aus zusätzlichen Untersuchungen abgeleitet.

Im **achten Kapitel** werden beispielhaft Anwendungsfälle aufgezeigt, deren technologisches und wirtschaftliches Potential sich klar abzeichnet. Eine wirtschaftliche und technologische Bewertung der in dieser Arbeit erarbeiteten Kenntnisse sowie der Vorgehensweise zur Beurteilung der Prozessrobustheit erfolgt in **Kapitel neun**. Den Abschluss der Arbeit bilden Zusammenfassung und Ausblick in **Kapitel zehn**.

2 Grundlagen und Definitionen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen und Definitionen beschrieben. Dazu wird zunächst auf den Werkstoff Magnesium eingegangen. Anschließend werden die zur Lasermaterialbearbeitung und insbesondere zum Laserstrahlschweißen geeigneten Lasertypen beschrieben. Außerdem wird der Laserstrahlschweißprozess genauer beleuchtet. Zum besseren Verständnis werden schließlich die in dieser Arbeit erwähnten und behandelten Stoßformen zum Laserstrahlschweißen beschrieben und nach ihrer Relevanz für das Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen bewertet. Abschließend werden Kriterien zur Beurteilung der Qualität von Schweißnähten und der wichtigsten Einstellparameter des Laserstrahlschweißprozesses zusammengefasst.

2.1 Werkstoff Magnesium

Dieser Abschnitt beinhaltet die Eigenschaften des Werkstoffes Magnesium und seiner Legierungen. Dazu werden insbesondere die thermophysikalischen Eigenschaften von Magnesium und die Einsatzgebiete der beiden wichtigsten Legierungsgruppen (AZ- und AM-Legierungen) vorgestellt. Ferner wird auf das wichtigste Herstellverfahren für Magnesiumbauteile - das Druckgießen - eingegangen und es werden die Konsequenzen für das Schweißen dargestellt.

2.1.1 Einsatz und Verbrauch von Magnesium

Das chemische Element Magnesium wurde im Jahr 1755 von *Black* entdeckt. Bis in die 50er Jahre des 19. Jahrhunderts wurden dann verschiedene Verfahren zur Herstellung von reinem Magnesium entwickelt [WINNAKER U.A. 1981]. In der Pyrotechnik und der Photographie fand Magnesium damals seine ersten Anwendungen.

Erst im Verlauf des 1. Weltkrieges stieg der Verbrauch von Magnesium an. Magnesium wurde für Leuchtraketen und als Legierungselement von Aluminium eingesetzt entwickelt [WINNAKER U.A. 1981].

Von ersten Anwendungen im Bereich der Fügetechnik (Gasschweißen und Löten) wird erst aus den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts berichtet [DRAUGELATES U.A. 1998].

Erst mit der Einführung von Magnesium in der Flugzeug- und Transportindustrie stieg der Verbrauch dann wesentlich an und erreichte nach Ausbruch des Zweiten Weltkrieges 250.000 t/Jahr.

Nach Kriegsende kam es durch die Schließung und Demontage aller Magnesium-Produktionsanlagen in Deutschland zu einem erheblichen Rückgang der Produktion. Erst in den 50er Jahren durch den Bau des VW-Käfer, bei dem etwa 20 kg Magnesiumteile pro Fahrzeug verwendet wurden, stieg der Magnesiumverbrauch wieder an. Magnesium wurde im VW-Käfer beispielsweise als Werkstoff für das Getriebegehäuse und den Motorblock eingesetzt [FRIEDRICH & SEBASTIAN 1997]. Bis in die 80er Jahre stieg der Magnesiumverbrauch bis auf 320.000 t/Jahr [BUSK 1987, KOPP 1996, METALL 1994, MEZOFF 1980].

In der Zeit nach der Einstellung der Käferproduktion war der Einsatz von Magnesium als Konstruktionswerkstoff im Automobilbereich einerseits aufgrund der hohen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit und der leichten Entflammbarkeit bei der spanenden Bearbeitung stark rückläufig. Andererseits spielte und spielt die Preis- und Verfügbarkeitsentwicklung eine große Rolle. Insbesondere das Preisverhältnis zwischen Magnesium und Aluminium darf für einen wirtschaftlichen Einsatz von Magnesium nicht über dem Faktor 1.6 liegen [CARSON 1983].

Erst gegen Ende der 80er und zu Beginn der 90er Jahre ist wieder eine erhebliche Zunahme des Magnesiumverbrauchs als Konstruktionswerkstoff zu erkennen. Dies liegt einerseits an der Entwicklung hochreiner Legierungen zur höheren Korrosionsbeständigkeit. Andererseits liegt dies an den verschärften gesetzlichen Regelungen zum Kraftstoffverbrauch bzw. der Umweltbelastung der Fahrzeuge [CATON 1996].

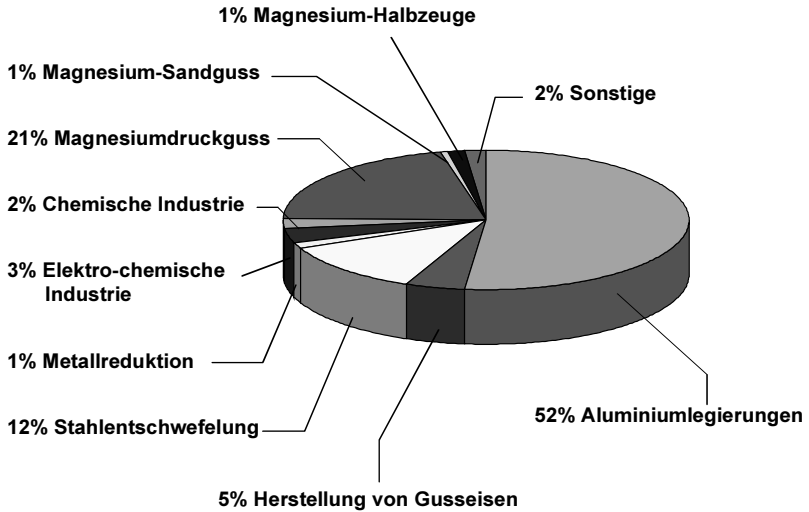


Abbildung 2.1: Anwendungsfelder von Magnesium im Jahr 1995 [CATON 1996]

Die Hauptanwendungsgebiete für Magnesium liegen jedoch nicht im konstruktiven Bereich. Abbildung 2.1 können die industriellen Anwendungsfelder im Jahr 1995 entnommen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass Magnesium hauptsächlich als Legierungselement für Aluminium eingesetzt wird. Magnesiumussteile rangieren an zweiter Stelle mit stark steigender Tendenz. Im Jahr 1997 gingen bereits 28.6% des erzeugten Magnesiums in die Herstellung von Druckussteilen [RIENAB 1999].

2.1.2 Gewinnung und Herstellung von Magnesium

Magnesium steht in der Reihe der technisch wichtigen Metalle an dritter Stelle der Häufigkeit hinter Eisen und Aluminium. Magnesium kommt in der Natur nicht in freier Form vor. Es ist zu 2,24% in Form seiner Verbindungen am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Das bedeutet, dass die Magnesiumvorräte als nahezu unerschöpflich angesehen werden können. Die wichtigsten Materialien zur Magnesiumgewinnung sind Carbonate und Chloride (vgl. Tabelle 2.1) [WINNAKER U.A. 1981].

	Rohstoff	Zusammensetzung	Magnesiumgehalt [%]
Carbonate	Magnesit	MgCO_3	25-28
	Dolomit	$\text{CaCO}_3 \bullet \text{MgCO}_3$	12-13
Chloride	Carnallit	$\text{KCl} \bullet \text{MgCl}_2 \bullet 6\text{H}_2\text{O}$	7-8
	Salzseewasser		0,5-5
	Meerwasser		0,14

Tabelle 2.1: Magnesiumrohstoffe und ihr Magnesiumgehalt [WINNAKER U.A. 1981]

Die Schmelzflusselektrolyse ist das wichtigste Verfahren zur Gewinnung von Magnesium. Etwa 75% der gesamten Magnesiumproduktion wird auf diese Weise durchgeführt. Der restliche Anteil wird mittels thermischer Reduktion hergestellt. Dabei wird Magnesium hauptsächlich aus Magnesit, Dolomit und Meerwasser gewonnen [WINNAKER U.A. 1981]. Trotz des hohen Energieeinsatzes für die Schmelzflusselektrolyse ist der Energieverbrauch, einschließlich aller fossilen Brennstoffe, zur Herstellung von Magnesium bezogen auf das hergestellte Volumen um ca. 7% geringer als bei Aluminium [RIENAU 1999]. Zusätzlich wird beispielsweise bei der Firma Hydro-Magnesium angestrebt, Energie nur aus erneuerbaren Energiequellen wie der Wasserkraft zu verwenden [ALBRIGHT 1995].

2.1.3 Eigenschaften von Magnesium

Magnesium ist mit einer Dichte von $1,74 \text{ g/cm}^3$ um etwa ein Drittel leichter als Aluminium und ca. 75% leichter als Stahl. Es ist damit das leichteste technisch einsetzbare Metall. In Tabelle 2.2 sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften im Vergleich zu Aluminium dargestellt:

Kennwerte			Magnesium	Aluminium
Dichte bei RT	ρ	[g/cm ³]	1,74	2,7
Elastizitätsmodul bei RT	E	[MPa]	45.000	71.900
Härte bei RT	H	[HB]	38	15-25
Zugfestigkeit bei RT	R _m	[MPa]	160-200	450
Schmelzpunkt	T _s	[°C]	649	660
Siedepunkt	T _v	[°C]	1105	2480
Dyn. Viskosität der Schmelze bei T _s	η	[mPa*s]	1.31	1.2
Oberflächenspannung bei T _s	σ_{T_s}	[m/Nm]	580	870
Wärmeausdehnungskoeffizient bei RT	K	[K ⁻¹]	26*10 ⁻⁶	23.5*10 ⁻⁶
Thermische Leitfähigkeit bei RT	λ_{th}	[W/K*m]	155	235
Spez. Wärmekapazität bei RT	c _p	[J/kg*K]	1026	880
Elektrische Leitfähigkeit bei RT	λ_{el}	[m/Ω*mm ²]	22.4	37,7
Elektrischer Widerstand bei RT	R	[nΩ*m]	44.6	26.9
Standardpotential bei RT	U	[V]	-2.37	-1.66

Tabelle 2.2: Physikalische Eigenschaften von Magnesium und Aluminium [WINACKER 1981, KAMMER 1998]

Die hexagonale Kristallstruktur von Magnesium stellt nur eine Basisebene als Gleitebene zur Verfügung, wodurch nur geringe Verformungen bei Raumtemperatur möglich sind. Erst ab 225°C werden weitere Gleitebenen zur Verfügung gestellt, so dass eine Warmumformung möglich ist [EMLEY 1957].

Magnesium zeichnet sich durch eine hervorragende Gießbarkeit aus, da die Magnesiumschmelze sehr dünnflüssig ist und damit ein ausgezeichnetes Fließverhalten zeigt. Ferner hat Magnesium eine geringe Adhäsionsneigung gegenüber Stahlformen, weshalb geringe Ausformschrägen von etwa 0°-1,5° möglich sind [CATON 1996, RUDEN 1991]. Auch zur spanenden Bearbeitung sind gegossene, geschmiedete und gepresste Teile aus Magnesium hervorragend geeignet [HYDRO 1998A].

Nachteile von Magnesium sind die Korrosionsneigung aufgrund seines stark negativen Standardpotentials, die starke Schwindung von etwa 4% bei der Erstarrung [EMLEY 1966] und eine schlechte Kaltumformbarkeit.

2.1.4 Magnesiumlegierungen

Reinmagnesium wird als Konstruktionswerkstoff aufgrund seiner geringen Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit nicht eingesetzt. Verwendung findet Reinmagnesium meist als Opferanode für den kathodischen Schutz von Tanks oder auch Schiffen. Zur Verbesserung der Eigenschaften wird Magnesium daher meist mit verschiedenen Elementen legiert, deren Wirkung in diesem Abschnitt beschrieben wird.

2.1.4.1 Wirkung der Legierungselemente

Im folgenden werden die Einflüsse der wichtigsten Legierungselemente auf die Eigenschaften von Magnesium kurz beschrieben. Ausführliche Hinweise auf die Wirkungsweisen der Legierungselemente können der entsprechenden Literatur entnommen werden. [BECK 1939, EMLEY 1966, KEARNS 1982, KING 1998, ROBERTS 1960, SAKKINEN 1994, SCHUHMANN 1991, WINNACKER U.A. 1981]

- **Aluminium** wird bis zu 10% legiert. Es erhöht die Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Härte. Bei Gusslegierungen liegt das Maximum der Festigkeit bei 6% Aluminium. Bei Knetlegierungen wird eine maximale Festigkeit bei einem Gehalt von 9%-10% Aluminium erreicht. Aluminium wirkt kornfeinend und verbessert die Gießbarkeit mit zunehmenden Gehalt.
- **Zink** wird bis zu 4% legiert. Ein Zn-Zusatz bis zu 3% erhöht die Schwingfestigkeit und die Zugfestigkeit, die durch Anlassen (Aushärten) noch um bis zu 30% gesteigert werden. Ab 5% Zn sinkt die Zugfestigkeit und die Dehnung aufgrund einer Werkstoffversprödung wieder deutlich.
- **Mangan** wird bis zu 2% legiert. Es verbessert die Korrosionsbeständigkeit indem es Eisen bindet und die Ausbildung von MgMn-Deckschichten fördert. Weiterhin wird die Schweißbarkeit, ab ca. 1,5 % auch die Festigkeit, verbessert.

- **Silizium** wird nur in geringen Mengen bis maximal 0,1% legiert, da es die Korrosionsbeständigkeit verschlechtert. Es verringert jedoch die Viskosität und verbessert somit die Gießbarkeit.
- **Zirkonium** wird zur Kornverfeinerung eingesetzt. Durch die Bildung von Zr-Oxiden, die als heterogene Keime wirken, entsteht ein feinkörniges Gefüge mit erhöhter Zugfestigkeit und Abfall der Dehnungskennwerte.
- **Seltene Erden** werden meist in Form eines Mischmetalls (Cer, Lanthan, Neodym, Praeseodym) zulegiert. Seltene Erden führen zur Bildung eines feinkörnigen Gefüges mit stabilen Korngrenzenausscheidungen. Auf diese Weise kann die Kriechbeständigkeit sowie die Warm- und Zugfestigkeit erhöht werden.
- **Eisen, Kupfer und Nickel** vermindern die Korrosionsbeständigkeit sehr stark. Ihr Anteil wurde deshalb für die High-Purity (HP) Legierungen auf wenige ppm-Anteile begrenzt.

Die wichtigsten Legierungsgruppen bilden die Magnesium-Aluminium-Zink- und die Magnesium-Aluminium-Mangan-Legierungen. Die Eigenschaften und Anwendungsfelder dieser beiden Legierungsgruppen werden nach einer Einführung in die Bezeichnung der Magnesiumlegierungen beschrieben.

2.1.4.2 Bezeichnungen

Zur Bezeichnung der Magnesiumlegierungen wird entweder das von der American Society for Testing and Materials (ASTM) eingeführte System oder die deutsche DIN-Norm verwendet. Im Bereich der Magnesium verarbeitenden Industrie haben sich jedoch auch in Deutschland überwiegend die ASTM-Bezeichnungen [ASTM B93-90] durchgesetzt, die auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden sollen.

Diese Bezeichnung besteht aus zwei Buchstaben und zwei Zahlen, wobei die Buchstaben die Hauptlegierungselemente und die Ziffern deren jeweiligen Anteile in Gewichtsprozent (gerundet auf ein Gewichtsprozent) angeben. Zusätzlich können noch Buchstaben und Ziffern nachgestellt werden, die eine Zustandsbezeichnung angeben. Abbildung 2.2 kann die Systematik der Bezeichnung entnommen werden.

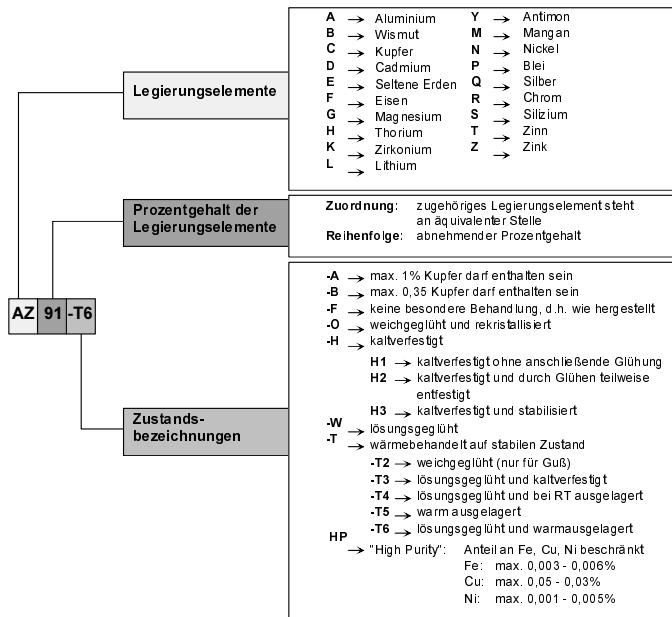


Abbildung 2.2: Legierungsbezeichnung nach dem ASTM-System

Als Beispiel soll die Legierung AZ91 dienen. AZ91 bezeichnet eine Magnesiumlegierung, die mit 9% Aluminium und 1% Zink legiert ist. Nach der deutschen DIN-Bezeichnung entspricht dies der Bezeichnung MgAl9Zn1.

2.1.5 Eigenschaften der Magnesiumlegierungen

Marktanalysen belegen, dass Magnesiumlegierungen zu ca. 28% als Druckgusswerkstoff und nur zu ca. 1% als Knetlegierungswerkstoff eingesetzt werden (vgl. Kapitel 2.1.1). Abbildung 2.3 ist der Anteil der Legierungen zur Herstellung von Bauteilen in der amerikanischen Automobilindustrie 1994 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass die beiden wichtigsten Legierungsgruppen die AZ- und die AM- Legierungen darstellen, wobei die Bedeutung der AM-Legierungen zunehmen wird. Die AS-Legierungen werden weiter eine untergeordnete Rolle spielen [ALBRIGHT & RUDEN 1994]. Die AZ-Legierungen zeichnen sich durch eine hervorragende

Gießbarkeit sowie durch eine hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit aus. Die AM-Legierungen sind etwas schlechter gießbar, werden jedoch bei Anforderungen mit erhöhter Duktilität eingesetzt [ASM 1990, CATON 1996, HAFERKAMP U.A. 1997D]. Im folgenden soll deshalb auf diese beiden Legierungsgruppen näher eingegangen werden.

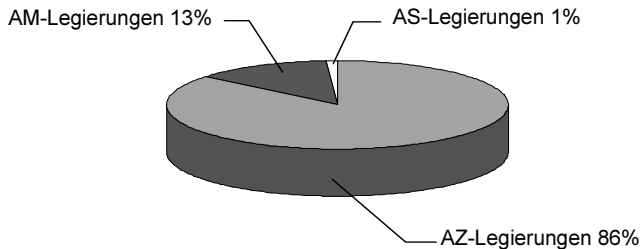


Abbildung 2.3: Anteiliger Einsatz der Legierungen in der amerikanischen Automobilindustrie 1994 [ALBRIGHT & RUDEN 1994]

2.1.5.1 Mechanische Eigenschaften der AZ-Legierungen

2.1.5.1.1 Gusslegierungen

Magnesium-Aluminium-Zink-Gusslegierungen werden beispielsweise für Gehäuse, Sportgeräte und Handwerkzeuge verwendet [HYDRO 1998B]. Der wichtigste Vertreter dieser Legierungsgruppe für industrielle Anwendungen ist AZ91, da AZ91 die höchsten Werte für die Zugfestigkeit und $R_{p0,2}$ -Dehngrenze aufweist. In Tabelle 2.3 sind die mechanischen Eigenschaften von druckgegossenem AZ91HP zusammengefasst.

Zugfestigkeit	R_m	[MPa]	240
0,2%-Dehngrenze	$R_{p0,2}$	[MPa]	160
Druckfestigkeit	P	[MPa]	148
Bruchdehnung	A	[%]	3
Elastizitätsmodul	E	[MPa]	45000
Schermodul	G	[MPa]	17000
Härte	H	[HB]	70
Schlagfestigkeit Charpy, ohne Kerbe	A_v	[J]	6

Tabelle 2.3: Mechanische Eigenschaften der Legierung AZ91HP [HYDRO 1998B]

In der Regel werden die AZ-Legierungen als HP-Legierung eingesetzt, um die erhöhte Korrosionsbeständigkeit auszunutzen. Sie weisen aufgrund des hohen Aluminiumgehaltes eine sehr gute Gießbarkeit auf. Nur an Wanddickenübergängen kann es zur Bildung von Mikrolunkern kommen. Die Zerspanbarkeit ist, wie bei fast allen Magnesiumlegierungen, sehr gut. Das Verformungsvermögen ist aufgrund der hexagonalen Gitterstruktur stark eingengt. AZ-Legierungen sind außerdem sehr gut schweißbar.

2.1.5.1.2 Knetlegierungen

Magnesium-Knetlegierungen werden hauptsächlich zur Herstellung von Halbzeugen eingesetzt. Dies liegt an der schlechten Umformbarkeit von Magnesium bei Raumtemperatur. Die Verarbeitung durch Schmieden, Walzen oder Strangpressen erfolgt deshalb meist bei Temperaturen oberhalb von 350°C. Anwendungsfelder sind beispielsweise die Herstellung von Profilen für schnell oszillierende Komponenten in Textil-, Druck- oder Verpackungsmaschinen [FISCHER 1999].

Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind die Legierungen AZ31 und AZ61. Die Legierung AZ31 liegt in den Varianten AZ31-A, AZ31-B und AZ31-C vor. Die A-Version ist aufgrund des hohen Calciumgehaltes von 0,1 -

0,16% nur bedingt schweißbar und wird nur selten eingesetzt. Die B-Version wird überwiegend zur Herstellung von Blechen eingesetzt und ist gut schweißbar. Die C-Version findet hauptsächlich im Strangpressbereich Anwendung. Sie ist ebenfalls gut schweißbar.

Die Legierung AZ61 besitzt hervorragende Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften (vgl. Tabelle 2.4). AZ61 wird im Strangpress- und Schmiedebereich eingesetzt. Die Herstellung von Blechen gestaltet sich schwierig, da der hohe Al-Gehalt leicht zu Anrissen beim Walzen führen kann.

			AZ31	AZ61
Zugfestigkeit	R_m	[MPa]	225(T)/250(L)	294(T)/300(L)
0,2%-Dehngrenze	$R_{p0,2}$	[MPa]	110(T)/180(L)	137(T)/220(L)
Druckfestigkeit	P	[MPa]	110	130
Bruchdehnung	A	[%]	10	9
Elastizitätsmodul	E	[MPa]	45.000	47.000
Schermodul	G	[MPa]	17.000	17.000
Härte	H	[HB]	50-60	50-60
Schlagfestigkeit Charpy, V-Kerbe	A_v	[J]	4.3	3

Tabelle 2.4: Mechanische Eigenschaften von AZ31 und AZ61, Strangrichtung: L=längs, T=transversal [ASM 1990, KEARNS 1982, FISCHER 1999]

2.1.5.2 Mechanische Eigenschaften der AM-Legierungen

Magnesium-Aluminium-Mangan-Legierungen finden im Automobilbereich hauptsächlich bei crash-relevanten Bauteilen Anwendung, da diese eine erhöhte Duktilität erfordern. Beispiele für typische Bauteile aus AM-Legierungen sind Instrumententafelträger, Sitzrahmen und Lenkräder [HYDRO 1998B]. AM-Legierungen werden überwiegend im Druckgussverfahren hergestellt und sind gut schweißbar.

Die wichtigsten Vertreter dieser Legierungsgruppe sind AM60, AM50 und AM20. AM 20 weist die höchste Duktilität auf, ist aber schwer zu vergießen.

Industriell wird die Legierung AM50 am häufigsten eingesetzt, da diese gut vergießbar ist, gute Korrosionseigenschaften aufweist und dennoch hohe Festigkeiten erreicht werden. In Tabelle 2.5 sind die mechanischen Eigenschaften der Legierungen AM20, AM50 und AM60 zusammengefasst dargestellt.

			AM20	AM50	AM60
Zugfestigkeit	R_m	[MPa]	190	210	225
0,2%-Dehngrenze	$R_{p0,2}$	[MPa]	90	125	130
Druckfestigkeit	P	[MPa]	90	125	130
Bruchdehnung	A	[%]	20	15	13
Elastizitätsmodul	E	[MPa]	45.000	45.000	45.000
Schermodul	G	[MPa]	17	17	17
Härte	H	[HB]	45	60	65
Schlagfestigkeit Charpy, ohne Kerbe	A_v	[J]	18	18	18

Tabelle 2.5: Mechanische Eigenschaften von AM20, AM50 und AM60 [HYDRO 1998b, ARGE 1998, AUNE & WESTENGEN 1996]

2.1.5.3 Metallurgische Eigenschaften

Zur Beurteilung von Schweißverbindungen müssen insbesondere die metallkundlichen Vorgänge im geschweißten Werkstoff bekannt sein. Im folgenden soll deshalb ein kurzer Überblick über das metallurgische Verhalten der Magnesiumlegierungen gegeben werden. Der Hauptlegierungsbestandteil der in dieser Arbeit verwendeten Magnesiumlegierungen ist Aluminium. Daher soll im folgenden das Phasendiagramm des Zweistoffsystems Magnesium-Aluminium betrachtet werden (s. Abbildung 2.4).

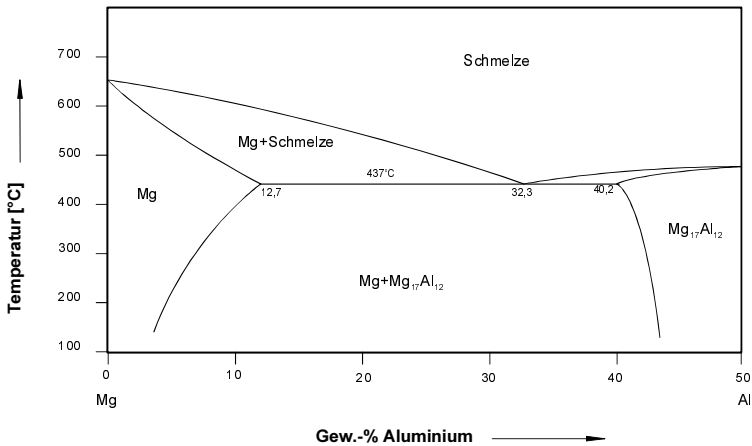


Abbildung 2.4: Magnesium-Aluminium-Phasendiagramm (vereinfacht) nach SCHUHMANN (1991)

Es zeigt sich, dass für die hauptsächlich eingesetzten Magnesiumlegierungen mit einem Aluminiumanteil von bis zu 10% bei einer gleichgewichtigen Erstarrung ein Gefüge aus primär erstarrten Mg-Mischkristallen und aus den aluminiumreichen Mischkristallen $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ entsteht.

Aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeiten beim Gießen und der noch wesentlich höheren Abkühlgeschwindigkeiten beim Laserstrahlschweißen liegt jedoch keine gleichgewichtige Erstarrung vor. Durch die schnelle Abkühlung der Schmelze kristallisieren zunächst primäre Mg-Mischkristalle mit niedrigem Al-gehalt aus. Bei fortschreitender Abkühlung nimmt die Menge an primär erstarrten Mg-Mischkristallen zu und die Restschmelze reichert sich mit Aluminium an. Beim Unterschreiten der eutektischen Temperatur erstarrt die Restschmelze in den sekundär übersättigten Mg-Mischkristall mit 12,7% Aluminium und in die intermetallische Verbindung $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ [DRAUGELATES U.A. 1998C]. Der übersättigte Mg-Mischkristall kann auch bei Raumtemperatur aufgrund der geringen Diffusionsgeschwindigkeit von Magnesium in Aluminium weiter bestehen. Es bildet sich deshalb ein Gefüge mit großen Körnern aus dem primär erstarrten Mg-Mischkristall. Zwischen den Körnern bildet sich das Korngrenzeneutektikum aus dem sekundär erstarrten Mg-Mischkristall und der intermetallischen Verbindung

$Mg_{17}Al_{12}$ (vgl. Abbildung 2.5). Dem Korngrenzeneutektikum kommt besonders für das Gießen eine große Bedeutung zu, da zu geringe Mengen die Bildung von Schrumpfrissen fördern. Auch beim Schweißen ist dieses Korngrenzeneutektikum entscheidend für die Qualität der Schweißnähte. Hohe Zinkgehalte von über 1% beispielsweise können die Bildung von Heiß- oder Mikrorissen verhindern. [BAESLACK U.A. 1986, DARGUSCH 1998, EMLEY 1957, HAFERKAMP U.A. 1997c, KOPP 1996, SANNES & WESTENG 1998, STOLBOV U.A. 1991]

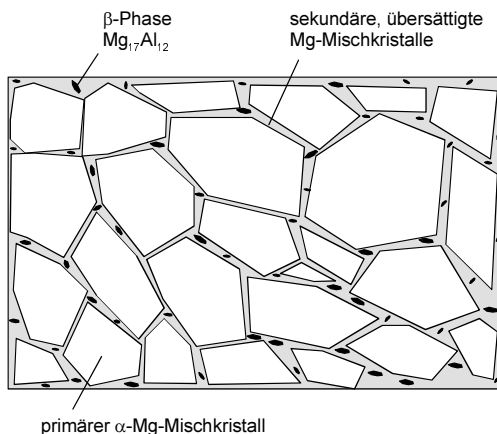


Abbildung 2.5: Gefügestruktur von Magnesiumlegierungen (schematisch)

2.1.5.4 Thermophysikalische Eigenschaften

Neben den metallurgischen Eigenschaften spielen insbesondere auch die thermophysikalischen Eigenschaften der Legierung eine entscheidende Rolle für die Schweißseignung eines Werkstoffes. In Tabelle 2.6 werden daher ausgewählte thermophysikalische Eigenschaften der beiden für den industriellen Einsatz wichtigsten Magnesiumdruckgusslegierungen zusammengefasst. Für das Verhalten dieser physikalischen Kennwerte bei erhöhter Temperatur, beispielsweise für Simulationsrechnungen, sei an dieser Stelle auf spezielle Literatur verwiesen [Kaschnitz & Funk 1997a, Kaschnitz & Funk 1997b und Kaschnitz & Funk 1997c].

Es ist zu erkennen, dass aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit und des niedrigen Schmelz- und Siedepunktes eine gute Schweißeignung für das Laserstrahlschweißen zu erwarten ist [HAFERKAMP U.A. 1997c]. Vorteilhaft ist ferner die geringe notwendige Energiezufuhr zum Schmelzen der Legierungen.

			AZ91	AM50
Dichte bei RT	ρ	[g/cm ³]	1,81	1,77
Wärmeleitfähigkeit bei RT	λ_{th}	[W/m*K]	51	61
Spez. Wärmekapazität bei RT	C_p	[J/kg*K]	1020	1020
Schmelztemperatur	T_s	[°C]	598	620
Verdampfungstemperatur	T_v	[°C]	1100	1100
Wärmeausdehnungskoeff. RT-100°C	K	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	26	26
Schmelzwärme	Q_s	[kJ/kg]	370	370

Tabelle 2.6: Physikalische Kennwerte der Legierungen AZ91 und AM50 [ASM 1990, ARGE 1998, HYDRO 1998b]

2.1.6 Magnesiumdruckguss

Da Magnesium überwiegend im Druckgussverfahren hergestellt wird, soll im folgenden auf das Druckgussverfahren näher eingegangen werden. Es werden resultierende Eigenschaften hinsichtlich der Schweißbarkeit der hergestellten Bauteile beleuchtet.

2.1.6.1 Verfahrensbeschreibung

Beim Druckgießen wird flüssiges Metall mit hoher Geschwindigkeit und hohem Druck durch Einpressen in metallische Dauerformen gefüllt. Die beiden Formhälften werden dabei hydraulisch zusammengehalten. Das

Einpressen erfolgt sehr rasch (5-100 ms) [KLEIN 1992]. Anschließend erstarrt das Metall sehr schnell (100-1000 K/s), wodurch ein feinkörniges Gefüge entsteht. Nach der Erstarrung wird die Form geöffnet und das fertige Bauteil mit Auswerfern aus der Form gedrückt.

Aufgrund des hohen Drucks strömt das Metall auch in engste Querschnitte, was das Gießen von dünnen Wandstärken erlaubt. Vorteile dieses Verfahrens sind äußerst maßgenaue Gussteile (Toleranzen in der Regel 0,05-0,2 mm; in Sonderfällen auch bis zu 0,005 mm erreichbar) mit hoher Oberflächenqualität [GEISER 1978, RUDEN 1991]. Ferner wird eine hohe Wirtschaftlichkeit aufgrund der hohen Strömungs- und damit Prozessgeschwindigkeiten erreicht. Die hohen Werkzeug- und Maschinenkosten können so bei mittleren und großen Stückzahlen ausgeglichen werden.

Zum Druckgießen werden zwei Methoden - das **Kaltkammer-** und das **Warmkammerverfahren** - eingesetzt (Abbildung 2.6 und Abbildung 2.7). Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Verfahren ist die Art der Formfüllung.

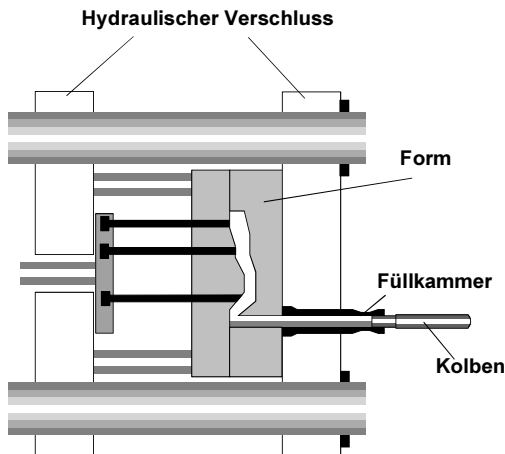


Abbildung 2.6: Schema des Kaltkammer-Druckgussverfahrens [GEISER 1978, KRAFT 1971]

Beim **Kaltkammerverfahren** befinden sich alle Teile außerhalb des flüssigen Metalls. Das flüssige Metall wird entweder per Hand oder mit einer automatisierten Dosiereinrichtung in die Füllkammer eingefüllt. Im Gegensatz dazu wird beim **Warmkammerverfahren** eine Kolbenpumpe in den Gießtiegel eingetaucht und das flüssige Metall mit der Pumpe aus dem Schusszylinder in die Gießkammer gedrückt, wobei der Gießkolben bzw. die Pumpe mit langsamer Geschwindigkeit nach vorne gefahren wird, bis das flüssige Metall in der Gießkammer aufgestaut ist. Anschließend wird der Gießkolben mit hoher Geschwindigkeit weiter nach vorne gefahren und das flüssige Metall durch den Anschnitt in die Form gepreßt. Das flüssige Metall erreicht dabei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 30 – und 50 m/s im Anschnitt. Nach der Formfüllung erfolgt nochmals ein Druckanstieg, um das bereits erstarrende Metall nachzuverdichten.

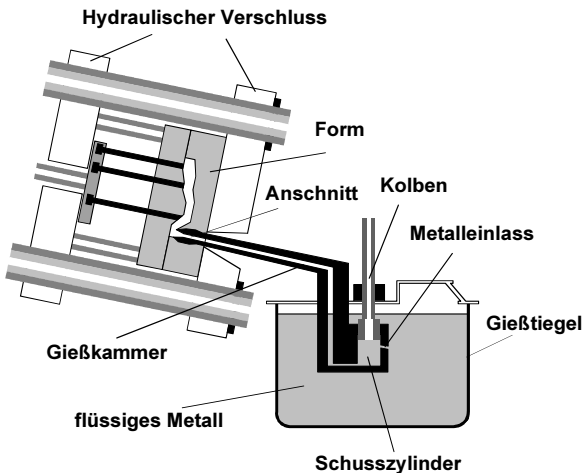


Abbildung 2.7: Schema des Warmkammer-Druckgussverfahrens [GEISER 1978, KRAFT 1971]

Das **Kaltkammerverfahren** ist geeignet für alle druckgießfähigen Metalle (Aluminiumlegierungen, Messing, Magnesium-, Zink-, Zinn- und Bleilegierungen). Die Schließ- und Zuhaltekräfte können bis zu 40.000 kN betragen. Auf diese Weise lassen sich sehr große Gussstücke fertigen.

Das **Warmkammerverfahren** ist hauptsächlich für Magnesium- und Zinklegierungen geeignet. Es lassen sich bei diesem Verfahren jedoch nur relativ niedrige Schließ- und Zuhaltekräfte von bis zu 4.000 kN realisieren. Auf diese Weise können deshalb nur kleinere bis mittelgroße Gussstücke gefertigt werden. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der höheren Schusszahl, die erreicht werden kann, und der niedrigeren Gießtemperatur.

2.1.6.2 Eigenschaften druckgegossener Bauteile

Beim Druckgießen können durch die Kontraktion bei der Erstarrung des flüssigen Metalls, insbesondere an Wanddickenübergängen Mikrolunker entstehen. Dies sind Fehlstellen im Guss, die zu einer Verringerung der Festigkeit durch Querschnittsverminderung führen.

Von besonderer Problematik beim Schmelzschweißen stellt sich der Gasgehalt des Gusses dar. Die Gaseinschlüsse können entweder als im Kristallgitter gelöster Wasserstoff oder als in Hohlräumen eingeschlossenes Gas vorliegen. Gaseinschlüsse in Hohlräumen können beim Schweißen zu Schmelzbadauswürfen führen, da diese Hohlräume meist unter hohem Druck stehen. Eine Zwangsentlüftung mit einem Vakuum-Ventil des Formhohlraums kann hier Abhilfe schaffen.

Im Kristallgitter gelöstes Gas führt beim Schweißen zur Bildung von Poren in der Schweißnaht und somit zu einer Querschnitts- und Festigkeitsverminderung. Für die Wasserstoffaufnahme im Guß kommen eine Vielzahl von Quellen innerhalb des Gießprozesses in Betracht. Die Schmelze reagiert mit wasserabspaltenden Kolbensmier- und Formtrennstoffen. Wasser- bzw. Feuchtigkeitsaufnahme im Guss erfolgt zu 90% aus Reaktionen in der Druckgießmaschine. Weitere Quellen sind insbesondere der Wasserstoffgehalt der Schmelze sowie die atmosphärischen Bedingungen bei Schöpfungsvorgängen und in den Warmhalte- und Dosieröfen [NÖRENBERG & RUGE 1992].

2.1.7 Sicherheitsaspekte beim Umgang mit Magnesium

Der Umgang mit Magnesium in Deutschland ist derzeit in der Gefahrstoffverordnung rechtlich geregelt. Im Entwurf der ZH1/328 „Regeln

für Sicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit Magnesium“ sind die für die Übergangsphase bis zur Neuerlassung der überarbeiteten TRGA509 wichtigen Vorgaben und Erkenntnisse zusammengefasst [WASSENHOVEN 1997]. Ferner regeln eine Vielzahl von weiteren Verordnungen und Gesetzen den Umgang mit Magnesium. Zu nennen sind hier beispielsweise das Gerätesicherheitsgesetz, die Richtlinie für Geräte und Schutzsysteme in explosionsgefährdeten Bereichen, die Arbeitsstättenverordnungen und -Richtlinien, die UVV VBG 1 „Allgemeine Richtlinien“ oder die VDI-Richtlinie 2263 „Staubbrände und Staubexplosionen“.

Magnesium ist in kompakter Form unkritisch. Magnesiumstäube und -späne hingegen sind leicht entzündlich. Es kann zu Bränden und bei Stäuben aufgewirbelt in Mischung mit Luft zu Explosionen kommen. Aufgrund der hohen Reaktivität des Magnesiums kann eine Selbstentzündung nicht völlig ausgeschlossen werden. Insbesondere bei der Berührung mit Wasser reagiert Magnesium unter Freisetzung von Wasserstoff, wodurch eine Knallgasreaktion hervorgerufen werden kann.

Zu unmittelbar gefährlichen Reaktionen zwischen Magnesium und einem geeigneten Reaktionspartner kann es in schmelzflüssigem Zustand kommen. Die Magnesiumschmelze entzündet sich bereits an Luft und brennt an der Oberfläche. Bei Magnesiumbränden entstehen Temperaturen von bis zu 3000°C. Ein Löschen mit Wasser ist deshalb nicht möglich. Wasser wird bei diesen Temperaturen in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Knallgasreaktionen sind die Folge.

Aus diesen Gründen sind insbesondere beim Gießen und bei der spanabhebenden Bearbeitung von Magnesium besondere Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Dies betrifft beispielsweise eine sichere Abdeckung der Schmelzbäder von Magnesium und das Fernhalten von Zündquellen beim Gießen. Für die spanende Bearbeitung sollte beachtet werden, dass Stäube und Späne beseitigt werden, bevor große Mengen angehäuft werden. Ferner ist die Aufwirbelung von Magnesiumstäuben zu vermeiden. Im Fall von Bränden muss unbedingt darauf geachtet werden, dass kein Wasser zum Löscheinsatz verwendet wird. Zum Löschen eignen sich beispielsweise trockene, rostfreie Graugussspäne, Sand oder ein Pulverlöcher Brandklasse D. Eine Einweisung aller im Gefahrenbereich befindlichen Personen ist selbstverständlich.

Zum Schweißen von Magnesium bzw. seiner Legierungen existieren derzeit keine speziellen Vorschriften. Beachtet werden müssen jedoch neben den oben genannten die Richtlinien zum Schweißen, wie die Unfallverhütungsvorschrift (UVV) „Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren“ (VGB 15) sowie die allgemeinen Richtlinien wie die UVV "Allgemeine Richtlinien" (VGB 1). Für das Arbeiten mit Laserstrahlung existieren unter anderem die UVV "Laserstrahlung" (GUV 2.20) sowie die Norm DIN EN 60825-1 "Sicherheit von Laser-Einrichtungen; Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien".

2.1.8 Zusammenfassung

Magnesium bzw. seine Legierungen werden zunehmend an Bedeutung als Konstruktionswerkstoff gewinnen. Dies trifft insbesondere für die korrosionsbeständigen, hochreinen HP-Legierungen zu. Magnesiumlegierungen können sehr gut im Druckgießverfahren verarbeitet werden. Hochkomplexe Teile mit dünnen Wandstärken können in sehr engen Toleranzen mit dem Druckgießen gefertigt werden. Eine umformende Bearbeitung ist jedoch nur als Warmumformung möglich. Hier ist von Vorteil, dass Magnesiumlegierungen eine niedrige spezifische Wärmekapazität und einen niedrigen Schmelzpunkt haben. Aufgrund ihrer günstigen thermophysikalischen Eigenschaften eignen sich Magnesiumlegierungen darüber hinaus insbesondere auch für das Laserstrahlschweißen.



Abbildung 2.8: Vorteile des Werkstoffs Magnesium bzw. seiner Legierungen

Der hohe Preis für Magnesiumlegierungen wird durch diese günstigen Eigenschaften und besonders durch die geringe Dichte relativiert. Dies wirkt sich auch auf die Schmelzkosten im Hinblick auf den Energieaufwand für ein Bauteil und das im Kreislauf befindliche Material positiv aus.

Als wichtige Vertreter sind die Druckgusslegierungen AZ91 und AM50 zu nennen. Bei den Strangpresslegierungen sind dies die Legierungen AZ31 und AZ61. In Abbildung 2.8 sind die Vorteile von Magnesiumlegierungen nochmals zusammengefasst.

2.2 Laser

Im Rahmen dieses Abschnittes wird auf die grundlegenden Eigenschaften verschiedener Laser und das Laserstrahlschweißen eingegangen. Dazu werden zunächst kurz die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten des Lasers zur Materialbearbeitung vorgestellt. Anschließend wird anhand der Beschreibung des Aufbaus einer Laseranlage auf die wichtigsten

Komponenten bei der Lasermaterialbearbeitung eingegangen und die wichtigsten Lasertypen zum Laserstrahlschweißen werden vorgestellt. Zum Verständnis des Laserstrahlschweißens werden die physikalischen Vorgänge beim Laserstrahlschweißen behandelt. Abschließend werden die Einflussgrößen beim Laserstrahlschweißen vorgestellt.

2.2.1 Laser in der Materialbearbeitung

Der Laser zeichnet sich besonders durch seine Flexibilität hinsichtlich möglicher Prozesse aus. *Geiger & Lutz* (1995) schreiben dazu, dass der Laser das einzige Werkzeug ist, das in allen Hauptgruppen der Fertigungstechnik eingesetzt werden kann. Die Vorteile des Lasereinsatzes sind einerseits die berührungslose und damit verschleißfreie Bearbeitung. Andererseits können je nach verfügbarer Laserquelle und den dynamischen Eigenschaften des Handhabungsgerätes hohe Prozessgeschwindigkeiten erreicht werden. Weitere Vorteile sind die geringe Wärmeeinbringung in das Bauteil, die gute Automatisierbarkeit und die hohe kinematische Flexibilität [LINDL U.A. 1995]. So läßt sich auch der rasante Anstieg von ca. 20% pro Jahr an verkauften Laserquellen bzw. Lasieranlagen (Laserquelle und Handhabungsgerät) erklären [POPRAWA U.A. 1998]. Abbildung 2.9 ist die Entwicklung des Lasermarktes in den letzten Jahren zu entnehmen.

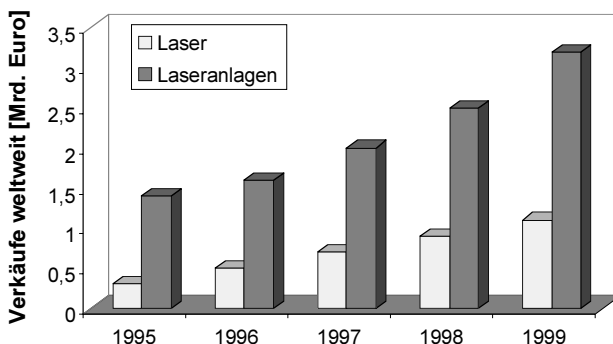


Abbildung 2.9: Entwicklung des Lasermarktes in den letzten Jahren [POPRAWA 2000, VDMA 1999]

Hemmnisse für den Lasereinsatz ergeben sich aus hohen Investitionskosten für eine Laseranlage. Ein wirtschaftlicher Einsatz setzt voraus, dass zum Beispiel durch den Lasereinsatz Prozessschritte eingespart werden können, die Bearbeitungszeit erheblich verkürzt wird oder eine bessere Produktqualität den Lasereinsatz rechtfertigt [LINDL U.A. 1995].

Je nach Bearbeitungsaufgabe werden dabei verschiedene Lasertypen eingesetzt. Der grundsätzliche Aufbau von Laseranlagen und die für eine Schweißbearbeitung wichtigsten Lasertypen werden deshalb im weiteren näher betrachtet.

2.2.2 Aufbau einer Laseranlage

Nach DIN EN ISO 11145 ergibt sich der Aufbau einer Laseranlage nach dem in Abbildung 2.10 dargestellten Schema.

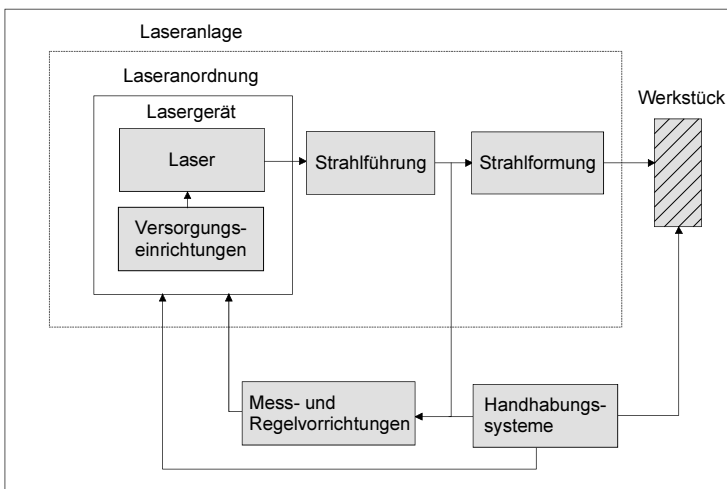


Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau einer Laseranlage (DIN EN ISO 11145)

2.2.3 Laserstrahlquellen

Die Laserstrahlquellen lassen sich nach der Art des laseraktiven Mediums in die Gruppen Gaslaser und Festkörperlaser einteilen. Zum Laserstrahlschweißen von Metallen in industriellen Anwendungen kommen derzeit hauptsächlich aus dem Bereich der Gaslaser die Kohlendioxid-Laser (CO_2 -Laser) und aus dem Bereich der Festkörperlaser die lampengepumpten Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG-Laser) zum Einsatz. Diodengepumpte Nd:YAG-Laser und Hochleistungsdiodenlaser (HLDL) sind beim Laserstrahlschweißen von Metallen bis zum heutigen Zeitpunkt noch von untergeordneter Bedeutung. Es ist jedoch zu erwarten, dass sie in Zukunft aufgrund der derzeitigen konsequenten Entwicklungsarbeit an diesen Strahlquellen zunehmend an Bedeutung gewinnen [POPRAWE 2000].

2.2.3.1 CO_2 -Laser

CO_2 -Laser gehören zur Gruppe der Gaslaser. Als Lasermedium dient ein Gasgemisch aus Kohlendioxid (CO_2), Helium (He) und Stickstoff (N_2), das schnell durch den Resonator strömt. Die Anregung erfolgt über eine Hochfrequenzentladung. Der erzeugte Strahl wird über ein Spiegelsystem zur Bearbeitungsstelle geführt. Der letzte Spiegel dient dabei zur Strahlformung. Eine ausführliche Beschreibung der physikalischen Grundlagen des CO_2 -Lasers kann HÜGEL (1992) entnommen werden. In Abbildung 2.11 ist der prinzipielle Aufbau eines CO_2 -Lasers dargestellt.

Der größte Vorteil von CO_2 -Lasern ist die hohe, auch in industriellen Anwendungen, verfügbare Leistung von bis zu 20 kW und der relativ hohe Wirkungsgrad von 5-10%. Ferner ist der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand gering, da als Verschleißteil prinzipiell nur die Vakuumpumpe bzw. das Gebläse in Frage kommt. Nachteilig wirkt sich die Wellenlänge von $\lambda = 10640 \text{ nm}$ aus. Der Laserstrahl muss deshalb über ein Spiegelsystem zur Bearbeitungsstelle geführt werden, weshalb sich der CO_2 -Laser hauptsächlich für Anwendungen im zweidimensionalen Bereich eignet. Aufgrund der langen Wellenlänge ergibt sich im Vergleich zum Nd:YAG-Laser ein schlechteres Absorptionsverhalten bei Eisen, Aluminium und verschiedenen Magnesiumlegierungen (vgl. Abbildung 2.13).

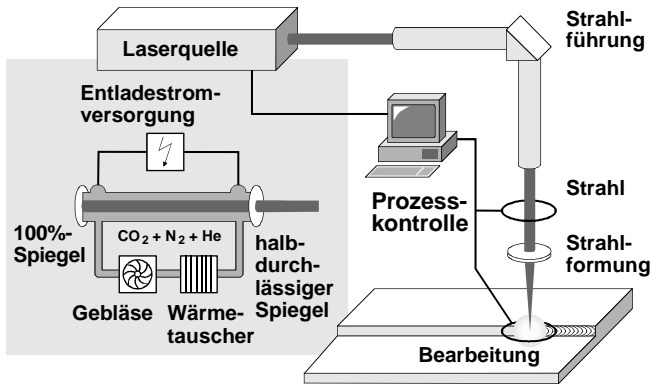


Abbildung 2.11: Aufbau eines CO₂-Lasers (schematisch)

2.2.3.2 Nd:YAG-Laser

Nd:YAG-Laser gehören zur Gruppe der Festkörperlaser. Dabei wird ein mit Neodym-Ionen (Nd³⁺) dotierter Kristallstab aus Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) als laseraktives Medium verwendet. Zur Anregung dienen Blitzlampen. Der erzeugte Laserstrahl kann über eine Lichtleitfaser zur Bearbeitungsstelle geführt werden. Die Strahlformung erfolgt über Linsen. Industriell verfügbar sind Laser bis zu 6 kW Leistung. In Abbildung 2.12 ist der prinzipielle Aufbau eines Nd:YAG-Lasers dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der physikalischen Grundlagen kann HÜGEL (1992) entnommen werden.

Die Vorteile des Nd:YAG-Lasers liegen in der kurzen Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm. Das Nd:YAG-Laserlicht kann deshalb in Lichtleitfasern eingekoppelt werden, weshalb sich dieser insbesondere auch für dreidimensionale Bearbeitungsaufgaben eignet. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass das Absorptionsverhalten bei Eisen, Aluminium und Magnesium wesentlich günstiger ist (vgl. Abbildung 2.13).

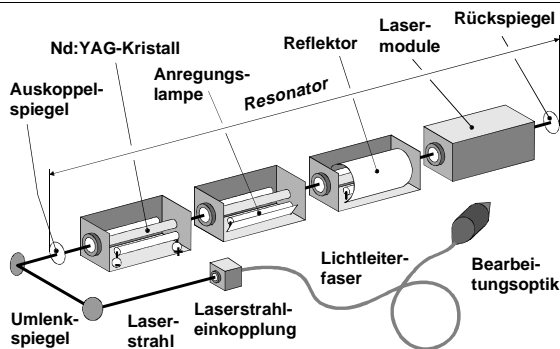


Abbildung 2.12: Aufbau eines Nd:YAG-Lasers (schematisch)

Nachteilig wirken sich der hohe Instandhaltungsaufwand aufgrund des häufigen Lampenwechsels und der geringe Wirkungsgrad von etwa 1% aus. Zur Verbesserung dieser Problematik werden deshalb seit kurzem auch Diodenlaser zur Anregung des Nd:YAG-Kristallstabes eingesetzt. Nach industriellen Angaben können damit die häufigen Lampenwechsel vermieden werden, da eine Standzeit der Laserdioden von 10.000 h erwartet wird. Zusätzlich kann eine Erhöhung des Wirkungsgrades und der Strahlqualität des Nd:YAG-Lasers mit diesem Prinzip realisiert werden.

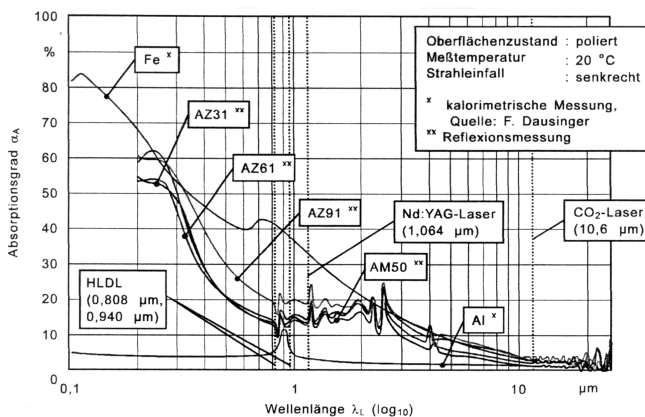


Abbildung 2.13: Absorptionsverhalten von Eisen, Aluminium und verschiedenen Magnesiumlegierungen [NIEMEYER 1999]

Aufgrund des günstigen Absorptionsverhaltens wurden im Rahmen dieser Arbeit für alle Untersuchungen mit einem lampengepumpten Nd:YAG-Laser durchgeführt. Ein diodengepumpter Nd:YAG-Laser stand für die Untersuchungen nicht zur Verfügung.

2.2.4 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen gehört nach DIN 8580 zur Hauptgruppe "Fügen" der Fertigungsverfahren. In DIN 8593 werden die Fügeverfahren weiter unterteilt. Laserstrahlschweißen ist demnach der Untergruppe "Fügen durch Schweißen" zuzuordnen. Diese Untergruppe ist weiter gegliedert nach den Merkmalen "physikalischer Vorgang" und "Energieträger". Dabei wird zunächst nach Schmelz- und Pressverbindungs-schweißverfahren unterschieden. Die Schmelzverbindungs-schweißverfahren gliedern sich weiter nach den Energieträgern Gas, elektrische Gasentladung, Flüssigkeit, elektrischer Strom und Strahl. Das Laserstrahlschweißen ist somit in die Untergruppe 4.6.2.5 "Schmelzverbindungs-schweißen durch Strahl" [DIN 8593-6] eingeordnet. Dabei entsteht eine feste, nicht lösbare Verbindung.

2.2.4.1 Vorteile und Potentiale des Laserstrahlschweißens

Der wichtigste Unterschied des Laserstrahlschweißens zu konventionellen Schmelzschweißverfahren ist die konzentrierte lokale Energieeinbringung bei gleichzeitig hohen Prozessgeschwindigkeiten und damit sehr geringen Streckenenergien. Darüber hinaus lässt sich der Laser bei geeigneter Handhabungstechnik äußerst präzise positionieren. Zusammen eröffnen diese Eigenschaften eine Vielzahl neuer konstruktiver Möglichkeiten (s. auch Abbildung 2.14) wie

- günstigere mechanisch-technologische Eigenschaften,
- neue Nahtvarianten, z.B. Stichnaht am T-Stoß,
- neue Werkstoffe / Werkstoffkombinationen: Magnesium, Kunststoff, Stahl-Aluminium,
- Verbindungen bei einseitiger Zugänglichkeit,
- Gewichtsreduzierung durch Verringerung von Flanschbreiten,
- Erhöhung der Steifigkeit mit durchgehenden Schweißnähten,

- umformbare Fügeverbindung (Innen-Hochdruck-Umformen, Tailored Blanking).

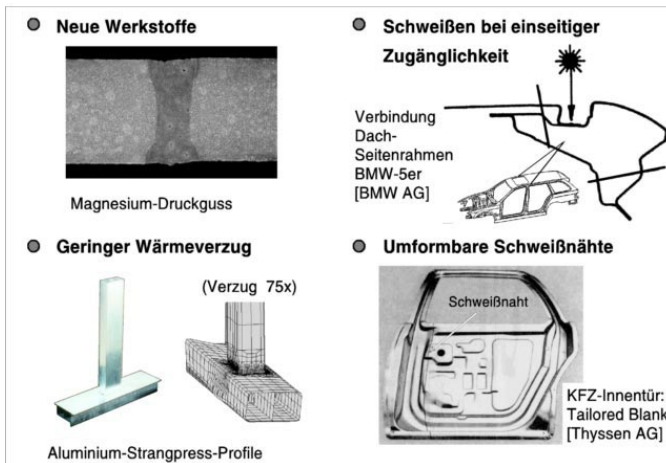


Abbildung 2.14: Konstruktive Möglichkeiten und Vorteile des Laserstrahlschweißens [Rick 1998]

Neben den vielfältigen neuen konstruktiven Möglichkeiten, die das Laserstrahlschweißen eröffnet, tragen auch die fertigungstechnischen Vorteile wesentlich zum wirtschaftlichen Einsatz des Lasers bei. Diese sind insbesondere:

- die hohen Prozessgeschwindigkeiten,
- die gute Schweißnahtqualität,
- der geringe Wärmeeinfluss / -verzug.

2.2.4.2 Lasergerechte Nahtformen

In Abbildung 2.15 sind die wichtigsten Nahtarten dargestellt. Eine ausführliche Betrachtung der unterschiedlichen Nahtarten und -formen bezüglich Dünnblechverbindungen findet sich beispielsweise in RADAJ (1994) und ZOPF (1995).


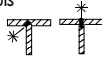




I-Naht am Stumpfstoß  <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - optimaler Kraftfluss - optimaler Leichtbau - keine Entgasungsprobleme <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - sehr hohe Toleranzanforderungen - sehr hoher Spann- und Positionieraufwand 	Kehlnaht, Stichnaht am T-Stoß  <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - guter Kraftfluss - optimaler Leichtbau - gute Entgasung <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hohe Fertigungsgenauigkeit d. Füge- teile / Positioniergenauigkeit erforderlich - hoher Spannaufwand
I-Naht am Überlappstoß  <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - geringe Toleranzansprüche - geringe Umleitung des Kraftflusses <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gefahr von Spaltkorrosion - schlechte Entgasung 	I-Naht am Flansch  <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - einfache Positionierung - geringe Toleranzanforderung <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kraftflussauslenkung - Spaltkorrosion - Schwierige Entgasung
Kehlnaht am Überlappstoß  <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einseitiges Abdecken - gute Spannbareit - guter Kraftfluss <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hohe Toleranz- und Positionier- ansprüche 	Bördelnaht am Flanschanfang  <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - guter Kraftfluss - einseitige Spannung <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hoher Materialaufwand - Schwierige Entgasung

Abbildung 2.15: Nahtformen für das Laserstrahlschweißen und ihre Vor- und Nachteile hinsichtlich Dünnblechverbindungen (nach RADAJ (1994))

Beim Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen können zwei Prozessphänomene, das Wärmeleitungsschweißen und das Tiefschweißen, beobachtet werden, die im weiteren beschrieben werden.

2.2.4.3 Wärmeleitungsschweißen

Beim Wärmeleitungsschweißen erwärmt der durch den Werkstoff absorbierte Teil der Energie des Laserstrahls die Oberfläche des bearbeiteten Materials. Die Wärme wird aufgrund der Wärmeleitung von Metallen in das Bauteil abgeleitet. Ist die zugeführte Energie größer als die durch Wärmeleitung abgeführte Energie wird die Oberfläche so stark erwärmt, dass sie aufgeschmolzen wird. Die Schmelzfront wächst weiter in den Werkstoff hinein. Dadurch entsteht nach dem Erstarren der Schmelze eine Verbindung zwischen den beiden Fügepartnern, wenn der fokussierte Laserstrahl auf den Stoß gerichtet wird. Die Geometrie des Schmelzbades wird von der geometrischen Form des Laserstrahls und dem Leistungsfluss bestimmt. Typischerweise liegt hier die maximale Schmelzbادتiefe in der Größenordnung der halben Schmelzbadbreite [BEYER 1995]. Dieses Breite-

Tiefe-Verhältnis der Schweißnaht wird als Nahtformfaktor ψ definiert. Für das Wärmeleitungsschweißen bedeutet das, dass Nahtformfaktoren $\psi \leq 1$ erreicht werden. In Abbildung 2.16 ist das Prinzip des Wärmeleitungsschweißens dargestellt.

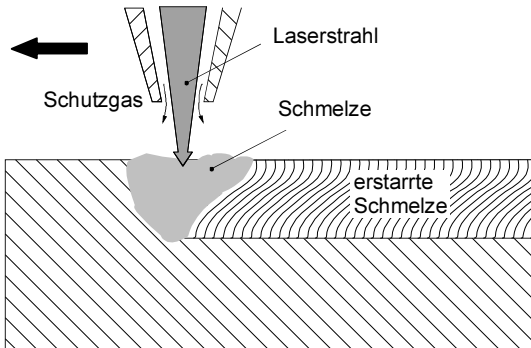


Abbildung 2.16: Prinzip des Wärmeleitungsschweißens (nach BEYER (1995))

2.2.4.4 Tiefschweißen

Zum Tiefschweißen muss eine materialspezifische Schwellintensität des Laserstrahls überschritten werden. Der Werkstoff beginnt zu verdampfen und die Absorption des Laserstrahls wird erhöht. Eine Dampfkapillare bildet sich im Material aus, deren Breite in etwa der des Strahldurchmessers und deren Tiefe der Einschweißtiefe entspricht. Die Dampfkapillare ist von einer flüssigen Phase umgeben und wird durch den Druck des verdampfenden Materials offen gehalten. Durch eine Vorschubbewegung wird die Kapillare durch den Werkstoff geführt, wobei die Schmelze zum Teil um die Kapillare herum strömt. Ein anderer Teil der Schmelze wird an der Vorderseite der Dampfkapillare verdampft. Ein Teil des Metaldampfes strömt aus der Kapillare nach oben heraus und bildet oberhalb des Werkstücks eine Metaldampf Wolke (vgl. Abbildung 2.17). Der andere Teil wird an der kälteren Kapillarrückwand wieder kondensiert. Die Dampfkapillare ermöglicht ein tiefes Eindringen des Laserstrahls in das Material, wodurch die

für das Laserstrahlschweißen typischen schlanken und tiefen Nähte entstehen. Es sind Nahtformfaktoren $\psi > 10$ möglich [BEYER 1995].

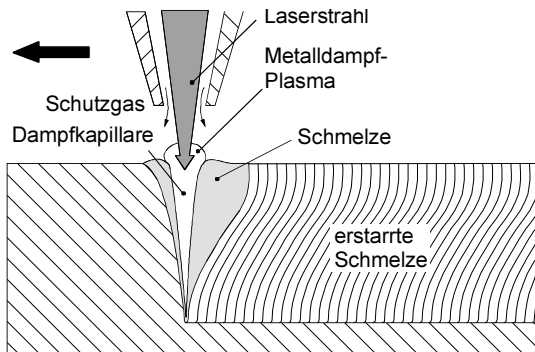


Abbildung 2.17: Prinzip des Tiefschweißens (nach HÜGEL (1992))

2.2.4.5 Probleme beim Laserstrahlschweißen

Beim Laserstrahlschweißen können eine Reihe von physikalischen Effekten auftreten, die zu einem instabilen Schweißprozess und somit zu Schweißnahtfehlern führen. Im folgenden sollen zwei der wichtigsten Effekte kurz beschrieben werden: Die Plasmaabschirmung und der Humpingeffect.

Wie in Abschnitt 2.1.4.4 bildet sich beim Laserstrahlschweißen ein Keyhole aus dem Metalldampf strömt. Der Metalldampf bzw. die durch den Laserstrahl erzeugte Metalldampfdichte ist für den Laserprozess von entscheidender Bedeutung [BEYER 1995]. Um ein Verschließen der Dampfkapillare zu verhindern ist ein Mindestdampfdruck notwendig, der sich aus der Dichte und der Temperatur des Metalldampfs ergibt. Ferner kann sich aus dem Metalldampf ein laserinduziertes Plasma ausbilden, das einfallende Laserstrahlung zum Teil absorbiert. Zur Plasmaabschirmung kommt es, wenn das Plasma nur noch für einen kleinen Teil der einfallenden Strahlung transparent ist, wodurch die Werkstückoberfläche gegenüber der einfallenden Strahlung abgeschirmt wird. Eine Abnahme der Verdampfungsrate und somit der abströmenden Metalldampfdichte ist die

Folge. Dies führt wiederum zu einer Abnahme der Absorption des Plasmas und somit zur Verringerung der abschirmenden Wirkung. Dieser Vorgang ist somit instabil und wird sich stochastisch wiederholen [BEYER 1995]. Die Folge der Bildung eines abschirmenden Plasmas ist eine weitgehende Unterbrechung des Schweißvorgangs.

Als Humpingeffect werden Schmelzauswürfe auf der Nahtoberseite bezeichnet. Der Humpingeffect tritt beim Überschreiten einer kritischen prozessparameterabhängigen Geschwindigkeit auf, die zu Instabilitäten in der Schmelzbadbewegung führt [BEYER 1995]. Kennzeichen des Humpingeffects sind sogenannte Humpingtropfen auf der Nahtoberfläche, Lochbildung vor den Tropfen bei dünnen Blechen, eine ungleichmäßige Nahtausbildung mit Einbrandkerben oder einer Nahtüberhöhung mit Humpingtropfen und eines deutlichen Wurzelrückzugs. Eine Veränderung der Fokuslage im Verhältnis zur Werkstückoberfläche kann die Bildung des Humpingeffects deutlich beeinflussen [BEYER 1995].

2.2.4.6 Einstellparameter beim Laserstrahlschweißprozess

Das Bearbeitungsergebnis beim Laserstrahlschweißen ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. Nach BESKE (1992) können die Einflussgrößen in drei Hauptgruppen eingeteilt werden:

- Strahl- und Prozessparameter
- Werkstückparameter
- Werkstoffparameter

Formal kann das Bearbeitungsergebnis folglich nach Gleichung 2.1 als Funktion dieser Parameter formuliert werden:

$$\text{Bearbeitungsergebnis} = f(\text{Strahlparameter}, \text{Prozessparameter}, \text{Werkstückparameter}, \text{Werkstoffparameter}) \quad (2.1)$$

Zur optimalen Einstellung eines Prozesses in der Produktion und ist es also wichtig, den Einfluss eines Parameters und die Wechselwirkungen der Parameter auf das Bearbeitungsergebnis zu kennen. Das bedeutet letztlich, die Wirkung einer Änderung von Einflussparametern auf das Bearbeitungs-

ergebnis und somit die Änderung des Bearbeitungsergebnisses zu kennen. Formal kann dieser Zusammenhang somit wie folgt formuliert werden:

$$\Delta \text{Bearbeitungsergebnis} = f(\Delta \text{Prozessparameter}, \Delta \text{Strahlparameter}, \Delta \text{Werkstückparameter}, \Delta \text{Werkstoffparameter}) \quad (2.2)$$

Zu den **Strahl- und Prozessparametern** gehören beispielsweise die Wellenlänge des verwendeten Lasers, die Strahlleistung am Werkstück, die Strahlqualität (Strahlparameterprodukt bzw. Fokussierzahl), die Relativgeschwindigkeit zwischen Strahl und Werkstück, der Strahleinfallswinkel oder die Prozessgasparameter (Art, Menge, Zuführrichtung).

Die **Werkstückparameter** umfassen zum Beispiel den Nahttyp und die Stoßart, die Werkstückdicke, die Nahtlage, die Nahtvorbereitung sowie die Form- und Lagetoleranzen.

Zu den **Werkstoffparametern** gehören die physikalischen und insbesondere die thermophysikalischen Eigenschaften des Werkstoffs, der Gefügestand bzw. eine vorausgegangene Wärmebehandlung, die elementare Zusammensetzung und bei der Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe die Werkstoffpaarung.

DIN EN ISO 11145 sowie DIN EN ISO 9956-11 können die Definitionen und Beschreibungen der Einflussgrößen beim Laserstrahlschweißen entnommen werden.

Die zur Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses wichtigen Zielgrößen werden in Abschnitt 2.2.4.8 dargestellt.

2.2.4.7 Ableitung wichtiger Einstellparameter beim Laserstrahlschweißen

Die Vielzahl der Einflussgrößen auf das Schweißergebnis und der sich daraus ergebenden Kombinationsmöglichkeiten spannt ein kaum überblickbares Feld an möglichen Parameterkombinationen auf. CHEN & ROTH (1992) führen diese Vielzahl an Parametern daher auf die zwei Schlüsselfaktoren „Streckenenergie“ und „Leistungsintensität“ zurück. Der Faktor „Streckenenergie“ wird aus dem Quotienten der Parameter Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit berechnet. Der Faktor „Leistungsintensität“ umfasst dabei hauptsächlich die Strahlparameter.

Ziel der Produktion ist es, nicht nur ein einmaliges optimales Bearbeitungsergebnis zu erzielen sondern vor allem ein möglichst gleichbleibendes Bearbeitungsergebnis zu erzielen. Zur Ermittlung des optimalen auf die Anforderungen abgestimmten Bearbeitungsergebnisses muss daher zunächst die optimale Kombination aller Prozessparameter untersucht werden. Für ein möglichst gleichbleibendes Bearbeitungsergebnis ist jedoch insbesondere das Prozessverhalten bzw. der Einfluss der während des Schweißprozesses veränderlichen Einflussparameter zu ermitteln, um Veränderungen entweder gezielt auszuschließen oder gezielt zur Prozessführung nutzen zu können. Im folgenden werden daher diejenigen Einstellparameter abgeleitet, die sich während des Schweißens verändern können.

Die **Werkstoffparameter** bzw. die thermophysikalischen Kennwerte des zu verschweißenden Werkstoffs werden durch den in der Konstruktion gewählten Werkstoff festgelegt und stellen keine veränderbaren Einflussgrößen während des Schweißprozesses dar.

Bei den **Strahl- und Prozessparametern** können insbesondere die Strahlparameter während des Schweißprozesses in der Regel nicht verändert werden, da diese durch den eingesetzten Laser sowie die Strahlführung und -formung festgelegt sind. Wichtige veränderbare Strahlgröße ist jedoch die Laserleistung.

Die wichtigsten veränderbaren **Prozessparameter** sind die Relativgeschwindigkeit zwischen Strahl und Werkstück, die Fokusslage, der Strahleinfallswinkel und die Prozessgasparameter (Gasart, Gasmenge und Gasgeschwindigkeit, Zuführrichtung). In der Regel werden die Prozessgasparameter während des Schweißprozesses jedoch nicht verändert.

Die **Werkstückparameter** können in veränderliche und nicht veränderliche Parameter eingeteilt werden. Zu den nicht veränderlichen Parametern gehören in der Regel der Nahttyp, die Stoßart und die Nahtvorbereitung, da diese bereits in der Konstruktion festgelegt werden. Veränderlich hingegen können die Werkstückdicke (Einschweißtiefe) und bei dreidimensionalen Schweißnähten die Nahtlage sein. Form- und Lagetoleranzen führen zu weiteren veränderlichen Parametern, wie Fügespalte oder einer seitlichen Abweichung der Fokusposition.

Die Kernparameter zur Einstellung des Laserstrahlschweißprozesses sind somit Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und, unter der Voraussetzung,

dass Lasertyp, Strahlformung- und -führung festgelegt sind, die Fokusslage (nach CHEN&ROTH (1992)).

Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb das Prozessverhalten für folgende Einstellgrößen untersucht werden:

- Laserleistung
- Vorschubgeschwindigkeit
- Fokusslage
- Einstrahlwinkel
- Spaltbreite
- Auftreffpunkt des Laserstrahls lateral zur Naht

2.2.4.8 Ableitung wichtiger Zielgrößen beim Laserstrahlschweißen

Die Vielzahl möglicher Einsatzfälle von geschweißten Magnesiumbauteilen führt zu einer unüberschaubaren Anzahl an möglichen Anforderungen an die Schweißnähte. Von zentraler Bedeutung bei der Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses sind die statischen und dynamischen Festigkeitskennwerte.

Nach NIEMANN (1980) kann aus der statischen Festigkeit durch die Multiplikation mit einem werkstoffspezifischen Faktor auch auf dynamische Festigkeiten wie Wechselfestigkeit oder Schwellfestigkeit für verschiedene Belastungsfälle (Zug, Druck, Biegung, etc.) geschlossen werden. NIEMANN (1980) gibt beispielsweise bei Zugbelastung für die Wechselfestigkeit von Leichtmetallen etwa ein Drittel der Bruchfestigkeit bei statischer Belastung ohne Kerbwirkung an. Mit Hilfe dieser pauschalen Betrachtung kann ein erster Anhaltswert für die dynamische Belastbarkeit einer Schweißnaht gewonnen werden. Für exakte Aussagen ist es jedoch notwendig eine genaue Untersuchung der dynamischen Festigkeiten bei verschiedenen Belastungsfällen durchzuführen. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Ein zweites wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses ist die erzielte Nahtgeometrie, die Rückschlüsse auf die Güte der Energieeinkopplung in das Bauteil zulässt. Ferner ist es auf diese Weise möglich, die Größe des tragenden Querschnitts zu bestimmen.

In dieser Arbeit werden daher statische Festigkeitswerte und Nahtgeometrie-parameter sowie deren Verhalten bei einer Veränderung der Einstellparameter untersucht, um eine Abschätzung des Prozessverhaltens zu ermöglichen.

2.3 Statistische Versuchsmethodik (SVM)

Zur Untersuchung oben genannter Werte werden insbesondere experimentelle Ansätze verfolgt. Die hierfür notwendigen Schweißversuche wurden mit Hilfe der Statistischen Versuchsmethodik (SVM) geplant, durchgeführt und ausgewertet. Im weiteren werden deshalb die in dieser Arbeit angewendeten Aspekte der SVM erläutert.

2.3.1 Ziel der SVM

Im Bereich der Forschung, Entwicklung und Produktion werden häufig statistische Methoden angewandt. Beispiele hierfür sind **Annahmestichprobenprüfungen** zur Überprüfung von Lieferlosen auf Einhaltung der Qualitätsanforderungen, die **Statistische Prozessüberwachung** (SPC) zur Überwachung von weitestgehend beherrschten Herstellungsprozessen auf Einhaltung einer erreichten Qualität und schließlich die **Statistische Versuchsplanung** (doe - design of experiments) zur Qualitätsverbesserung und optimalen Gestaltung von Erzeugnissen und Herstellungsprozessen.

Von den genannten statistischen Methoden ist nur die Statistische Versuchsplanung geeignet, deutliche Beiträge zu einer systematischen Verbesserung von Prozessen und Produkten zu leisten. Das liegt daran, dass aus vorhandenem, nicht gezielt erzeugtem, statistischen Datenmaterial zwar korrelative Zusammenhänge ermittelt werden können, jedoch nicht automatisch auf kausale Zusammenhänge geschlossen werden kann. Wenn also die Wirkung von Einflussfaktoren auf die Zielgrößen von Prozessen ermittelt werden soll, muss eine geplante Vorgehensweise gewählt werden. Ziel der SVM ist es, diese kausalen Zusammenhänge mit minimalem Versuchsaufwand zu ermitteln. Dabei wird das Ein- und Ausgangsverhalten eines Wirkprozesses durch entsprechend geplante Versuche und Versuchsauswertung ermittelt und somit ein statistisches Modell erzeugt. Eine weitere

Möglichkeit zur Ermittlung dieses Ein- und Ausgangsverhaltens ist die Beschreibung der inneren Wirkmechanismen durch geeignete mathematisch/physikalisch/chemische Modelle. Diese Methode ist zumeist jedoch sehr aufwendig.

Zur Anwendung statistisch geplanter Untersuchungen wird die in Abbildung 2.18 dargestellte 3-phasige Vorgehensweise mit den Schritten Planung, Durchführung und Analyse empfohlen, die im weiteren detaillierter beschrieben werden.

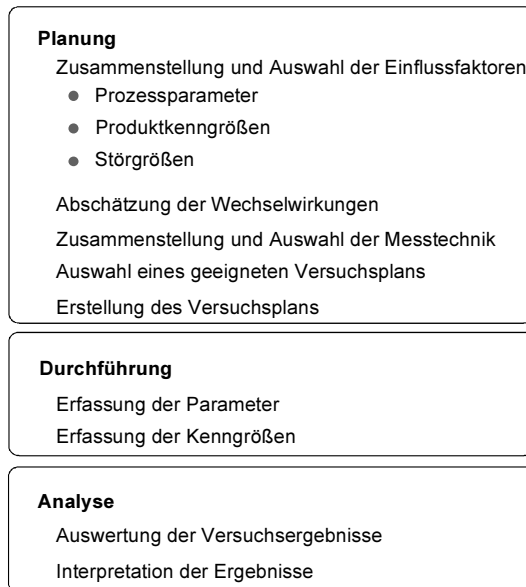


Abbildung 2.18: 3-phasige Vorgehensweise zur Prozessoptimierung mit statistischer Versuchsmethodik [PFEIFER 1993]

2.3.2 Planung

Die Grundlage der statistischen Versuchsplanung bilden die so genannten faktoriellen Versuche. Als einen Faktor bezeichnet man eine unabhängige, willkürlich einstellbare Größe, die vermutlich einen Einfluss auf das Ergebnis eines Versuchs hat. Im Fall des Laserstrahlschweißens sind unter den Faktoren die Prozessparameter des Schweißprozesses wie Laserstrahlleistung, Schweißgeschwindigkeit oder Fokusbildung zu verstehen. Um den Einfluss eines Faktors auf ein Versuchsergebnis festzustellen, muss der Faktor verändert werden. Die Einstellungen des Faktors werden als „Stufen“ oder „Niveaus“ bezeichnet. Der einfachste Fall eines **vollfaktoriellen** Versuchs ist der 2^k -Faktoren Versuch. Hier werden zwei Stufen für jeden der k Faktoren untersucht [SPENHOFF 1991].

Für die Definition der Größe der Faktorstufen gilt die Faustregel, dass bei geringen Vorkenntnissen über den Prozess ein großer Stufenabstand zur groben Näherung im nichtoptimalen Gebiet zu wählen ist, während bei guten Vorkenntnissen umgekehrt ein kleiner Stufenabstand zur guten Näherung im optimalen Gebiet eingestellt wird.

Abbildung 2.19 zeigt das Schema eines faktoriellen Versuchsplans der Form 2^3 . Die einzelnen Faktoren werden mit großen Buchstaben bezeichnet, beispielsweise Faktor A (z.B. Laserleistung), Faktor B (z.B. Schweißgeschwindigkeit), Faktor C (z.B. Fokusbildung). Die Anzahl der notwendigen Versuche N wird mit Hilfe der Formel

$$N = 2^k \quad (2.3)$$

ermittelt. Statistische Versuchspläne werden so angelegt, dass sie vollständig oder zu großen Teilen orthogonal sind. Die Orthogonalität der Versuchsplanmatrix führt dazu, dass eine lineare Abhängigkeit der Einflussgrößen weitestgehend vermieden wird und die so genannte Korrelationsmatrix der Einflussgrößen nahezu ideal zusammengesetzt ist. Das bedeutet, dass die Regressionskoeffizienten bei der Versuchsauswertung unabhängig voneinander geschätzt werden können. Die Orthogonalität der Versuchsplanmatrix wird vor allem durch eine Normierung der Einflussgrößen in den Bereich $B=\{-1;+1\}$ erreicht. Dabei wird die niedrigere Einstellung des Faktors mit (-) gekennzeichnet, die höhere mit (+). Zur Entwicklung des Versuchsplans werden nun alle möglichen Kombinationen

der Faktoreinstellungen ermittelt. Für die Vorzeichen der Wechselwirkungen werden die Einstellungen der Faktoren multipliziert.

Zur Erläuterung soll folgendes Beispiel dienen: Es soll das Prozessverhalten eines Laserstrahlschweißprozesses ermittelt werden. Hierfür werden die Faktoren „Laserleistung“ zwischen 2kW und 3kW, „Schweißgeschwindigkeit“ zwischen 3m/min und 5m/min sowie „Fokuslage“ zwischen -0,5mm und 0mm untersucht. Die normierte Darstellung für das untere Niveau aller Faktoren (2kW; 3m/min; -0,5mm) lautet somit: -1,-1,-1.

Lfd. Nr.	Bezeichnung							
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,2,3,... Bezeichnung des Versuchs
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	A, B,... Faktoren
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	AB, AC,... Wechselwirkungen
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	
8	1	1	1	1	1	1	1	

Abbildung 2.19: Faktorieller Versuchsplan der Form 2^3 (SPENHOFF 1991)

Der Plan ist so aufgebaut, dass für jedes Niveau eines Faktors alle Niveaus aller anderen Faktoren untersucht werden. Dadurch erhält man Versuchsergebnisse bei allen möglichen Kombinationen der untersuchten Faktorstufen und kann so auch den Einfluss aller einfachen und mehrfachen Wechselwirkungen abschätzen.

Für eine Überprüfung des Prozessverhaltens bei der Versuchsauswertung sollten zusätzlich so genannte Zentrumsversuche mit mehreren Wiederholungen durchgeführt werden. Als Zentrumsversuche werden Versuche bezeichnet, die genau in der Mitte zwischen den beiden Faktorstufen liegen. Für das Beispiel der Untersuchung des Faktors „Laserleistung“ im Bereich zwischen 2kW und 3kW bedeutet der Zentrumsversuch somit eine Einstellung auf 2,5kW. Die Zentrumsversuche werden im Versuchsplan mit „0“ gekennzeichnet. Dies ist notwendig, da die Faktorstufen, wie beschrieben, nur auf zwei Niveaus eingestellt werden und

somit ein eventuelles nichtlineares Prozessverhalten nicht erkannt werden kann.

Der Versuchsraum eines 2^3 -Versuchsplanes kann zur besseren Veranschaulichung auch als Würfel, dessen Eckpunkte die jeweiligen Einstellungen der Faktoren symbolisieren, dargestellt werden (s. Abbildung 2.20).

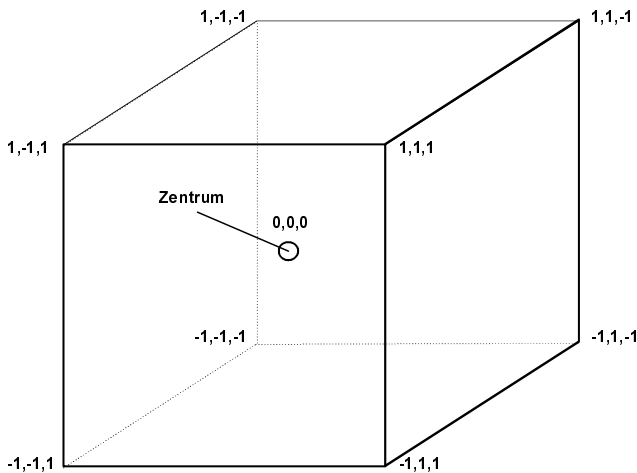


Abbildung 2.20: Würfel Darstellung eines 2^3 -Versuchsraumes

Beim **teilkfaktoriellen** Versuch wird im Gegensatz zum vollfaktoriellen Versuchsplan bei gleichen Faktoren die Anzahl der Versuche verringert, oder es werden bei gleicher Versuchszahl zusätzliche Faktoren untersucht. Die Anzahl der Versuche wird dann nach

$$N = 2^{k-p} \quad \text{mit} \quad p = 1, 2, 3, \dots, k-1 \quad (2.4)$$

berechnet.

Die Reduzierung des Versuchsaufwands beruht darauf, dass einige oder manchmal auch alle Wechselwirkungen vernachlässigt werden, wenn sie von Experten als gering oder nicht vorhanden eingeschätzt werden (REINHART U.A. 1996). Können Wechselwirkungen nicht ausgeschlossen werden, darf die Versuchsanzahl nicht zu stark reduziert werden, da ansonsten eventuell

sogar die Hauptwirkungen mit Wechselwirkungen vermennt werden. Eine sichere Aussage über die Hauptwirkungen ist somit nicht mehr möglich.

Neben der klassischen Versuchsmethodik wurden auch Verfahren erarbeitet, die eine deutliche Reduzierung der Versuchszahlen versprechen. Die Verfahren nach Taguchi sind der bekannteste dieser Ansätze. Weitere Beispiele sind die Verfahren nach Shainin, Plackett und Burman, sowie Hartley. Für deren Beschreibung sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (SPENHOFF 1991). Bei näherer Betrachtung der Verfahren zeigt sich, dass die erwarteten Vereinfachungen nur unter gewissen Randbedingungen greifen und zu falschen Versuchsergebnissen führen können. Aus diesem Grund sollten die Verfahren nur bei genauer Kenntnis der Zusammenhänge und Hintergründe angewendet werden (PFEIFER 1993).

Zur genauen Untersuchung nichtlinearen Prozessverhaltens sind die faktoriellen Pläne vom Typ 2^k oder 2^{k-p} nicht ausreichend, da die Faktoren nur auf zwei Stufen eingestellt werden. Von besonderer Bedeutung bei der Untersuchung nichtlinearer Prozesse sind die so genannten "zentral zusammengesetzten Versuchspläne". Bei diesem Versuchsplantyp wird ein Versuchsplan vom Typ 2^k oder 2^{k-p} mit Zentrumsversuchen um weitere Versuche ergänzt, die als "Sternpunktversuche" bezeichnet werden. Dabei werden für alle Einflussgrößen ein weiteres oberes und unteres Niveau im Abstand $\pm\alpha$ vom Zentrum der jeweiligen Einflussgröße eingestellt und alle anderen Einflussgrößen auf das Zentrum gesetzt (vgl. Abbildung 2.21). Die Festlegung von α erfolgt nach den beiden statistischen Eigenschaften "Orthogonalität" und "Drehbarkeit". In der Praxis wird α jedoch häufig auf $\alpha=1$ festgesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Versuchspläne dieses Typs eingesetzt. Dabei wurde der Sternpunkt Abstand $\alpha=1$ gesetzt.

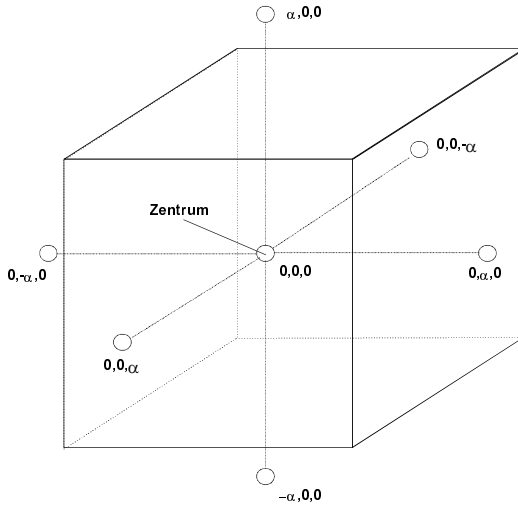


Abbildung 2.21: Versuchsraum vom Typ 2^3 mit Sternpunktversuchen

Da die Erstellung faktorieller Versuchspläne bei komplexen Anwendungen mit großem Aufwand verbunden ist, wurde für die Lasermaterialbearbeitung ein rechnergestützter Ansatz entwickelt, mit dessen Hilfe basierend auf den Zielgrößen, Einflussgrößen und den Haupteffekten faktorielle Versuchspläne automatisch erstellt werden (SEPOLD U.A. 1998). Weitere Möglichkeiten der automatischen Erstellung und Auswertung von Versuchsplänen, die auch im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurden, liegen in kommerziell erhältlicher Versuchsplanungssoftware.

2.3.3 Durchführung

Bei der Durchführung der Versuche sind ebenfalls Prinzipien der statistischen Versuchsplanung anzuwenden, um die Fehler durch äußere Einflussgrößen zu verringern. Die Prinzipien, die dabei angewendet werden, sind die Mittelwertbildung, die Zufallszuordnung und die Blockbildung (RETZLAFF U.A. 1975).

Das Prinzip der **Mittelwertbildung** beruht darauf, dass der Mittelwert mehrerer Messungen, die unter gleichen Bedingungen ausgeführt sind, dem „richtigen“ Ergebnis näherkommen als die einzelne Messung. Der Mittelwert \bar{x} wird aus dem Probenumfang n , und den Messwerten x_i nach

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.5)$$

berechnet. Die Standardabweichung s

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)} \quad (2.6)$$

ist ein Maß für Streuung der Messwerte und erlaubt so eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Messung (SPENHOFF 1991).

Die **Zufallszuordnung** oder Randomisierung der Reihenfolge aller Versuche kann als Grundlage der Versuchsplanung angesehen werden. Sie gestattet durch Ausschaltung bekannter und unbekannter systematischer Fehler, insbesondere Trends, eine unverfälschte Schätzung der interessierenden Effekte und bewirkt zugleich Unabhängigkeit der Versuchsergebnisse. Eine Anzahl von Versuchen lässt sich durch **Blockbildung** oft so einteilen, dass innerhalb eines Blocks Messgeräte, Versuchsbedingungen, Versuchsmuster oder Experimentatoren einheitlicher sind als von Block zu Block. Dies ist oft notwendig, wenn der Versuchsaufwand bei reiner Zufallszuordnung, beispielsweise durch große Umbauten der Versuchsanordnung, zu stark steigen würde. Kombiniert man die Prinzipien Blockbildung und Zufallszuordnung, spricht man vom „Randomized Block Design“ (RETZLAFF U.A. 1975). Zur Anzahl der erforderlichen Wiederholungen an einem Versuchspunkt wurde von DREYER (1998) ermittelt, dass für einen Versuchsplan vom Typ 2^{k_p} bei einer Grundversuchsanzahl von $2^{k_p}=8$ ein Stichprobenumfang von $n=3$ ausreichend ist, um einen Effekt als signifikant zu erkennen, der doppelt so groß wie die Versuchsstandardabweichung ist. Um einen Effekt als signifikant zu erkennen, der im Bereich der Versuchsstandardabweichung liegt, ist bereits ein Stichprobenumfang von $n=8$ erforderlich. Für Versuchspläne, mit denen eine höhere Anzahl an Faktoren untersucht werden soll, sind insgesamt niedrigere Stichprobenumfänge erforderlich. Ein Versuchsplan mit $2^{k_p}=32$ erfordert beispielsweise nur noch einen Stichprobenumfang von $n=2$, um einen Effekt im Bereich der Versuchsstandardabweichung als signifikant zu erkennen.

2.3.4 Analyse

Bei den beschriebenen 2^k Faktorenversuchen sind die Faktoren auf lediglich zwei Stufen angeordnet und lassen sich einfach auswerten. Wenn sich die Parameter über viele Stufen ändern, werden zur Auswertung und Analyse **Regressionsverfahren** angewendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass zwischen den untersuchten Variablen ein Zusammenhang besteht, der als Funktion dargestellt werden soll. Es wird je nach Anzahl der in Beziehung zu setzenden Variablen zwischen ein- und mehrfacher und nach der Form der anzunähernden Funktion in lineare, nichtlineare und polynomiale Regression unterschieden.

Die Regressionsrechnung beruht auf den Gauß'schen Prinzip der kleinsten Quadrate. Im Fall der einfachen linearen Regression besteht die Aufgabe darin, eine Menge von Messpunkten „möglichst gut“ an eine Gerade anzunähern. Danach ist die Gerade der Form

$$y(x) = ax + b$$

so zu legen, dass die Summe der Quadrate der Abstände der Messpunkte (x_i, y_i) von dieser Geraden V nach

$$V = \sum_i (y_i - y(x_i))^2 = \sum_i (y_i - ax_i - b)^2 \quad (2.7)$$

ein Minimum wird. Das dargestellte Ergebnis der Versuchsplanauswertung ist somit eine mathematische Funktion, die den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen möglichst gut annähert bzw. modelliert.

Um die **Validität** des aufgestellten Modells zu überprüfen, stehen verschiedene Methoden der **Regressions- und Varianzanalyse** zur Verfügung.

Bei der Regressionsanalyse wird als Maß für die Stärke der linearen Abhängigkeit zwischen zwei Variablen der **Korrelationskoeffizient** r ermittelt. Er berechnet sich nach

$$r = \frac{\text{cov}(xy)}{s(x) \cdot s(y)} \quad (2.8)$$

aus der Standardabweichung $s(x)$ und $s(y)$ und der Kovarianz von x und y

$$\text{cov}(xy) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (2.9)$$

Der Betrag des Korrelationskoeffizienten liegt zwischen null und eins. Je näher er bei eins liegt, desto näher schmiegen sich die Messpunkte der Regressionsgeraden an (RETZLAFF U.A. 1975).

Für eine statistisch ausreichende Beurteilung der Modellgüte reicht die Betrachtung des Korrelationskoeffizienten oft nicht aus. Für eine genauere Modellbeurteilung ist die eingehende **Analyse der Varianzen** erforderlich, mit der auch alle im Ergebnisteil dieser Arbeit dargestellten Modelle überprüft wurden.

Dazu wird die Gesamtsumme der quadratischen Abweichungen vom gemeinsamen Mittel aller Versuche in einzelne Streuungsursachen zerlegt. Die Gesamtsumme wird zunächst in die Summe der quadratischen Abweichungen, die durch das Regressionsmodell erklärt werden (SS_{Reg}), und die Summe der quadratischen Abweichungen, die nicht durch das Regressionsmodell erklärt werden (SS_{Res}), aufgeteilt. Das Bestimmtheitsmaß B kann aus dem Korrelationskoeffizienten r mit

$$B = r^2 = \frac{SS_{\text{Reg}}}{SS_{\text{Res}}} \quad (2.10)$$

ermittelt werden und gibt das Verhältnis von SS_{Reg} zu SS_{Res} an. SS_{Reg} lässt sich dabei aus der Summe aller durch das Regressionsmodell geschätzten Werte \hat{y}_i abzüglich des gemeinsamen Mittels aller Versuchswerte \bar{y} zu

$$SS_{\text{Reg}} = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.11)$$

bestimmen.

Im weiteren kann die nicht durch das Regressionsmodell erklärte Streuung SS_{Res} in die Summe der quadratischen Abweichungen von den jeweiligen Versuchspunkten SS_{Pe} (=reine Versuchsstreuung, "Pure error"), und der Summe der quadratischen Abweichungen infolge nicht erfasster systematischer Einflüsse SS_{LoF} (=Modellschwäche, "Lack of Fit") aufgeteilt werden. SS_{Pe} ergibt sich aus

$$SS_{\text{Pe}} = \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^{r_j} (y_{jk} - \bar{y}_j)^2 \quad (2.12)$$

mit

r =Anzahl der Versuchspunkte mit Wiederholungen

und

r_j =Anzahl der Versuchsdurchführungen am j -ten Versuchspunkt

Aus der Analyse der Streuungen können zwei statistische Tests durchgeführt werden, die die Güte des Modells bzw. die Signifikanz des Modellansatzes beschreiben. Für die Tests müssen die verschiedenen Streuungswerte zunächst noch gemittelt werden, da diese aus einer unterschiedlichen Anzahl an freien Werten (Freiheitsgraden) berechnet wurden und somit kein Vergleich der Streuungen untereinander möglich ist. Hierfür werden die Streuungen durch ihre jeweilige Anzahl an Freiheitsgraden geteilt und somit die sogenannten **Varianzen** oder "Mean Squares" (MS) ermittelt. Für die Ermittlung der Freiheitsgrade kann Abbildung 2.22 verwendet werden.

Streuungswert	Freiheitsgrade	
SS_{Ges}	$N-1$	
SS_{Reg}	$m-1$	N = Gesamtzahl der Versuche
SS_{Res}	$N-m$	m = Anzahl der Terme im Modell mit Absolutglied
SS_{Pe}	$\sum_{j=1}^r (r_j - 1)$	r = Anzahl der Versuchspunkte mit Wiederholungen
SS_{Lof}	$N - m - \sum_{j=1}^r (r_j - 1)$	r_j = Anzahl der Versuchswiederholungen am j -ten Versuchspunkt

Abbildung 2.22: Freiheitsgrade der verschiedenen Streuungsursachen

Ziel des ersten Tests ist es, zu erkennen, ob das Modell als akzeptabel eingeschätzt werden kann. Akzeptabel ist ein Modell dann, wenn von den streuenden Beobachtungswerten der größte Streuungsanteil erklärt werden kann. Hierfür wird MS_{Reg} als Schätzwert für die Varianz der Beobachtungsergebnisse, die durch das Regressionsmodell erklärt wird, mit MS_{Res} als Schätzwert für die Restvarianz der Beobachtungsergebnisse, die nicht durch

das Regressionsmodell erklärt wird, verglichen. Kurz bedeutet das, dass wenn

$$MS_{Reg} > MS_{Res} \quad (2.13)$$

ist das Modell akzeptabel. Die Nullhypothese als Testgrundlage lautet somit

$$H_0 : MS_{Reg} \leq MS_{Res} \quad (2.14)$$

Kann diese Hypothese verworfen werden, so ist das Modell akzeptabel. Als Entscheidungskriterium dient dabei der sogenannte F-Test, bei dem mit Hilfe der F-Verteilung der Quotient aus MS_{Reg} und MS_{Res} mit dem Wert aus der F-Verteilung (F) verglichen wird. Das Testkriterium lautet also

$$F = \frac{MS_{Reg}}{MS_{Res}} > F_{f_1, f_2, 1-\alpha} \quad (2.15)$$

Hierfür muss mit den entsprechenden Freiheitsgraden (f_1, f_2) und der gewünschten Aussagewahrscheinlichkeit ($1-\alpha$) der Wert ($F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$) aus der F-Verteilung ermittelt werden.

Ziel des zweiten Tests ist es, zu erkennen, ob das Modell noch Anpassungsdefekte aufweist. Wenn der übrigbleibende Streuungsanteil infolge Modellschwäche größer ist als die reine Versuchsstreuung, so deutet das auf Anpassungsdefekte hin und das Modell muss modifiziert werden. Kurz:

wenn $MS_{LoF} > MS_{Pe}$ dann ist das Modell schwach.

Die Nullhypothese als Testgrundlage lautet

$$H_0 : MS_{LoF} \leq MS_{Pe} \quad (2.16)$$

Wird diese Hypothese verworfen, dann weist das Modell Anpassungsschwächen auf. Die Entscheidungsfindung erfolgt analog zu (2.15) mit einem F-Test. Ein Modell ist somit dann als statistisch abgesichert zu betrachten, wenn für den 1. Test die Nullhypothese verworfen wird und wenn sie beim 2. Test bestätigt wird.

2.4 Zusammenfassung

Ausgehend von der Betrachtung des Werkstoffs Magnesium konnte die hohe derzeitige und zukünftige industrielle Relevanz der Magnesiumlegierungen gezeigt werden. Gründe hierfür sind die gute Be- und Verarbeitbarkeit von Magnesiumlegierungen. Eine Analyse der physikalischen Kennwerte zeigt, dass Magnesiumlegierungen sich gut zum Laserstrahlschweißen eignen. Aufgrund des hohen Absorptionsgrades der Magnesiumlegierungen für Nd:YAG-Laserstrahlung wird im Rahmen dieser Arbeit das Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen näher betrachtet. Hierfür wird die Methode der Statistischen Versuchsplanung (SVM) eingesetzt. Mit Hilfe der SVM ist es möglich bei geringem Versuchsaufwand statistische Modelle des Prozessverhaltens aufzustellen. Für die Modellierung des Prozessverhaltens des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss werden „zentral-zusammengesetzte“ Versuchspläne aufgestellt und durchgeführt, die mit Hilfe der Regressions- und Varianzanalyse validiert werden.

3 Stand der Technik und Forschung

Im Rahmen dieses Kapitels wird zunächst auf die notwendigen Kenntnisse eingegangen, die für den Einsatz des Laserstrahlschweißens in der Produktion erforderlich sind. Anschließend werden technologisch geeignete Schweißverfahren für Magnesium vorgestellt, da sich bei der Gestaltung neuer Produkte oder bei der Optimierung bestehender Produkte hinsichtlich ihrer technologischen und wirtschaftlichen Eigenschaften stets die Frage nach dem günstigsten Fügeverfahren stellt. In einem weiteren Schritt werden die derzeitigen Kenntnisse zum Laserstrahlschweißen von Magnesium dargestellt und an den in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen an das notwendige Prozesswissen gespiegelt. Abschließend wird der sich daraus ergebende Handlungsbedarf erarbeitet.

3.1 Anforderungen an das Prozesswissen für den Einsatz in der Produktion

Betrachtet man die Schweißbarkeit eines Bauteiles entsprechend der DIN 8528-1, so gelten die in der Norm dargestellten Zusammenhänge zunächst grundsätzlich auch für das Laserstrahlschweißen (Abbildung 3.1). Danach ist die Schweißbarkeit eines Bauteils dann gegeben, wenn

- die Schweißeignung des Werkstoffes,
- die Schweißsicherheit der Konstruktion und
- die Schweißmöglichkeit in der Fertigung

gewährleistet sind. Aus diesen Forderungen lassen sich die erforderlichen Kenntnisse ableiten, die für den Einsatz des Schweißens, und insbesondere des Laserstrahlschweißens, in der Produktion notwendig sind. Diese Punkte betreffen insbesondere das Wissen, das einem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden muss. Bei der Auslegung von geschweißten Bauteilen fällt dem Konstrukteur primär die Aufgabe zu, die Schweißsicherheit als Eigenschaft der Konstruktion sicherzustellen, d.h. die geschweißten Bauteile müssen aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung die im Betrieb zu erwartende Beanspruchung sicher ertragen können. Da die Schweißsicherheit jedoch erheblich vom Werkstoff beeinflusst wird, ist es notwendig,

dass die Schweißeignung als Werkstoffeigenschaft dem Konstrukteur bekannt ist.

Darüber hinaus muss das Bauteil so gestaltet werden, dass die vorgesehenen Schweißungen unter den gewählten Fertigungsbedingungen fachgerecht und wirtschaftlich hergestellt werden können (Schweißmöglichkeit). Die fachgerechte und wirtschaftliche Herstellung von Schweißungen erfordert dabei in der Fertigung selbst ein umfangreiches Wissen über den Prozess.

Die wesentlichen Einflussfaktoren, die bei der Konstruktion berücksichtigt bzw. geprüft werden müssen, und damit als Eigenschaft einer Schweißnaht bekannt sein müssen sind nach RUGE 1985 auf der Seite der Beanspruchung

- die Art der Beanspruchung: z.B. ruhend, zyklisch, schlagend
- die Art der Belastung: z.B. Zug, Druck, Biegung, Torsion sowie
- die äußeren Einflüsse: z.B. Temperatur, Korrosion.

Auf der Seite des Werkstoffes bzw. des Zusatzwerkstoffes sind die Einflussfaktoren

- die Schweißeignung und
- die aus dem Schweißprozess resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften der Naht.

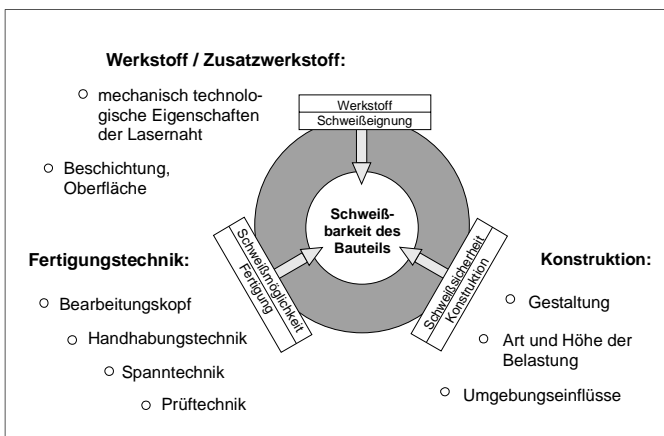


Abbildung 3.1: Einflussfaktoren auf die Konstruktion, die sich aus der Schweißbarkeit nach DIN 8528-1 ergeben. [Dilthey 2000]

Neben diesen Einflussfaktoren, die im Hinblick auf die funktionalen Eigenschaften des geschweißten Bauteils von Bedeutung sind, müssen insbesondere beim Laserstrahlschweißen weitere Randbedingungen in der Konstruktion berücksichtigt werden, um einen sicheren Fertigungsprozess bei gleichbleibend hoher Qualität zu gewährleisten. Dies sind nach RADAJ (1994), TRUNZER (1996), REEK (2000), BAUER (1999) und ZOPF (1995)

- die Beschichtung des Werkstoffes (z.B. Verzinkung),
- die Nahtvorbereitung (z.B. für den Einsatz einer Sensorik),
- Toleranzen (Bauteil, Handhabungssystem),
- die Zugänglichkeit (Bearbeitungskopf, Handhabungssystem, Sensorik) sowie
- die Nahtführung (Dynamik des Handhabungssystems).

Zusammengefasst lassen sich auf das Laserstrahlschweißen bezogen folgende Forderungen aus dem Wissensbedarf in der Konstruktion und der Fertigung ableiten, um einen wirtschaftlichen und sicheren Produktionsprozess zu gewährleisten:

- Die grundsätzliche Schweißseignung des Werkstoffs muss nachgewiesen sein: Die Strahl-Stoff-Wechselwirkung und das metallurgische Verhalten müssen ermittelt werden.
- Die Einflüsse des konstruktiv festgelegten Oberflächenzustandes des Werkstoffs sowie fertigungsbedingter, "ungewollter" Oberflächenschichten, wie Fettrückstände, Öle, etc. auf das Schweißergebnis müssen bekannt sein.
- Die optimalen Prozesseinstellungen und das Prozessverhalten bei gewollter Veränderung der Einstellparameter des Prozesses müssen zur Optimierung und schnellen Anpassung des Prozesses ermittelt werden.
- Die maximal zulässigen Toleranzen und das Prozessverhalten unter Toleranzeinfluss (Grad der Prozessrobustheit) müssen bekannt sein.
- Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht entsprechend der konstruktiv festgelegten Belastung müssen bekannt sein.
- Das Verhalten der Schweißnaht unter äußeren Einflüssen (z.B. Korrosion, Temperatur) muss bekannt sein.

Der erforderliche Wissensbedarf lässt sich somit in die Punkte Einflüsse und Verhalten des Werkstoffs, Verhalten des Prozesses und resultierende Eigenschaften gliedern (vgl. Abbildung 3.2).

Werkstoff	Schweißbeignung
	Einflüsse des Oberflächenzustandes
Prozess	Prozessverhalten
	Toleranzeinfluss
Eigenschaften	Mechanisch-technologische Eigenschaften
	Verhalten unter äußeren Einflüssen

Abbildung 3.2: Wissensbedarf für den Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens

Aus diesem Grund werden die für das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen vorgestellten Erkenntnisse dahingehend bewertet, inwieweit der dargestellte Wissensbedarf derzeit gedeckt ist.

3.2 Schweißverfahren für Magnesium

3.2.1 Konventionelle Schweißverfahren (MIG/WIG/Plasma)

Das **Metall-Inertgas-Schweißen** (MIG) gehört zu den Lichtbogen-Schutzgasschweißverfahren. Dabei wird der drahtförmig zugeführte Zusatzwerkstoff gleichzeitig als abschmelzende Elektrode genutzt. Im Gegensatz hierzu wird beim **Wolfram-Inertgas-Schweißen** eine nicht abschmelzende Elektrode aus Wolfram verwendet und zusätzlich Zusatzmaterial von der Seite zugeführt. Beim **Plasmaschweißen** wird ein hocherhitztes Gas ($T > 10^4$ K) durch eine Düse auf das Werkstück geblasen.

Dabei können Leistungsdichten von 10^5 bis 10^6 W/cm² erreicht werden [FÜGETECHNIK 1987]. Bei Magnesium muss darauf geachtet werden, dass nur geringe Gasgeschwindigkeiten eingestellt werden, da ansonsten die dünnflüssige Schmelze von Magnesium eine zusätzliche Belastung erfährt. Zusatzwerkstoff kann seitlich zugeführt werden.

Beim MIG- und WIG-Schweißen brennt der Lichtbogen zwischen Elektrode und Werkstück und wird durch einen Schutzgasmantel umhüllt. Der Lichtbogen wird durch hohe Ströme von in der Regel mehreren hundert Ampere erzeugt. Durch die hohe Energie des Lichtbogens werden das Werkstück und der Zusatzwerkstoff aufgeschmolzen. Entscheidend für die Qualität der Schweißnaht beim MIG-Schweißen ist der Tropfenübergang zwischen Drahtelektrode und Werkstück. Es wird zwischen kurzschlussfreiem und nicht kurzschlussfreiem Tropfenübergang sowie einem Tropfenübergang im Kurzschluß unterschieden [FÜGETECHNIK 1987]. Auf diese Weise ergeben sich verschiedene Lichtbogenarten (s. Tabelle 3.1), die durch entsprechende Wahl der Parameter an der Schweißstromquelle eingestellt werden können.

Benennung	Werkstoffübergang	
Sprühlichtbogen	Feinsttropfig	Kurzschlussfrei
Langlichtbogen	Grobtropfig	Nicht kurzschlussfrei
Kurzlichtbogen	Feintropfig	Im Kurzschluss
Impulslichtbogen	Einstellbar	Kurzschlussfrei

Tabelle 3.1: Lichtbogenarten und Werkstoffübergang beim MIG-Schweißen

Neuere Untersuchungen zeigen, dass sich beim MIG-Schweißen von Magnesium die besten Nahtqualitäten durch Impulslichtbogen und Kurzlichtbogen ergeben [JÜTTNER U.A. 1998, NENTWIG U.A. 1998].

Die erreichbaren statischen Zugfestigkeiten liegen bei minimal 80% derjenigen des Grundwerkstoffs bei Einsatz eines Zusatzwerkstoffs. Die Bruchdehnung und Einschnürung sind jedoch erheblich reduziert [NENTWIG

U.A. 1998]. Es entstehen relativ breite Nähte aufgrund der großen eingebrachten Wärmemenge. Als Nachteile ergeben sich weiterhin hohe Verzüge und die Gefahr des Durchsackens der Schmelze insbesondere bei Magnesium [JÜTTNER U.A. 1998, DANZER & LEHNER 1997].

Von Vorteil sind die geringen Investitionskosten für diese Schweißverfahren und ihre relativ gute Automatisierbarkeit, die bei Magnesium aufgrund seiner thermophysikalischen Kennwerte wie dem niedrigen Siedepunkt sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit (vgl. Kap. 2) und dem daraus resultierenden kleinen optimalen Prozesseinstellbereich verringert wird [NENTWIG U.A. 1998].

Erste Untersuchungen zum Schweißen von Magnesium mit den konventionellen Schweißverfahren resultieren bereits aus den dreißiger Jahren für Reparaturschweißungen von Gussbauteilen [BECK 1939]. Weitere Untersuchungen wurden von EMLEY (1957) durchgeführt, der hauptsächlich auf die Metallurgie der Schweißverbindungen eingeht. Bereits 1984 wurde in England eine Norm zum WIG-Schweißen von Aluminium und Magnesium erarbeitet, die hauptsächlich geeignete Nahtgeometrien mit entsprechenden Schweißparametern vorstellt [BS3019]. Neuere Untersuchungen zum Schweißen von Magnesium wurden unter anderem in Russland von STOLBOV U.A. (1991) durchgeführt, die sich sehr theoretisch mit dem Problem der Rissbildung beim Schweißen auseinandersetzen.

Untersuchungen zu strukturellen Verbindungen wurden Anfang der neunziger Jahre ebenfalls in Russland durchgeführt [RYAZANTSEV 1991, SLAVIN U.A. 1991]. Neuere Untersuchungen hierzu werden derzeit insbesondere in Deutschland durchgeführt [z. B. WOHLFAHRT & JÜTTNER 1998, DANZER 1998, KROHN & SINGH 1998].

Insgesamt lassen sich die konventionellen Schweißverfahren als stabile Prozesse einordnen. Es sind Schweißgeschwindigkeiten zwischen 0,6 m/min (WIG-Schweißen) und 1 m/min (MIG-Schweißen) erzielbar [DANZER 1998]. Aufgrund der starken Metaldampfentwicklung ist eine leistungsstarke Absaugeinrichtung vorzusehen [NENTWIG U.A. 1998]. Das WIG- und MIG-Schweißen wird im allgemeinen in Wannenlage mit und ohne Badstütze durchgeführt, wohingegen das Plasmaschweißen in der Steigposition zur besseren Entgasung der Schmelze und um ein Durchsacken zu verhindern,

durchgeführt wird [KROHN 1998]. Der Einsatz der jeweiligen Schweißverfahren in anderen Raumlagen ist als kritisch einzuordnen [DANZER 1998].

Die WIG- und MIG-Schweißverfahren eignen sich insbesondere für größere Materialstärken ($> 2 \text{ mm}$). Das Plasmaschweißen ist dagegen für geringere Materialstärken geeignet, da aufgrund der höheren Intensitäten ein geringerer Energieeintrag in das Bauteil und somit ein geringerer Verzug resultiert [DANZER 1998, KROHN 1998, JÜTTNER U.A. 1998].

3.2.2 Elektronenstrahlschweißen

Beim Elektronenstrahlschweißen (Electron beam welding = EBW) wird ein auf die Oberfläche eines Werkstücks treffender Elektronenstrahl abgebremst und die Bewegungsenergie der Elektronen in Wärme und Bremsstrahlung (z.B. Röntgenstrahlung) umgesetzt. Dabei wird die Oberfläche des Werkstücks im Bereich des Strahls auf Verdampfungstemperatur erhitzt. Das verdampfende Material drückt zusammen mit dem Druck des auftreffenden Strahls das flüssige Material zur Seite. Auf diese Weise entsteht ein Dampfkanal im Werkstück, der bis zur Unterseite des Werkstücks reichen kann. Wird der Elektronenstrahl über das Werkstück bewegt, ergibt sich eine Verschweißung der Stoßkanten [FÜGETECHNIK 1987].

Das Elektronenstrahlschweißen wird in der Regel unter Vakuum durchgeführt, da der Elektronenstrahl in normaler Atmosphäre stark abgebremst und aufgeweitet wird. Neben dem Vakuum-Elektronenstrahlschweißen gibt es jedoch speziell in den USA seit einigen Jahrzehnten das Elektronenstrahlschweißen im Nicht-Vakuum (NV-EBW) [SCHULZE & SCHUBERT 1994]. Der Vorteil des NV-EBW ist, dass das zu bearbeitende Werkstück nicht in eine Vakuumkammer gebracht werden muss, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit erhöhen kann [FRITZ U.A. 1989]. Beim Vakuum-Elektronenstrahlschweißen beschränkt die Vakuumkammer einerseits die Größe der Bauteile und andererseits muss die Kammer für jedes neue Teil belüftet und wieder evakuiert werden, wodurch sich die Nebenzeiten erhöhen. Moderne Elektronenstrahlmaschinen sind deshalb als Schleusenmaschinen ausgelegt [DOBENECK 1997].

Die Vorteile des Elektronenstrahlschweißens, speziell unter Vakuum, liegen in den hohen möglichen Einschweißstiefen und Schweißgeschwindigkeiten.

Zusätzlich wird mit diesem Verfahren nur eine geringe Wärmemenge in das Werkstück eingebracht. So sind bei Magnesium Einschweißtiefen bis zu 120 mm möglich [VOGELEI & DOBENECK 1998]. Im Dünnsblechbereich sind Schweißgeschwindigkeiten mit mehr als 10 m/min realisiert worden [HAFERKAMP U.A. 1998B]. Weitere Vorteile liegen in den Möglichkeiten der Strahlmodulation. Der Elektronenstrahl ist nahezu masse- und somit trägheitsfrei und kann mit magnetischen Feldern abgelenkt werden. Auf diese Weise können beliebige Nahtformen realisiert werden, beispielsweise zur Steigerung der dynamischen Festigkeit (s. Abbildung 3.3) [REINHART U.A. 1999A].

Zum Elektronenstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen wurden bereits in den 70er Jahren in Japan, Russland und Deutschland erste Ergebnisse veröffentlicht [ARATA U.A. 1976, IVANOV & ZULIN 1976 LEHRHEUER & LISON 1975]. Veröffentlichungen zu neueren Untersuchungen finden sich hauptsächlich in Deutschland [DILTNEY U.A. 1999, DRAUGELATES U.A. 1997, HAFERKAMP U.A. 1998A, VOGELI & DOBENECK 1998].

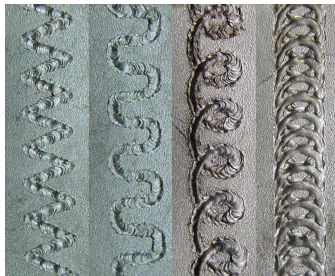


Abbildung 3.3: Mögliche Nahtformen beim Elektronenstrahlschweißen

3.2.3 Pressstumpfschweißen

Das Pressstumpfschweißen gehört nach DIN 8593, Teil 6 zur Gruppe der Press-Verbindungsschweißverfahren. Die grundlegenden Vorgänge beim Pressschweißen sind das Reinigen der Werkstückoberflächen in der Schweißzone von Oxiden und absorbierten Gasen durch Auflösen, Beiseiteschieben oder Verteilen und das Vereinigen der Fügeile in der Schweißzone, indem die atomaren Strukturen der Werkstoffe in engen

Kontakt miteinander gebracht werden [FÜGETECHNIK 1987]. Beim Pressstumpfschweißen werden symmetrische Bauteile gegeneinander gedreht und axial gestaucht. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in den geringen Schweißzeiten und der Möglichkeit artfremde Werkstoffe zu verbinden [KATO & TOKISUE 1994]. Nachteilig wirkt sich die Beschränkung auf symmetrische Bauteile und die Bildung der Stauchwulst aus, welche aufgrund der Kerbwirkung bei schwingender Beanspruchung zu verringerten dynamischen Festigkeiten führen kann.

Zum Pressstumpfschweißen von Magnesium existieren umfangreiche Untersuchungen wiederum in Deutschland [z.B. DRAUGELATES 1998c, NENTWIG U.A. 1998]. Weitere Untersuchungen werden vor allem in Japan durchgeführt [z.B. ASAHINA U.A. 1991, KATO & TOKISUE 1994, KATO U.A. 1997].

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass beim Pressstumpfschweißen statische Festigkeiten von etwa 90% des Grundmaterials erreicht werden können. Die Schweißzeiten betragen dabei zwischen 2 s und 8 s. Bei längeren Schweißzeiten können insgesamt höhere Festigkeiten erwartet werden. Dies trifft auch auf das Verhalten der Kerbschlagbiegearbeit zu. Bei Untersuchungen zu den Dauerschwingfestigkeiten dieser Verbindungen konnten Festigkeiten von etwa 80% des Grundmaterials erreicht werden. Im Vergleich hierzu liegen Aluminiumverbindungen bei etwa 90% der Festigkeit des Grundmaterials [KATO & TOKISUE 1994]. Der Versagensort dieser Verbindungen liegt immer in der Schweißnaht. Bei Aluminiumlegierungen hingegen liegt der Versagensort häufig in der weicheeren Wärmeeinflusszone.

3.3 Laserstrahlschweißen von Magnesium

Zum Laserstrahlschweißen von Magnesium sind bereits umfangreiche Untersuchungen hauptsächlich in Deutschland durchgeführt und veröffentlicht worden. Insbesondere sind hier die Arbeiten von KOPP (1996), GALUN (1998) und NIEMEYER (1999) zu nennen. Aus den USA und Frankreich sind nur vereinzelte neuere Veröffentlichungen, wie beispielsweise von LEONG U.A. (1998) und MAYER U.A. (1996) bekannt. Ältere Untersuchungen stammen ebenfalls aus Deutschland und den USA [z. B. BAESLACK U.A. 1986, BARBER 1974]. Dabei wurden unter anderen die Legierungen AZ91, AM50, AM20, AZ31, AZ61 und AS21 untersucht. Die betrachteten Stoß- bzw.

Nahtformen umfassen die I-Naht am Stumpfstoß, die I-Naht am Überlappstoß und die Stirnnaht am Überlappstoß. Der Einsatz von Zusatzmaterial wurde ebenfalls betrachtet. Im folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst dargestellt.

3.3.1 Strahl-Stoff-Wechselwirkung

Grundlegende Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstoff wurden insbesondere von NIEMEYER (1999) durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde für die Legierung AZ21X1 für Nd:YAG-Laserstrahlschweißungen der Einfluss der in den Werkstoff eingebrachten Energie auf die Einschweißtiefe untersucht. Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass ein Tiefschweißeffekt bereits bei relativ geringen Strahlintensitäten erzielt werden kann. Erwartungsgemäß ergibt sich eine Steigerung der Einschweißtiefe bei günstigeren Fokussierbedingungen. Das bedeutet, dass bei gleicher mittlerer Laserleistung die Verwendung einer kürzeren Brennweite der Fokussieroptik zu einer Steigerung der Einschweißtiefe führt [NIEMEYER 1999].

Bei einer Betrachtung der Streckenenergie (Quotient aus Strahlleistung und Vorschubgeschwindigkeit) zeigt sich, dass deren Erhöhung zunächst zu einer starken Zunahme der Einschweißtiefe führt. Erst ab einem Schwellwert, der nach NIEMEYER (1999) unabhängig von der Strahlleistung bei einer Vorschubgeschwindigkeit von etwa 2,5 m/min liegt, ergibt sich eine unterproportionale Steigerung der Einschweißtiefe und es kommt zu einer starken Zunahme der Nahtbreite. In diesem Bereich beeinflussen die thermophysikalischen Werkstoffkennwerte, wie die Wärmeleitfähigkeit, die Nahtgeometrie und die an die Nahtumgebung abgegebene Energie maßgeblich. Diese verminderte Prozesseffektivität führt zu einer erhöhten thermischen Belastung des Bauteils. Die maximale Einschweißtiefe liegt bei etwa 14 mm. Eigene Untersuchungen zur maximalen Einschweißtiefe auch bei höheren Strahlleistungen bis zu 3 kW haben gezeigt, dass ab einer Einschweißtiefe zwischen 6 mm und 8 mm eine nur noch geringe Steigerung der Einschweißtiefe möglich ist und ein starker Anstieg der Nahtbreite resultiert.

Für das CO₂-Laserstrahlschweißen wurden von NIEMEYER (1999) analoge Untersuchungen durchgeführt. Als Ergebnis kann zusammengefasst werden, dass analog zu den Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlschweißen bereits bei sehr geringen Leistungsdichten von $E \geq 0,15 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ ein Tiefschweißeffekt erreicht werden kann. Die Einschweißtiefe nimmt ebenfalls mit einer steigenden mittleren Leistungsdichte linear zu.

Bei der Betrachtung des Einflusses der Streckenenergie auf die Einschweißtiefe konnten die für die Nd:YAG-Laserstrahlung ermittelten Ergebnisse bestätigt werden.

3.3.2 Einfluss des Schutzgases

Bei den Untersuchungen von GALUN (1998) und NIEMEYER (1999) zum Laserstrahlschweißen von Magnesium hat sich gezeigt, dass die Art des eingesetzten Schutzgases und die eingesetzte Schutzgaszuführung insbesondere beim CO₂-Laserstrahlschweißen einen großen Einfluss auf das Schweißergebnis haben.

3.3.2.1 Einfluss der Gasart

Schutzgase werden eingesetzt, um Reaktionen zwischen Umgebungsluft und Schweißbad zu unterbinden. Sie haben außerdem einen entscheidenden Einfluss auf die Strahl-Stoff-Wechselwirkung. Insbesondere deren gezielte Beeinflussung kann zu einer Erhöhung der Prozessstabilität und -effizienz führen. Durch das eingesetzte Schutzgas werden die physikalischen Eigenschaften der Metaldampf-Schutzgaswolke oberhalb der Dampfkapillare gezielt beeinflusst. Reine Metaldampfwolken können den Laserstrahl absorbieren, wodurch ein Zusammenbruch des Schweißprozesses erfolgen kann. Üblicherweise werden Helium, Argon oder Stickstoff als Schutzgas eingesetzt. Die besten Schweißergebnisse sind insbesondere beim CO₂-Laserstrahlschweißen mit Helium zu erreichen [GALUN u.A. 1997, NIEMEYER 1999]. Durch den Einsatz von Helium konnte beispielsweise die maximale Einschweißtiefe von 7,8 mm mit Argon als Schutzgas auf 13,8 mm mit Helium als Schutzgas gesteigert werden [NIEMEYER 1999]. Helium hat im Vergleich zu Argon oder Stickstoff ein höheres Ionisierungspotential, wodurch die Elektronendichte im Plasma

reduziert wird, die Plasmawolke für die Laserstrahlung weitgehend transparent wird und somit die Einkopplung des Laserstrahls in das Werkstück verbessert wird. Aufgrund des geringen Molekulargewichtes von Helium ergibt sich ein weiterer Vorteil beim Schweißen von Magnesium, da auf die Schmelze ein geringerer Druck ausgeübt wird. Auf wirtschaftlicher Seite ergibt sich beim Einsatz von Helium der Nachteil, dass die Kosten von Helium im Vergleich zu anderen Schutzgasen sehr hoch liegen. Dies gilt zumindest für den westeuropäischen Raum, da hier nur geringe Heliumvorkommen existieren und Helium deshalb aus Amerika oder Russland importiert werden muss. Der Transport von Helium ist äußerst aufwendig und kostenintensiv, woraus sich der Preisnachteil ergibt.

Beim Einsatz von Argon können zumindest beim Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Magnesium ähnliche Ergebnisse wie bei Helium erreicht werden. Die Einschweißtiefe nimmt jedoch etwas ab. Ferner verändert sich die Gestalt der Nahtoberraupe, die beim Einsatz von Argon etwas grobschuppiger wird [HAFERKAMP u.A. 1998B]. Auf wirtschaftlicher Seite ergeben sich beim Einsatz von Argon jedoch Vorteile.

Bei der Auswahl des am besten geeigneten Schutzgases ist aus wirtschaftlichen Gründen im westeuropäischen Raum eine Abwägung zwischen technologischem Nutzen und wirtschaftlichem Aufwand durchzuführen. Im industriellen Einsatz wird daher oft beispielsweise für Aluminiumlegierungen ein Gasgemisch aus Helium und Argon eingesetzt. NIEMEYER (1999) schlägt eine Helium-Argon Mischung von mindestens 3:1 vor, die sich in eigenen Untersuchungen ebenfalls als günstig erwiesen hat.

3.3.2.2 Einfluss von Zuführrichtung und Gasmenge

NIEMEYER (1999) beschreibt die Einstellung der optimalen Zuführrichtung und des optimalen Zuführwinkels. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein möglichst geringer Winkel β von etwa 30° (vgl. Abb. 3.4) bei schleppender Zuführrichtung kerbenfreie Nahtoberraupe ergibt. Es ist wichtig darauf zu achten, dass die Schutzgaszufuhr angepasst an die Schweißparameter so eingestellt wird, dass kein Druck auf das Schweißbad ausgeübt wird und eine einwandfreie Schutzgaskaverne vorliegt.

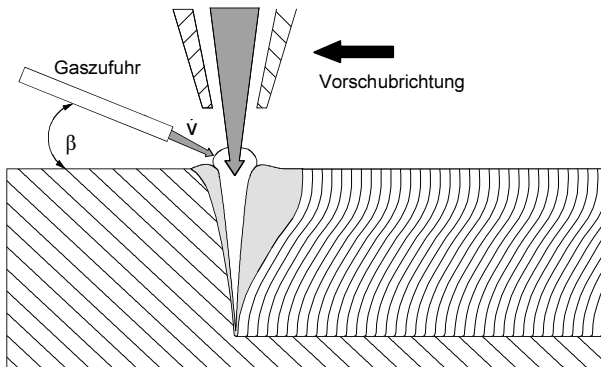


Abbildung 3.4: Gaszuführrichtung und -winkel

Die optimale Gasmenge ergibt sich daraus, dass die Schmelze aufgrund ihrer geringen Viskosität und ihrer geringen Oberflächenspannung durch den Schutzgasstrom nur gering belastet werden kann. Die optimale Gasmenge hängt somit vom eingestellten Zuführwinkel und vom gewählten Düsendurchmesser direkt ab. Werte zwischen 10 l/min und 30 l/min haben sich je nach gewählter Gesamtkonfiguration als günstig herausgestellt [GALUN U.A. 1997, NIEMEYER 1999, LEHNER U.A. 1999].

3.3.3 Metallurgie, Nahtgeometrie

Beim Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen entsteht ein feinkörniges Gefüge mit einem aluminiumreichen Mg-Mischkristall und zahlreichen $Mg_{17}Al_{12}$ -Ausscheidungen im Korngrenzeneutektikum [GALUN 1998, NIEMEYER 1999]. Aufgrund der feinkörnigen Struktur ist eine erhöhte Festigkeit und Härte bei verringerter Dehnung zu erwarten. Aufgrund von gelösten Gasen in der Matrix des Grundwerkstoffs entstehen kleine Poren im Schweißgefüge. An Stellen mit einer erhöhten Konzentration von gelösten Gasen können auch große Poren entstehen.

In Abbildung 3.5 ist eine Schweißnaht mit großen Poren, die direkt an einer Schichtgrenze entstanden sind, dargestellt. Die Schichtgrenze resultiert aus der schnelleren Erstarrung des Gefüges an den Außenschichten als im Inneren des Bauteils. Auf diese Weise kann Gas bis zur Schichtgrenze diffundieren, aber die bereits erstarrte Schicht kann nicht mehr durchwandert werden. An der Schichtgrenze sammelt sich deshalb das Gas und führt zu großen, querschnittsvermindernden Poren in der Schweißnaht.

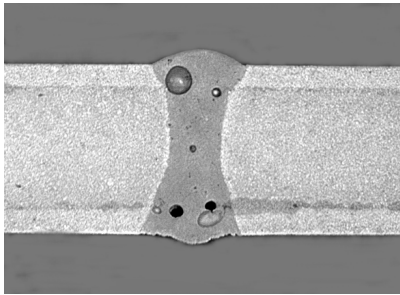


Abbildung 3.5: Schweißnaht mit Poren direkt an einer Schichtgrenze

Nach neuesten Untersuchungen von DANZER (1999) resultiert das Problem der Porosität im Grundwerkstoff bzw. der Porenbildung während des Schweißprozesses hauptsächlich aus der Bildung von Magnesiumhydrid während des Druckgießprozesses. Magnesiumhydrid ist ein Feststoff, der in Röntgenaufnahmen des Bauteils vor dem Schweißprozess nicht zu entdecken ist. DANZER (1999) schlägt deshalb eine vorausgehende Wärmebehandlung (Wasserstofffreiglühung) des Bauteils vor. Auf diese Weise wird das Magnesiumhydrid zersetzt und stört den nachfolgenden Schweißprozess nicht mehr. Es konnte nachgewiesen werden, dass auf diese Weise wärmebehandelter Grundwerkstoff porenfrei schweißbar ist.

Die Wärmeeinflusszone ist im Schliffbild anhand der Gefügestruktur nicht zu erkennen. Das feinkörnige Gefüge der Schweißnaht geht direkt in das gröbere Gefüge des Gusses über. Mit Hilfe von REM-EDX kann die Gefügezusammensetzung untersucht werden. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich festzustellen, dass in der Wärmeeinflusszone aluminiumreichere Mg-Mischkristalle angetroffen werden [KOPP 1996, NIEMEYER 1999].

Aufgrund der guten Absorptionseigenschaften von Magnesium für Laserstrahlung können schlanke Nähte mit Nahtformfaktoren bis zu $\psi = 3$ geschweißt werden. Die maximal mögliche Einschweißtiefe bei Magnesiumlegierungen liegt zwischen 6 mm und 8 mm. In Abbildung 3.6 ist der Einfluss der Laserleistung auf die Einschweißtiefe dargestellt.

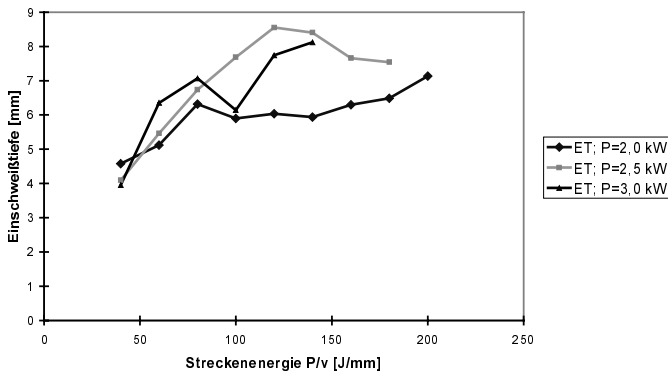


Abbildung 3.6 Einfluss der Laserleistung auf die Einschweißtiefe (ET)

Nach NIEMEYER (1999) und GALUN U.A. (1997) ist der Fokus des Laserstrahls bei 3 mm Wandstärke etwa 0,7 mm unter die Werkstückoberfläche zu legen. Bei 5 mm dicken Proben verschiebt sich die optimale Fokusslage auf etwa 2 mm unter der Werkstückoberfläche.

3.3.4 Korrosionsverhalten

Das Korrosionsverhalten laserstrahlschweißter Magnesiumwerkstücke wurde insbesondere von KOPP (1996) untersucht und im wesentlichen durch NIEMEYER (1999) bestätigt. Dabei konnte festgestellt werden, dass aufgrund der hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten in der Schweißnaht die kleinvolumigen α -Mg-Phasen von aluminiumreichen Phasen weitgehend umschlossen werden. Diese aluminiumreichen Phasen hemmen den Korrosionsfortschritt in der Schweißnaht. Im Bereich des Grundwerkstoffs liegen Gefügestrukturen vor, die wesentlich langsamer erstarrt sind. Es liegt

deshalb ein offenes Zellnetz der aluminiumreichen Phasen vor. Auf diese Weise ist ein leichtes Herauslösen von Werkstoffbereichen durch selektive Korrosion der α -Mg-Phasen möglich. Korrosionsangriff ist deshalb vorwiegend im Grundwerkstoff und der Wärmeeinflusszone zu erkennen. Poren im Grundwerkstoff oder der Schweißnaht führen ferner zu erhöhter Korrosion, da oberflächennahe Poren durch Korrosionsabtrag angeschnitten werden und sich somit die Angriffsfläche für weitere Korrosion vergrößert.

Untersuchungen zur Bildung von Kontaktkorrosion zwischen dem im ungeschliffenen bzw. ungebeizten Zustand edleren Korrosionspotential der Schweißnaht und dem unedleren Grundwerkstoff haben ergeben, dass sich je nach Ausbildung einer aluminiumreichen Passivschicht auf der Schweißnaht und dem Grundwerkstoff verstärkte Korrosion im Übergangsbereich Naht-Grundwerkstoff einstellt. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn im Nahtbereich im Gegensatz zum Grundwerkstoff eine aluminiumreiche Passivschicht ausgebildet wird und die Schweißnaht zusätzlich noch ein wesentlich edleres Korrosionspotential besitzt. Bilden sich jedoch ähnliche Passivschichten auf Grundwerkstoff und Naht kann ein nur geringer Korrosionsangriff festgestellt werden, selbst wenn ein deutlicher Potentialunterschied zwischen Naht und Grundwerkstoff existiert [KOPP 1996].

Im geschliffenen Zustand kann die Korrosionsanfälligkeit wesentlich verringert werden, da sich durch das Spülen nach dem Schleifen eine stabile Oxyd/Hydroxydschicht im Nahtbereich bilden kann. Im geschliffenen Zustand besitzt die Naht ein unedleres Korrosionspotential als der Grundwerkstoff. Dies liegt daran, dass sich beim Schweißen eine sehr feinkörnige Gefügestruktur mit aluminiumärmeren Körnern und aluminiumreichen Ausscheidungen an den Korngrenzen ergibt. Es liegt also ein Gefüge mit relativ großen, aluminiumarmen Körnern und folglich unedlerem Korrosionspotential und vielen kleinen, aluminiumreichen Phasen mit edlerem Korrosionspotential vor. Im Grundwerkstoff hingegen liegen größere Mg-Körner vor, die aufgrund ihres leicht höheren Aluminiumgehaltes ein edleres Korrosionspotential besitzen. Das sich im Nahtbereich einstellende Potential kann daher etwas unedler gegenüber demjenigen des Grundwerkstoffs sein. Da die Potentialdifferenz jedoch relativ gering ist läuft die Kontaktkorrosion sehr langsam ab [KOPP 1996].

Festigkeitsuntersuchungen laserstrahlgeschweißter und anschließend im Salzsprühnebeltest nach DIN EN 60068-2-11 korrodierter Proben haben

gezeigt, dass die Druckgusswerkstoffe AZ91 und AM50 einen erheblichen Festigkeitsabfall bei Korrosionsbelastung aufweisen. Die Legierung AM50 weist dabei den deutlichsten Festigkeitsabfall auf. Die Strangpresslegierungen AZ31 und AZ61 hingegen weisen einen nur geringen Festigkeitsabfall bzw. im Fall von AZ61 sogar eine minimale Steigerung der Festigkeit auf. Die Festigkeitssteigerung liegt aber vermutlich im natürlichen Streubereich der Festigkeitswerte [NIEMEYER 1999].

3.3.5 Mechanisch-technologische Erkenntnisse

Ein wichtiger Faktor zur Beurteilung von Schweißnähten, insbesondere für den Konstrukteur, sind die mechanisch-technologischen Kennwerte von Schweißverbindungen. Im folgenden werden deshalb die bisher erarbeiteten statischen und dynamischen Kennwerte sowie die Härte und das Korrosionsverhalten beschrieben. In einem weiteren Schritt wird der Einfluss von Bauteiltoleranzen und Verunreinigungen auf das Schweißergebnis beleuchtet.

3.3.5.1 Statische Kennwerte

Hinweise auf statische Kennwerte lassen sich bei NIEMEYER (1999), KOPP (1996), GALUN (1998) finden. Insgesamt lässt sich die Aussage ableiten, dass die erreichbaren statischen Kennwerte denen des Grundwerkstoffs weitestgehend entsprechen. Die statischen Kennwerte werden bei allen Autoren in der Regel am optimalen Betriebspunkt des Prozesses mit einer Streckenergie zwischen 30 J/mm und 40 J/mm angegeben.

Alle oben genannten Autoren stimmen überein, dass am optimalen Betriebspunkt des Prozesses 90% - 100% der Festigkeit des Grundwerkstoffs erzielbar sind. Dasselbe trifft für die Streckgrenze ($R_{p0,2}$) zu. Die Dehnungswerte nehmen im Vergleich zum Grundwerkstoff leicht ab. Die Proben zeigen durchgehend ein ausgeprägtes Sprödbbruchverhalten. Eine Einschnürung ist nicht zu erkennen.

NIEMEYER (1999) konnte mittels einer laseroptischen Feindehnungsmessung an Längszugproben feststellen, dass im elastischen und plastischen Bereich ein gleichmäßiges Dehnungsverhalten für das Schweißgut, die Wärme-

einflusszone und den Grundwerkstoff besteht. Im Bereich der maximalen Dehnung tritt jedoch überwiegend im Schweißgut ein inhomogenes Dehnungsverhalten auf. Die lokalen Dehnungsmaxima stellen die späteren Versagensorte dar.

Alle Autoren weisen übereinstimmend darauf hin, dass die Festigkeit und das Bruchverhalten sehr stark von der Qualität des Ausgangsmaterials bestimmt sind. Bei qualitativ hochwertigem Ausgangsmaterial liegt der Versagensort in der Regel am Übergang zwischen Naht und Grundwerkstoff. Der Bruch verläuft von dort häufig in den Grundwerkstoff.

Die Steifigkeit der Verbindung liegt bei qualitativ hochwertigen Schweißungen ebenfalls im Bereich derjenigen des Grundwerkstoffs.

3.3.5.2 Härte

Von GALUN (1998) und NIEMEYER (1999) durchgeführte Härtemessungen belegen, dass eine merkliche Aufhärtung des Schweißgutes nur bei (mit Aluminium) höherlegierten Magnesium-Werkstoffen auftritt. Im Grundwerkstoff werden bei den Legierungen AZ31, AZ61, AZ91 und AM50 in der Regel Härtewerte zwischen 50 HV 0,05 und 60 HV 0,05 erreicht. Das Schweißgut erreicht bei der Legierung AZ91 Härtewerte bis maximal 76 HV 0,05.

Die Aufhärtung des Schweißgutes resultiert aus den raschen Erstarrungsgeschwindigkeiten im Schweißgut, wodurch ein feineres Gefüge erzielt wird. Zusätzlich erfolgt eine Zwangslösung von Legierungselementen im Schweißgut und führt somit zu einer Gitterverspannung. Die resultierende Härte des Schweißgutes ist deshalb von der Schweißgeschwindigkeit abhängig. Die raschere Erstarrung druckgegossener Bauteile im Randbereich (an den Formwänden des Druckgusswerkzeugs) resultiert ebenfalls in höheren Härtewerten am Rand der Proben.

3.3.5.3 Dynamisches Verhalten

Im Bereich des dynamischen Verhaltens sind derzeit nur Untersuchungen von NIEMEYER (1999) zur Kerbschlagzähigkeit und zur Dauerschwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Magnesiumlegierungen sowie die Veröffentlichungen von DRAUGELATES zur Dauerschwingfestigkeit bekannt [DRAUGELATES U.A. 1996A, DRAUGELATES U.A. 1998A].

Die Arbeiten zur Kerbschlagzähigkeit von NIEMEYER (1999) für die mit einem CO₂-Laser geschweißte Legierung AZ21A haben ergeben, dass das Verhalten ungeschweißter Magnesiumproben für metallische Werkstoffe mit kubisch-raumzentriertem oder hexagonalem Gitter typisch ist. Das bedeutet, dass bei niedrigen Temperaturen nur eine geringe Kerbschlagarbeit erreicht wird ist. Mit steigenden Temperaturen nimmt die Kerbschlagarbeit stark zu.

Geschweißte Proben hingegen zeigen einen nahezu linearen Anstieg der Kerbschlagarbeit mit zunehmender Temperatur. Die Kerbschlagarbeit bei hohen Temperaturen liegt dabei wesentlich unter den Werten für die ungeschweißten Proben.

Die Untersuchungen zur Dauerschwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Magnesiumproben haben gezeigt, dass bei geschweißten Proben eine deutliche Abnahme der Dauerschwingfestigkeit im Vergleich zum ungeschweißten Material hingenommen werden muss. Selbst bei mit Zusatzmaterial geschweißten Proben, bei denen die Nahtüberhöhung abgearbeitet wurde, konnte für die Legierung AZ31 nur noch eine Neigung der Wöhlerlinie von $k=3,6$ bis $k=3,7$ erzielt werden. Im Gegensatz hierzu kann im ungeschweißten Grundmaterial eine Neigung von $k=7,9$ erreicht werden [DRAUGELATES U.A. 1998A]. Das bedeutet, dass geschweißte Proben eine stark verminderte Dauerfestigkeit aufweisen.

Diese Ergebnisse werden durch die Arbeiten von NIEMEYER (1999) bestätigt und für die Legierungen AZ91, AM50 und AZ61 ergänzt. In diesen Fällen konnten ebenfalls Neigungen von $k=3,2$ bis $k=4,4$ erreicht werden. Die Dauerfestigkeit der untersuchten Proben liegt dabei bei sehr niedrigen Werten zwischen 10 MPa und 20 MPa.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass ohne Zusatzmaterial geschweißte Proben die geringsten Dauerschwingfestigkeiten aufweisen. Mit Zusatzmaterial

geschweißte Proben müssen abgearbeitet werden um hohe Dauerwechselfestigkeiten zu ermöglichen.

3.3.5.4 Einfluss der Raumlagen

Die Schweißbarkeit dreidimensionaler Bauteile wurde von NIEMEYER (1999) anhand des Einflusses der Raumlage auf die Nahttopographie untersucht. Dazu wurden die Legierungen AZ61A und AZ91HP mit Materialstärken zwischen 2,2 und 2,6 mm geschweißt. Es konnte dabei keine signifikante Lageabhängigkeit der Nahttopographie und der Nahtporosität festgestellt werden. In diesem Materialstärkebereich kann deshalb von einer werkstoffseitigen uneingeschränkten 3D-Schweißbarkeit ausgegangen werden. Nur bei größeren Materialstärken können insbesondere in der Überkopf- und Fallposition sowie der Wannenlage geometrische Kerben in der Nahtober- und -unterraupe auftreten. Günstige Ergebnisse konnten in der Steigposition und akzeptable Ergebnisse in der Querposition erzielt werden. Insgesamt ist daher von einer guten Laserschweißbarkeit bei dreidimensionalen Bauteilen auszugehen.

3.3.5.5 Einfluss von Toleranzen

Im Produktionsbetrieb auftretende Toleranzen können das Schweißergebnis maßgeblich beeinflussen. Dabei kann einerseits Fehlern in der Positionierung des Laserstrahls und Toleranzen im Bauteil, die zu einem Fügespalt führen, unterschieden werden [REEK 2000]. Fehler in der Positionierung des Laserstrahls können beispielsweise durch Toleranzen der Handhabung oder einer ungenauen Einspannung auftreten. Fügespalte ergeben sich aufgrund von Fertigungstoleranzen bei den vorausgehenden Prozessschritten. Aufgrund dieser Fertigungstoleranzen können Fügespalte entstehen und somit ein Volumenverlust der Schweißnaht, insbesondere beim Stumpfstoß, resultieren. Dieser Volumenverlust führt zu einer Nahtunterwölbung und somit zu einer erhöhten Kerbwirkung der Schweißnaht. Dies ist insbesondere bei schwingender Beanspruchung kritisch.

Zur Erzielung hoher Dauerschwingfestigkeit ist deshalb der Einsatz von Zusatzmaterial und ein anschließendes Einebnen eventuell entstehender Nahtüberhöhungen notwendig.

Der Einfluss eines Fügespalts auf die statische Festigkeit, Strategien zur Überbrückung von größeren Fügespalten ohne den Einsatz von Zusatzmaterial sowie Untersuchungen zum Einfluss von Positionierfehlern werden in der Literatur bisher nicht erwähnt. Dasselbe trifft auf Untersuchungen zum Prozessverhalten bei einer bewussten Veränderung des Einstrahlwinkels zu. Veränderungen des Einstrahlwinkels müssen beispielsweise vorgenommen werden, wenn Nähte in der Nähe von Auskragungen des Bauteils geschweißt werden müssen, die zu einer Verminderung der Zugänglichkeit der Naht führen und somit eine Schrägstellung der Fokussieroptik notwendig wird.

3.3.5.6 Einfluss der Bauteilvorbereitung und von Verunreinigungen

Die Vorbereitung der Bauteile spielt für die Qualität des Schweißergebnisses eine große Rolle, da beispielsweise auf der Oberfläche des Bauteils vorliegende Oxydhäute zu Schweißnahtfehlern führen können [NIEMEYER 1999]. Die Oxydhäute können beim Schweißprozess in die Schmelze eingewirbelt werden und führen in der erstarrten Naht zu Bindefehlern. Andere Verunreinigungen, wie Fette oder Öle, die häufig zum Korrosionsschutz verwendet werden, können ebenfalls zu Nahtfehlern führen. Aus diesem Grund wurde der Einfluss verschiedener Oberflächenzustände bzw. verschiedener Schichten auf der Oberfläche auf die Qualität der Schweißnaht für das Elektronenstrahlschweißen von VOGELI & DOBENECK (1998) untersucht und im wesentlichen von NIEMEYER (1999) für das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen bestätigt. Als Ergebnis hat sich gezeigt, dass sich unbehandeltes Guss bzw. unbehandeltes Strangpressmaterial zwar schweißen lässt, wobei jedoch mit einem vermehrten Auftreten von Bindefehlern im Schweißgut gerechnet werden muss. Dies gilt ebenso für Öl- oder Fettschichten, die ebenfalls als schweißbar einzustufen sind, jedoch zu vermehrten Bindefehlern führen können. Ungeeignet zum Schweißen sind Lackschichten und Gussbauteile, die vor dem Schweißen imprägniert wurden.

Zur Probenvorbereitung eignen sich mechanische Verfahren wie das Schaben, Fräsen, Bürsten oder Schleifen. Ein einfaches Scheren ist als kritisch anzusehen, da bei geringer Scherqualität die Gefahr eines Volumendefizits, und somit eines Nahteinfalls, besteht. Neben den mechanischen Vorbereitungsverfahren eignen sich auch chemische Vorbereitungsverfahren wie

das Beizen zum Entfernen der Oxydschichten vor dem Schweißen. Der Schweißprozess sollte möglichst unmittelbar nach der Entfernung der Oxydhäute durchgeführt werden, da ansonsten eine neue Oxydschicht aufwächst.

In Tabelle 3.2 Sind diese Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Nahtvorbereitung	Beschichtung	Schichtdicken	Bemerkung	Ergebnis
Stoßfuge gefräst	Klarlack	~20 – 50 µm		nicht schweißbar
Stoßfuge gefräst	Oxydschicht	~50 – 100 µm		nicht schweißbar
Stoßfuge gefräst	Bohremulsion	~10 µm	Shell OX2	schweißbar
Stoßfuge gefräst	Öl	~10 µm	Anticorit	schweißbar
Stoßfuge gefräst	Imprägniert	durchgehend	Resinol RTC	nicht schweißbar
Unbehandelt	Gusshaut	~100 µm		bedingt schweißbar

Tabelle 3.2: Einfluss verschiedener Oberflächenschichten auf das Schweißergebnis

3.4 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Schweißeignung von Magnesium für das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen grundsätzlich nachgewiesen ist. Hierzu sind die Strahl-Stoff-Wechselwirkung, die metallurgischen Eigenschaften und der Einfluss der Schutzgaszuführung bestimmt worden. Weitere Erkenntnisse betreffen die erreichbaren mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindung bei statischer, schlagender und schwingender Beanspruchung am optimalen Betriebspunkt des Laserschweißprozesses. Das Verhalten der geschweißten Bauteile unter äußeren Einflüssen, wie Korrosion und Temperatur sind in diesem

Zusammenhang weitgehend erarbeitet worden. In weiteren Schritten wurde ferner der Einfluss der Nahtvorbereitung und der Einfluss verschiedener Oberflächenzustände ermittelt. Die maximal zulässigen Bauteiltoleranzen liegen im Bereich zwischen 0,1 mm und 0,3 mm, je nach geschweißter Stoßform und eingesetzter Schweißoptik und dem daraus resultierenden Fokusbereich.

Die vorliegenden Erkenntnisse lassen Aussagen über die grundsätzliche Schweißbarkeit des Bauteils zu, die im allgemeinen als gut zu bewerten ist. Dabei ist zu beachten, dass die Qualität des Grundmaterials eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Qualität der Schweißverbindung spielt. In Tabelle 3.3 sind die aus dem Stand der Technik ermittelten Erfolgsfaktoren zusammengefasst dargestellt.

Faktor	Optimaler Einstellbereich
Nahtform	I-Naht am Stumpfstoß
Gasart	He oder 70% He, 30% Ar
Gaszuführrichtung und -winkel	Schleppend bei 30°
Gasmenge	10 l/min bis 30 l/min je nach Gesamtkonfiguration
Streckenenergie (P/v)	30 J/mm bis 40 J/mm
Verunreinigungen	Gusschutt ist schweißbar, möglichst vor der Schweißung reinigen

Tabelle 3.3: Zusammenfassung der Erfolgsfaktoren zum Laserstrahlschweißen von Magnesium

Im Sinne einer sicheren und wirtschaftlichen Fertigung sind jedoch noch eine Reihe von Wissensdefiziten festzustellen (vgl. Abbildung 3.7). Diese Defizite betreffen in erster Linie Kenntnisse über das Verhalten des Laserstrahlschweißprozesses bei der Veränderung der Einstellparameter und deren Wechselwirkungen. Darüber hinaus sind nur die maximal zulässigen Toleranzen ermittelt worden. Dies lässt jedoch keine Aussagen über das Verhalten des Prozesses unter Toleranzeinfluss zu. Insgesamt müssen die mechanisch-technologischen Eigenschaften als Bewertungskriterium der

Schweißverbindungen auch für nicht optimale Prozesseinstellungen dargestellt werden.

	Wissensbedarf	gedeckt
Werkstoff	Schweißneigung	✓
	Einflüsse des Oberflächenzustandes	✓
Prozess	Prozessverhalten	■
	Toleranzeinfluss	z.T.
Eigenschaften	Mechanisch-technologische Eigenschaften	z.T.
	Verhalten unter äußeren Einflüssen	✓

Abbildung 3.7: Derzeit gedeckter Wissensbedarf

Als Handlungsbedarf stellt sich somit heraus, dass insbesondere das Prozessverhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss ermittelt werden muss. Dabei ist insbesondere auf den Einfluss von Toleranzen auf das Prozessverhalten einzugehen. Das Prozessverhalten muss dabei für die in Kapitel 2.2.4.6 und 2.2.4.7 abgeleiteten Einfluss- und Zielgrößen des Laserstrahlschweißprozesses ermittelt werden. Das bedeutet, dass Untersuchungen zum Einfluss von Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit, Fokusslage, Einstrahlwinkel, Auftreffpunkt des Laserstrahls lateral zur Naht sowie Spaltbreite auf die Zielgrößen statische Festigkeit und Nahtgeometrie durchgeführt werden müssen.

Untersuchungen zum Einfluss dieser Größen auf die dynamische Festigkeit sollen, wie bereits in Kapitel 2.2.4.7 erwähnt, nicht durchgeführt werden.

Der effiziente Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens in der Produktion erfordert jedoch neben der Ermittlung des Prozessverhaltens unter produktionsüblichen Randbedingungen auch die Umsetzung dieser Erkenntnisse in Hinweise für eine fertigungsgerechte Konstruktion.

4 Eingesetzte Versuchs- und Prüftechnik

Zur Ermittlung des Prozessverhaltens des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesium für die in Kapitel 2 ermittelten relevanten Parameter wurden eine Reihe von experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Die Versuche wurden mit Hilfe der Statistischen Versuchsmethodik geplant, durchgeführt und ausgewertet. Im folgenden werden die aufgestellten Versuchspläne sowie die untersuchten Werkstoffe und die Versuchsanlage beschrieben. Die aus den statistischen Versuchsplänen ermittelten Prozessmodelle wurden durch zusätzliche Versuche bestätigt.

4.1 Beschreibung der aufgestellten Versuchspläne

Für eine genaue Ermittlung des Prozessverhaltens sind Versuchspläne vom Typ 2^{k-p} nicht ausreichend (vgl. Kapitel 2). Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb zentral zusammengesetzte Pläne mit Zentrumsversuchen verwendet. Dabei wurde der Sternpunktastand $\alpha=1$ gewählt. Die Versuchspläne waren somit nicht mehr orthogonal oder drehbar. Mit Hilfe einer geeigneten Software war es dennoch möglich, diese Versuchspläne auszuwerten [MODDE 1999].

4.1.1 Ermittlung des grundlegenden Prozessverhaltens

Zur grundlegenden Ermittlung des Prozessverhaltens und der Prozessgrenzen wurden zunächst Versuchspläne mit den Einflußgrößen Laserleistung P , Vorschubgeschwindigkeit v und der Fokusslage F_z , die die Kernparameter des Laserstrahlschweißprozesses darstellen (vgl. Kapitel 2), für die Legierungen AZ91 und AM50 und die Wandstärken 3 mm und 5 mm aufgestellt. Geschweißt wurde eine I-Naht am Stumpfstoß. Zur Wahl der Faktorstufen wurde eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt. Die Faktorstufen wurden so eingestellt, dass ein möglichst großes Prozessgebiet abgedeckt werden kann ohne Verfälschungen der statistischen Modelle durch die Einbeziehung von Prozessgrenzen in das Versuchsgebiet.

Als Zielgrößen wurden die statischen Festigkeitskennwerte Zugfestigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A sowie die Nahtgeometrieparameter

Nahtbreite, Nahtquerschnittsfläche und Einbrandtiefe gewählt (vgl. Kapitel 2).

Als Versuchsplan wurde im Kern ein Plan vom Typ 2^3 mit den entsprechenden Sternpunkts- und Zentrumsversuchen aufgestellt. Zur Wahl der Faktorstufen siehe Tabelle 4.1. Abbildung 4.1 kann die Definition der Fokuslage entnommen werden.

	Unteres Niveau	Oberes Niveau
Leistung P [kW]	0,8	3,0
Geschwindigkeit v [m/min]	2,0	4,5
Fokuslage F_z [mm]	-2,0	0,3

Tabelle 4.1: Wahl der Faktorstufen für P , v , F_z zur Ermittlung des grundlegenden Prozessverhaltens

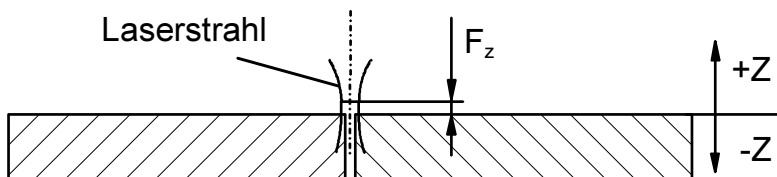


Abbildung 4.1: Definition der Fokuslage F_z

Daraus ergibt sich eine Anzahl von 17 Versuchen (2^3 Versuche + $2 \cdot 3$ Sternpunktsversuche + 3 Zentrumsversuche). Die Versuche wurden jeweils zweimal wiederholt, woraus sich eine Gesamtanzahl von 51 Versuchen ergibt. Die Versuchsreihenfolge wurde randomisiert festgelegt, um systematische Fehler auszuschließen.

Zur Auswertung wurde die in Kapitel 2 beschriebene Regressions- und Varianzanalyse durchgeführt. Im folgenden wird die statistische Analyse exemplarisch für die Legierung AM50HP bei 3 mm Dicke dargestellt.

Zur Auswertung wird zunächst das Bestimmtheitsmaß B bzw. r^2 für jede Zielgröße ermittelt. In Tabelle 4.2 sind die Bestimmtheitsmaße für die

Zielgrößen Festigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A sowie für die Nahtgeometrieparameter Nahtbreite, Nahtquerschnittsfläche und Einschweißtiefe dargestellt.

	R_m	$R_{p0,2}$	A	Nahtbreite	Nahtquerschnittsfläche	Einschweißtiefe
B	0,886	0,797	0,728	0,977	0,988	0,993

Tabelle 4.2: Bestimmtheitsmaße des Regressionsmodells für die Legierung AM50HP, 3mm

Es ist zu erkennen, dass für die Nahtgeometrieparameter bereits sehr hohe Bestimmtheitsmaße ($B \approx 1$) erreicht werden. Im folgenden wird daher beispielhaft auf die Varianzanalyse für die Festigkeit R_m eingegangen.

Zur Varianzanalyse sind zwei Nullhypothesentests durchzuführen (vgl. Kap. 2). Beim ersten Nullhypothesentest werden die Varianzen der Beobachtungsergebnisse, die durch das Regressionsmodell erklärt werden können (MS_{Reg}) mit der Restvarianz der Beobachtungsergebnisse (MS_{Res}) verglichen.

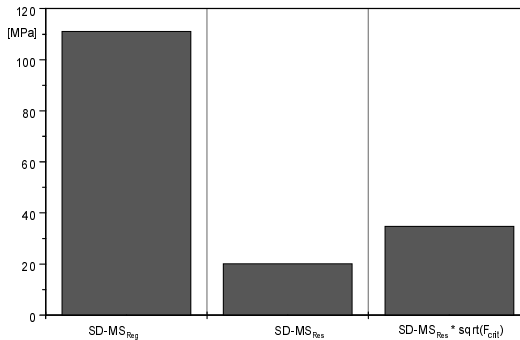


Abbildung 4.2: Vergleich der Varianzen MS_{Reg} und MS_{Res} für die Festigkeit R_m

In Abbildung 4.2 ist der Vergleich der Varianzen (MS) exemplarisch für die Festigkeit R_m dargestellt. Zur anschaulicheren Darstellung werden die

Standardabweichungen ($SD = \sqrt{MS}$) verwendet. Als Testkriterium dient der F-Test (vgl. Kapitel 2). Es ist zu erkennen, dass die Standardabweichung von MS_{Reg} größer als der Wert der Standardabweichung von MS_{Res} multipliziert mit der Wurzel des Werts aus der F-Verteilung ist. Als Konfidenzlevel wurden 99% angesetzt. Das bedeutet das Modell ist für die Zielgröße R_m zunächst akzeptabel.

Zur Beurteilung, ob das Modell noch Anpassungsdefekte aufweist, muss geprüft werden, ob der übrigbleibende Streuungsanteil größer ist als die reine Versuchsstreuung. Hierfür wird getestet, ob die Varianz MS_{LoF} größer als MS_{pe} ist. In Abbildung 4.3 ist dieser Test anschaulich dargestellt.

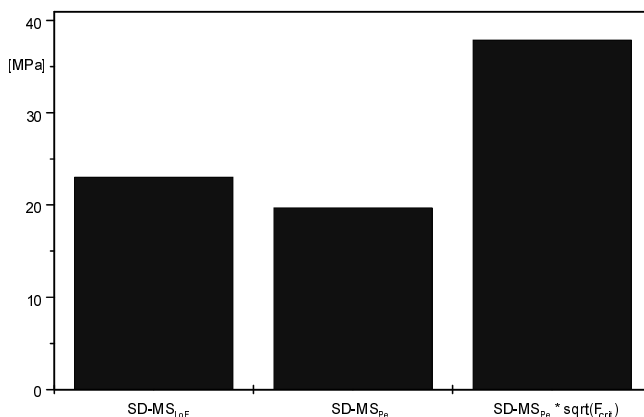


Abbildung 4.3: Vergleich der Varianzen MS_{LoF} und MS_{pe} für die Festigkeit R_m

Abbildung 4.3 kann entnommen werden, dass die Standardabweichung $SD-MS_{\text{LoF}}$ kleiner als die mit der Wurzel des Werts aus der F-Verteilung (bei einem Konfidenzlevel von 99%) multiplizierte Standardabweichung $SD-MS_{\text{pe}}$ ist. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass das Modell für die Zielgröße "Festigkeit" statistisch valide ist.

Die hier exemplarisch vorgestellte Vorgehensweise wurde für alle Zielgrößen durchgeführt. Dabei konnte für alle Zielgrößen festgestellt werden, dass das Modell statistisch valide ist. Dies gilt ebenso für die weiteren Versuchspläne für die Legierung AZ91HP bei 3 mm und 5 mm Werkstückdicke und für die Legierung AM50HP bei 5 mm Werkstückdicke.

4.1.2 Ermittlung des Einflusses produktionstypischer Randbedingungen

Für die Untersuchungen des Einflusses produktionstypischer Randbedingungen wurde zunächst neben den Kernparametern Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Fokuslage der Einstrahlwinkel α bei der Legierung AM 50 untersucht (vgl. Abbildung 4.4). Die geschweißte Nahtform war wiederum eine I-Naht am Stumpfstoß. Hierfür wurde ein weiterer Versuchsplan vom Typ 2⁴ aufgestellt. Zusätzlich wurden wiederum Sternpunktversuche und Zentrumsversuche durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Versuchsanzahl von 27 Versuchen, die wiederum zweimal wiederholt wurden. Die Gesamtversuchsanzahl ergibt somit 81 Versuche. Zur Wahl der Faktorstufen siehe Tabelle 4.3.

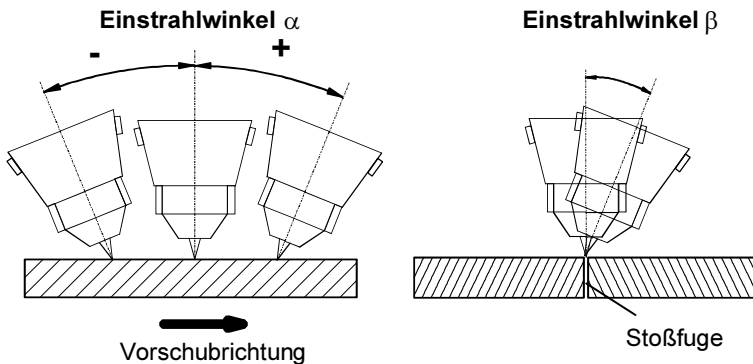


Abbildung 4.4: Einstrahlwinkel α und β

	Unteres Niveau	Oberes Niveau
Leistung P [kW]	1,5	3,0
Geschwindigkeit v [m/min]	2,0	5,5
Fokuslage F_z [mm]	-2,0	-0,3
Einstrahlwinkel α [°]	-40	45

Tabelle 4.3: Wahl der Faktorstufen für P , v , F_z und des Einstrahlwinkels α

Die Auswertung und der Nachweis der statistischen Validität erfolgte analog zu der in Kapitel 2 und im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Vorgehensweise.

In einem dritten Schritt wurden nun die Einflussparameter seitliche Fokusposition F_x (vgl. Abbildung 4.5), Einstrahlwinkel β (vgl. Abbildung 4.4) und Spaltbreite B_{sp} (vgl. Abbildung 4.5) zusätzlich untersucht. Der aufgestellte zentral zusammengesetzte Versuchsplan ist im Kern vom Typ 2^{6-1} und ergibt eine Gesamtversuchszahl von 47 Versuchen mit jeweils zwei Wiederholungen, was insgesamt 141 Versuchen entspricht. Die gewählten Faktorstufen sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

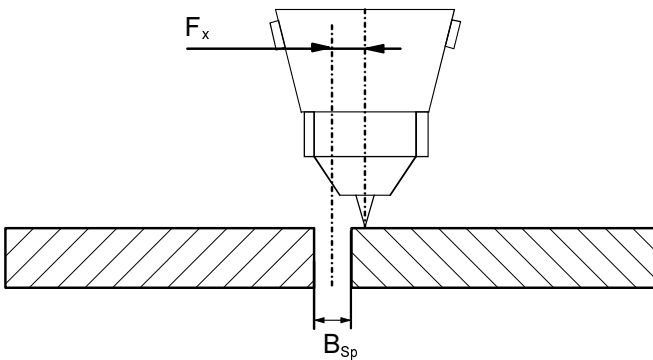


Abbildung 4.5: Definition des lateralen Versatzes der Fokusposition F_x und Spaltbreite B_{sp}

Die Auswertung und der Nachweis der statistischen Validität erfolgte wiederum analog zu der in Kapitel 2 und im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Vorgehensweise.

Als Ergebnis der statistischen Auswertung kann festgestellt werden, dass alle in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse aus den statistischen Versuchspläne bzw. die resultierenden Regressionsmodelle statistisch abgesichert sind.

	Unteres Niveau	Oberes Niveau
Leistung P [kW]	0,8	3,0
Geschwindigkeit v [m/min]	2,0	4,5
Fokuslage F_z [mm]	-2,0	0,3
Fokusposition F_{xy} [mm]	0	0,2
Einstrahlwinkel β [°]	0	20
Spaltbreite B_{sp} [mm]	0	0,2

Tabelle 4.4: Wahl der Faktorstufen für P , v , F_z sowie der seitlichen Fokusposition F_x , des Einstahlwinkels β und der Spaltbreite B_{sp}

4.2 Versuchswerkstoffe und Prozessgas

Für die Untersuchungen wurden die Legierungen AZ91 und AM50 verwendet. Die verwendeten Probeplatten wurden weder vor noch nach dem Schweißprozess wärmebehandelt.

Die Zusammensetzung der Legierungen wurde mittels Spektralanalyse ermittelt und ist Tabelle 4.5 zu entnehmen.

	Al [%]	Zn [%]	Mn [%]	Si [%]	Cu [%]	Ni [%]	E [%]
AZ91HP	8,40	1,06	0,226	0,0194	0,0034	0,00297	0,00644
AM50HP	4,40	0,00403	0,387	0,00501	0,00244	0,00289	0,00329

Tabelle 4.5: Zusammensetzung der untersuchten Legierungen

Die Versuche wurden jeweils für die Dicken $d=3$ mm und $d=5$ mm durchgeführt. Zur Nahtvorbereitung wurden die Fügeanten gefräst, damit Spalte gezielt eingestellt werden konnten bzw. ein technischer Nullspalt erreicht werden konnte.

Die eingesetzten Versuchsplatten wurden unter Vakuum vergossen. Im folgenden werden in Tabelle 4.6 einige mechanisch-technologische Eigenschaften der eingesetzten Legierungen dargestellt.

	R_m [MPa]	R_{p0,2} [MPa]	A [%]
AZ91HP, 3mm	190-220	110-130	2-3
AZ91HP, 5mm	170-200	100-120	1,5-2,5
AM50HP, 3mm	180-215	110-120	6-7
AM50HP, 5mm	170-200	100-120	5-6

Tabelle 4.6: Mechanisch-technologische Eigenschaften der eingesetzten Versuchsplatten

Aufgrund der günstigen technologischen Eigenschaften von Helium (vgl. Kap. 3.3.2.1) wurde für die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen ausschließlich Helium der Reinheit 4.6 (Reinheit > 99,996 Vol.-%) als Schutzgas eingesetzt.

4.3 Beschreibung der verwendeten Laserschweißanlage

Die für die Schweißversuche eingesetzte Anlage besteht aus einem Nd:YAG-Festkörperlaser, einer Strahlführung mittels Lichtleitfaser und einer Schweißoptik sowie einem Industrieroboter als Handhabungsgerät. Im folgenden werden diese Komponenten der Anlage näher beschrieben.

4.3.1 Lasergerät und Strahlführung

Als Nd:YAG-Laserstrahlquelle wird ein Gerät der Firma Haas Laser GmbH vom Typ HL3006D verwendet. Die technischen Daten dieses Lasers können Tabelle 4.7 entnommen werden.

Laserstrahlquelle	HL3006D, Haas Laser GmbH
Lasertyp	Nd:YAG-Laser (pw, cw)
Wellenlänge	1064 nm
Leistungsbereich	30-3000W
Leistungsstabilität	Geregelt
Mode	Multimode
Strahldurchmesser	ca. 20 mm
Polarisation	Unpolarisiert

Tabelle 4.7: Technische Daten des eingesetzten Nd:YAG-Lasers

Die Strahlführung zur Bearbeitungsoptik erfolgt über eine Lichtleitfaser mit einem Durchmesser von 600 μm . Die Fokussierung in der Bearbeitungsoptik erfolgt mittels Linsen der Brennweite $f_f=100\text{ mm}$, wodurch ein Abbildungsverhältnis von 1:2 erreicht wird. Der resultierende Fokusdurchmesser liegt bei ca. 400 μm (vgl. Abbildung 4.6). Als maximale mittlere Leistung am Werkstück können $P_L=3000\text{ W}$ realisiert werden. In Abbildung 4.6 ist die Strahlkaustik und das Leistungsdichteprofil für einen definierten Strahlparameter dargestellt.

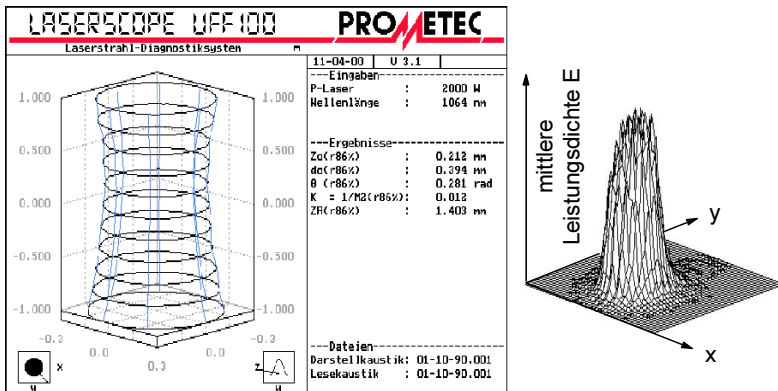


Abbildung 4.6: Strahlkaustik und Leistungsdichteprofil des verwendeten Nd:YAG-Lasers bei einer Laserleistung von 2000 W

4.3.2 Bearbeitungsoptik

Im Rahmen dieser Arbeit wird für sämtliche Schweißversuche, der in Abbildung 4.7 dargestellte Laserstrahlschweißkopf verwendet. Zur Minimierung der Verschmutzung des materialseitig vor der Fokussierlinse liegenden Schutzglases steht ein Cross-Jet zur Verfügung mit dessen Hilfe Spritzer und Schweißrauch abgelenkt werden können. Auf diese Weise wird das Schutzglas weitgehend vor Verschmutzung und Zerstörung geschützt und eine gleichbleibende Strahlqualität am Werkstück ist möglich. Das im Rahmen dieser Arbeit für den Cross-Jet verwendete Medium ist Helium.

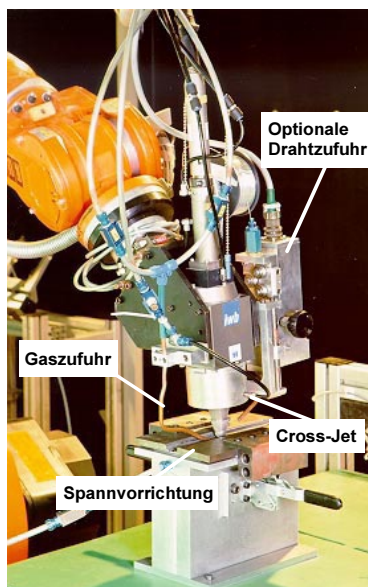


Abbildung 4.7: Für die Versuche eingesetzte Bearbeitungsoptik

Die Zuführung des Schutzgases erfolgt über eine seitlich angebrachte Kupferdüse, die eine variable Einstellung des Zuführwinkels und des Düsenabstandes zulässt. Für die Schweißuntersuchungen wird eine Düse mit einem Durchmesser von 2 cm verwendet. Die Düse ist so ausgelegt, dass ein laminarer Schutzgasstrom erreicht wird. Die Durchflussmenge des

Schutzgases wird bei 30 l/min eingestellt. Der eingestellte Zufuhrwinkel liegt bei 40°.

4.3.3 Handhabungsgerät

Zur Erzeugung der Vorschubgeschwindigkeit wird ein Industrieroboter eingesetzt (s. Tabelle 4.8).

Robotertyp	IR365/30.0, Kuka
Steuerung	RC30/51
Tragkraft	30 kg
Arbeitsraum	1,5x1,5x2m ³
Wiederholgenauigkeit	0,02 – 0,1 mm
Bahngenauigkeit	0,4 – 1,2 mm

Tabelle 4.8: Technische Daten des verwendeten Handhabungsgerätes

Zum Ausgleich der Beschleunigungs- und Abbremsphase des Roboters wird jeweils ein Vor- bzw. Nachlauf von 100 mm eingestellt, wodurch eine konstante Bahngeschwindigkeit im Bereich der Schweißnaht erreicht wird

Zum Ausgleich der geringen Bahngenauigkeit des Roboters wurden die Bahnen vor jeder Schweißung neu geteacht.

4.4 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuche wurden statische Zugversuche durchgeführt und metallographische Schliffe erstellt.

Die Zugprüfung erfolgte mit einer Zugprüfmaschine Z020 der Firma Zwick. Die Durchführung der Zugversuche erfolgte in Anlehnung an DIN EN 10002. Lediglich die Probenform wurde gemäß Abbildung 4.8 modifiziert [DRAUGELATES U.A. 1997]. Dabei liegt die Schweißnaht an der schmalsten

Stelle der Probe, um einen Bruch in der Schweißnaht zu gewährleisten. Die Nahtüberstände bzw. ein Nahtrückfall wurden nicht abgearbeitet. Auf diese Weise können die Eigenschaften der Schweißnähte entsprechend einem realen Einsatzfall ohne Nacharbeit der Schweißnähte geprüft werden.

Die nicht normgerechte Form der Zugproben lässt eine übertragbare Darstellung der in dieser Arbeit ermittelten Werte für die Größen Festigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A nicht zu. Diese Größen werden daher durch ein zusätzliches Sternsymbol (R_m^* , $R_{p0,2}^*$, A^*) gekennzeichnet, um eine Verwechslung mit den Normgrößen zu vermeiden.

Als Bezugsgröße für die Spannungswerte wird im Rahmen dieser Arbeit die Probendicke definiert, da eine Durchschweißung als gewünschter Fall für eine Stumpfstoßverbindung angesehen wird. Diese Vorgehensweise ist gewählt worden, aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit, das Toleranzfeld oben beschriebener Einstellparameter bzw. die Prozessfenstergröße des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesium zu ermitteln.

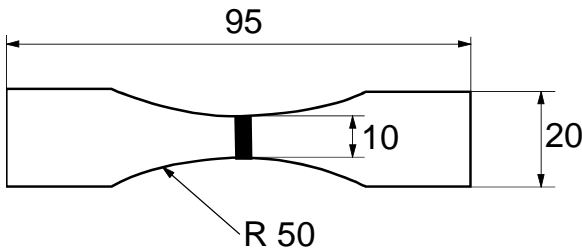


Abbildung 4.8: Geometrie der Zugproben

Die metallographischen Schliffe wurden geschliffen, feingeschliffen und mit Diamant poliert. Abschließend wurden die Proben mit entmineralisiertem Wasser gereinigt. Die Ätzung der Schliffe erfolgte mit einer Mischung aus Äthylenglykol (75 ml), destilliertem Wasser (24 ml) und Salpetersäure (1 ml). Die Ätzzeit betrug mehrere Sekunden.

Mikroschliffe wurden mit einem Auflichtmikroskop der Firma Leitz aufgenommen. Makroschliffe wurden mit einem Stereomikroskop der Firma Wild aufgenommen. Die Vermessung der Nahtgeometrieparameter erfolgte mit dem Bildanalyseprogramm Digitrace der Firma Imatech.

5 Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozess von Magnesiumdruckguss

Im Rahmen dieses Kapitels wird das grundlegende Verhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesium sowie das Verhalten unter fertigungstechnischen Randbedingungen beschrieben. Hierfür werden die Ergebnisse, die mit Hilfe der in Kapitel 2 bzw. Kapitel 4 dargestellten statistischen Versuchspläne erarbeitet wurden, dargestellt.

Im Rahmen der Abschnitte 5.1 und 5.2 wird der grundlegende Einfluss der verschiedenen Einflussgrößen auf die jeweiligen Zielgrößen herausgearbeitet. Zur Darstellung der Einflüsse werden deshalb in den Abschnitten 5.1 und 5.2 die Hauptwirkungen der jeweiligen Einflussgröße dargestellt. Zur vollständigen Beschreibung des Prozessverhaltens werden in Abschnitt 5.3 die Wechselwirkungen der Einflussgrößen untereinander dargestellt.

In den in Kapitel 5.1 und 5.2 dargestellten Diagrammen wird der 99%-Vertrauensbereich angegeben (vgl. Abbildung 5.1).

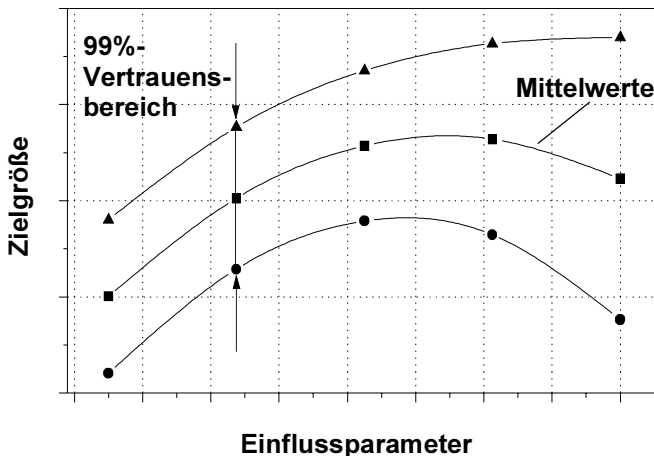


Abbildung 5.1: Darstellung der Versuchsergebnisse

5.1 Grundlegendes Prozessverhalten

Im Rahmen dieses Punktes werden die grundlegenden Einflüsse der Laserleistung P , der Schweißgeschwindigkeit v und der Fokuslage F_z auf die statischen Festigkeitsparameter Zugfestigkeit R_m^* , Streckgrenze $R_{p0,2}^*$ und die Bruchdehnung A^* sowie die Nahtgeometrieparameter Nahtbreite B_N , Nahtquerschnittsfläche A_{NQ} und die Einschweißtiefe ET beschrieben. Die Darstellung der statischen Festigkeitsparameter erfolgt durchgehend für durchgeschweißte Proben. Die Betrachtung der Nahtgeometrieparameter erstreckt sich auch auf nicht durchgeschweißte Proben. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden mit den in Kapitel 4.1.1 dargestellten Versuchsplänen ermittelt.

5.1.1 Einfluss der Laserleistung

5.1.1.1 Nahtgeometrie

Die Laserleistung hat einen deutlichen Einfluss auf die Nahtgeometrieparameter. Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.4 kann die Wirkung der Laserleistung entnommen werden. Zur besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Lasersysteme werden in den Diagrammen nicht die Laserleistung sondern die Streckenenergie und bei der Einschweißtiefe (Abbildung 5.4) die Intensität angegeben.

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Laserleistung die Nahtbreite, die Nahtquerschnittsfläche und die Einschweißtiefe linear zunehmen (vgl. Abbildung 5.2, 5.3 und 5.4). Für den qualitativen Verlauf spielt die Materialstärke ebenso wie die Legierung nur eine geringe Rolle. Das Abflachen des Kurvenverlaufs bei höheren Laserleistungen ist darauf zurückzuführen, dass bei den höheren Leistungen und der für diese Versuche verwendeten Materialstärken von 3 mm bzw. 5 mm Durchschweißungen erzielt wurden und ein Teil der Energie nach unten aus dem Keyhole ausgetreten ist. Dies führt zu geringeren Zunahmen der Nahtbreite und der Nahtquerschnittsfläche.

Im konkreten Einzelfall können auch bei niedrigeren Laserleistungen und langsamen Schweißgeschwindigkeiten Durchschweißungen erzielt werden,

wohingegen bei hohen Laserleistungen und sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten der Fall eintreten kann, dass keine Durchschweißung mehr erzielt wird. Im Mittel bzw. als generelle Tendenz kann jedoch die Aussage getroffen werden, dass eine Leistungserhöhung zu einer annähernd linearen Zunahme der Nahtgeometrieparameter führt.

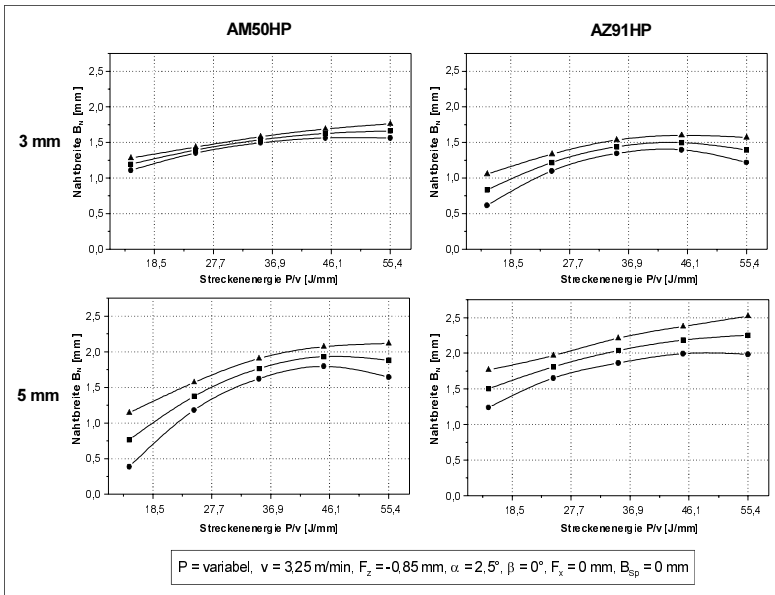


Abbildung 5.2: Einfluss der Streckenenergie P/v auf die Nahtbreite B_N bei Veränderung der Laserleistung P .

Es wird darauf hingewiesen, dass die maximal erreichbaren Einschweißiefen im Bereich zwischen 8 mm und 10 mm bei einer Laserleistung von 3 kW liegen (vgl. Kapitel 3.3.3). Bis dahin (ausgehend von den hier vorliegenden Versuchen bis 5 mm Dicke) kann von einer weiteren annähernd linearen Zunahme der Nahtbreite und der Nahtquerschnittsfläche ausgegangen werden, was durch zusätzliche Versuche bestätigt wurde. Hierfür wurde bei einer Laserleistung von 3 kW sukzessive eine geringere Schweißgeschwindigkeit gewählt. Es hat sich gezeigt, dass nach Erreichen der maximalen Einschweißtiefe, der überwiegende Anteil der Energie in die Verbreiterung der Nahtbreite bzw. des Nahtquerschnitts fließt und somit ein

Übergang auf das Wärmeleitungsschweißen festzustellen ist [REINHART U.A. 1997].

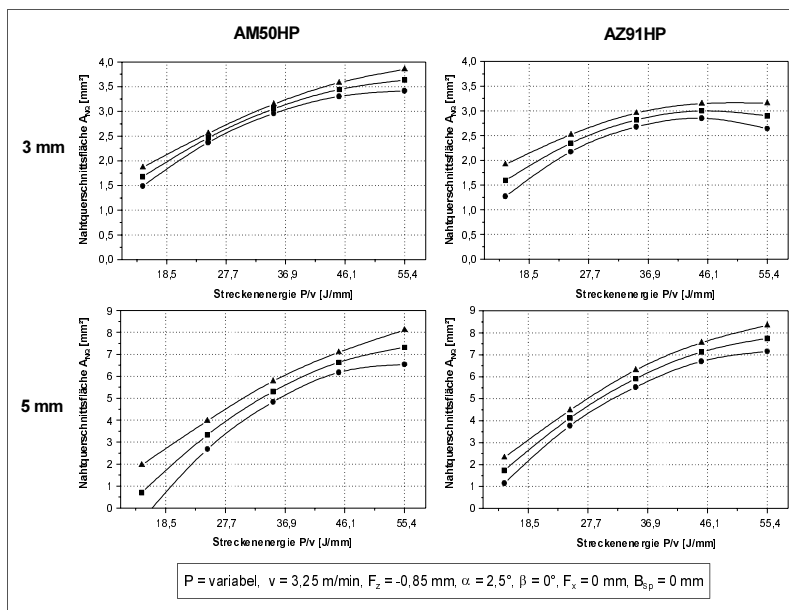


Abbildung 5.3: Einfluss der Streckenenergie P/v auf die Nahtquerschnittsfläche A_{NQ} bei Veränderung der Laserleistung P .

Insgesamt kann also von einer annähernd linearen Zunahme der Nahtgeometrieparameter bis zum Erreichen einer Durchschweißung oder einer maximalen Einschweißtiefe ausgegangen werden. Anschließend ist im Fall der Durchschweißung eine geringere Zunahme und im Fall der maximalen Einschweißtiefe eine stärkere Zunahme der Nahtbreite und Nahtquerschnittsfläche zu erwarten.

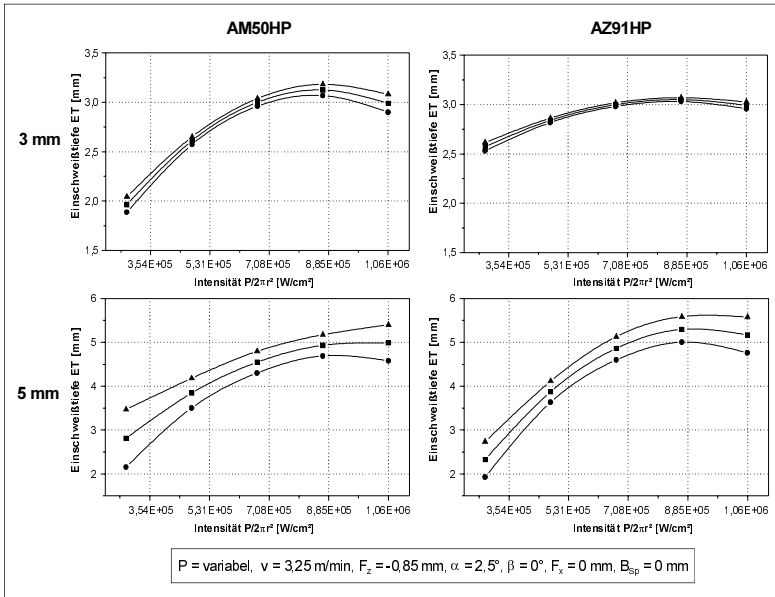


Abbildung 5.4: Einfluss der Intensität $P/2\pi r^2$ ($r=0,212$ mm) auf die Einschweißtiefe ET bei Veränderung der Laserleistung P.

5.1.1.2 Statische Festigkeitsparameter

Die Laserleistung hat auf die statischen Festigkeitsparameter bei Durchschweißungen nur einen geringen Einfluss. Tendenziell ist mit der Zunahme der Laserleistung ein geringer Anstieg der Festigkeitswerte zu beobachten. Es stellt sich ein Grenzwert ein, der im Fall der Bruchfestigkeit R_m^* und der Streckgrenze $R_{p0,2}^*$ zwischen 80% und 90% der Festigkeit des Grundmaterials liegt.

Die besten Ergebnisse werden bei 3 mm dicken Proben in einem Bereich zwischen $P = 2,0$ kW und $P = 2,5$ kW erzielt. Für Proben mit 5 mm Dicke sollte eine etwas höhere Laserleistung zwischen $P = 2,5$ kW und $P = 3,0$ kW eingestellt werden (vgl. Abbildung 5.5.). Der Einfluss der Laserleistung auf die Streckgrenze zeigt ein ähnliches Verhalten wie auf die Bruchfestigkeit. In Abbildung 5.6 wird daher nur der Einfluss für 3 mm dicke Proben exemplarisch aufgezeigt.

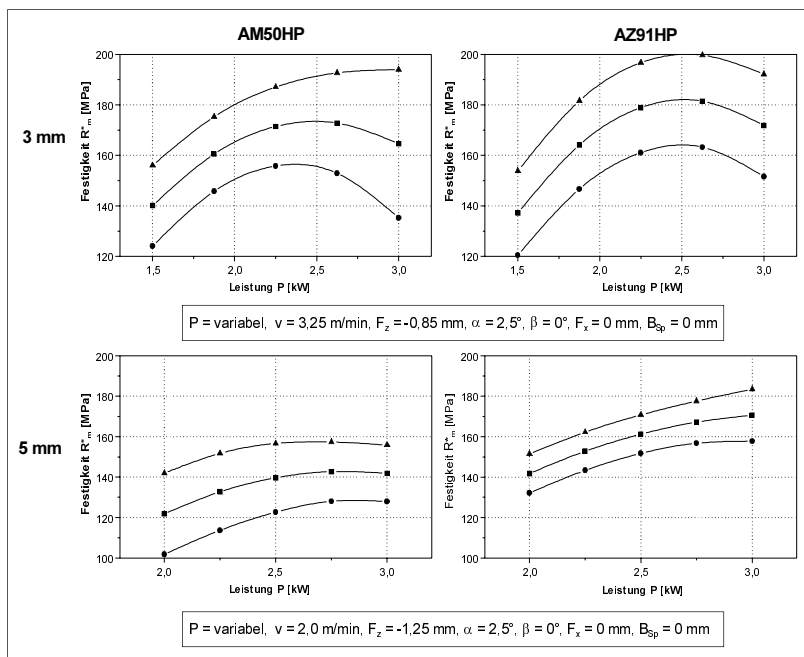


Abbildung 5.5: Einfluss der Laserleistung P auf die Festigkeit R_m^* .

Die Wirkung der Laserleistung auf die Bruchdehnung verhält sich bei 3 mm und 5 mm dicken Proben unterschiedlich. Während bei 3 mm dicken Proben nur ein geringer Einfluss der Laserleistung zu beobachten ist, ist bei den 5 mm dicken Proben insbesondere bei der Legierung AM50HP ein linearer Anstieg der Bruchdehnung mit der Laserleistung zu beobachten. Bei der Bruchdehnung können Werte bis zu 100% derjenigen des Grundmaterials erreicht werden, wobei die maximal erreichbaren Dehnungen bei den Proben mit 5 mm Dicke etwas niedriger im Vergleich zu den 3mm dicken Proben liegen (vgl. Abbildung 5.7). Bei der Legierung AM50HP kann zusätzlich beobachtet werden, dass die Dehnungswerte der 5 mm dicken Proben deutlich unter denjenigen der 3 mm dicken Proben liegen, was auf die schlechtere Gussqualität der 5mm dicken Proben zurückzuführen ist.

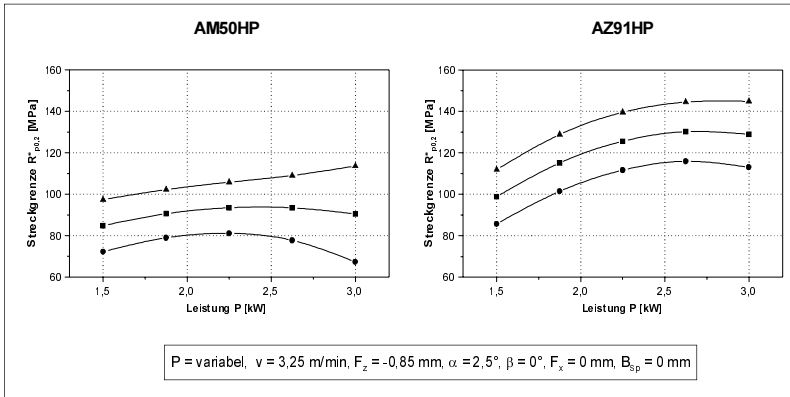


Abbildung 5.6: Einfluss der Laserleistung P auf die Streckgrenze $R_{p0,2}^*$ bei Proben der Dicke 3 mm.

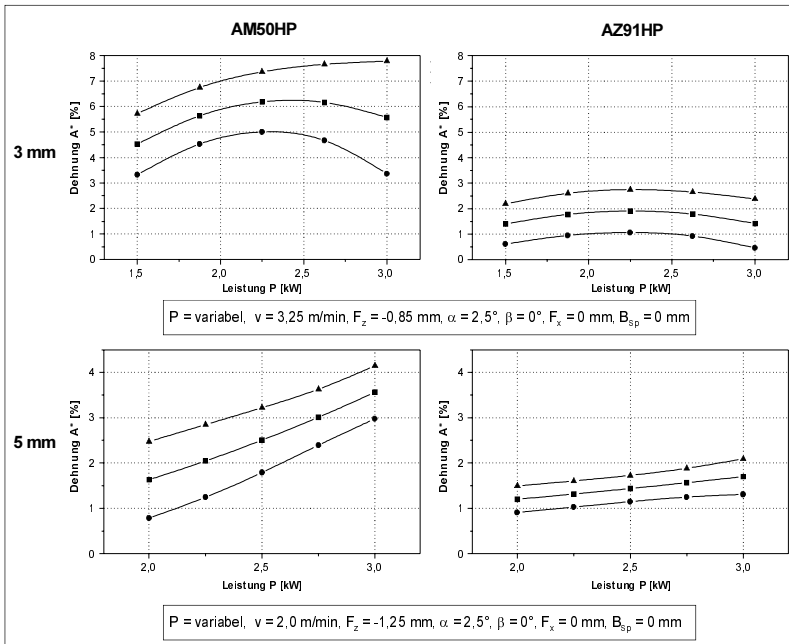


Abbildung 5.7: Einfluss der Laserleistung P auf die Dehnung A^* .

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass höhere Laserleistungen zu einer Erhöhung der Festigkeit und Dehnung der Verbindung führen. Dieser Effekt kann damit begründet werden, dass bei höheren Leistungen kürzere Aufheiz- und Abkühlzyklen des Werkstoffs erreicht, wodurch sich ein feinkörnigeres Gefüge mit günstigeren mechanisch-technologischen Eigenschaften einstellen kann [vgl. auch NIEMEYER 1999]. Die Qualität des Grundmaterials hat einen großen Einfluss auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindung.

5.1.2 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit

5.1.2.1 Nahtgeometrie

Eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit führt zu einer Reduzierung aller Nahtgeometriegrößen, da durch die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit bei konstanter Laserleistung weniger Energie pro Streckeneinheit (Reduzierung der Streckenenergie) in das Bauteil eingebracht wird. Die Darstellung der Wirkung der Schweißgeschwindigkeit wird exemplarisch anhand der Legierungen AZ91HP und AM50HP mit einer Dicke von 3 mm aufgezeigt. Das qualitative Verhalten bei 5mm Dicke entspricht den hier dargestellten Ergebnissen.

Zur besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Lasersysteme werden in den Diagrammen 5.8 und 5.9 nicht die Schweißgeschwindigkeit sondern die Streckenenergie angegeben.

Die Nahtbreite nimmt mit steigender Streckenenergie bzw. sinkender Schweißgeschwindigkeit zu (vgl. Abbildung 5.8). In Zusammenhang mit Kapitel 5.1.1.1 kann somit die Aussage getroffen werden, dass sich eine Erhöhung der Laserleistung bei durchgeschweißten Proben nur noch gering auf die Nahtbreite auswirkt, wohingegen mit einer Senkung der Schweißgeschwindigkeit die Nahtbreite weiter erhöht werden kann.

Die Nahtquerschnittsfläche verhält sich ähnlich wie die Nahtbreite. Bei einer Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit nimmt die Querschnittsfläche nahezu linear ab (siehe Abbildung 5.9). Die Reduzierung der Nahtquerschnittsfläche

entspricht dabei in etwa der Reduzierung, der in das Werkstück eingebrachten Energie.

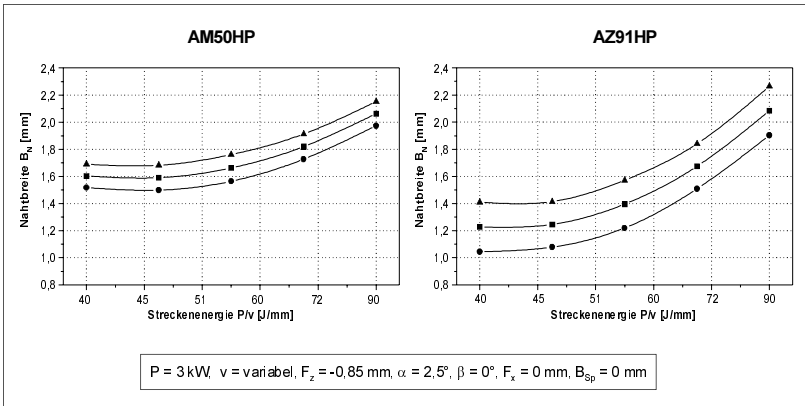


Abbildung 5.8: Einfluss der Streckenenergie P/v auf die Nahtbreite B_N bei Veränderung der Schweißgeschwindigkeit v und 3 mm dicken Proben

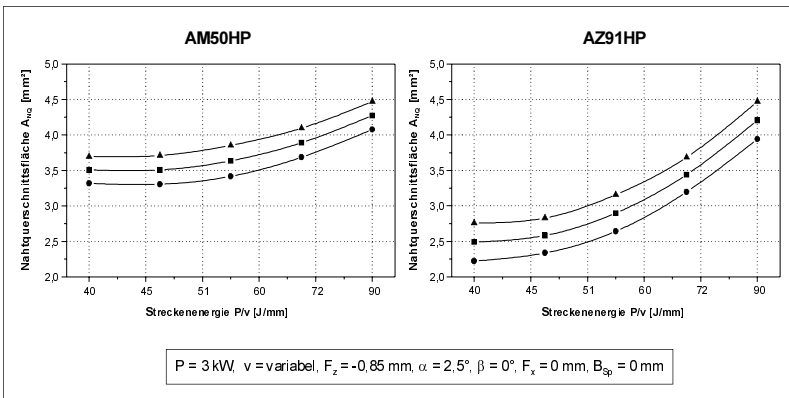


Abbildung 5.9: Einfluss der Streckenenergie P/v auf die Nahtquerschnittsfläche A_{NQ} bei Veränderung der Schweißgeschwindigkeit v und 3 mm dicken Proben.

Die Einschweißtiefe hängt insbesondere von der auf das Werkstück eingestrahlten Intensität und somit der Laserleistung ab (vgl. auch BEYER (1995)). Reicht die Intensität bzw. die Laserleistung nicht aus um durchzuschweißen, dann nimmt die Einschweißtiefe mit steigender Schweißgeschwindigkeit ab.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit Nahtbreite und Nahtquerschnittsfläche abnehmen. Die Einschweißtiefe wird insbesondere durch die Laserleistung bzw. die eingestrahlte Intensität beeinflusst.

5.1.2.2 Statische Festigkeitsparameter

Die statische Festigkeit $R_m^{*1)}$, die Streckgrenze $R_{p0,2}^{*1)}$ sowie die Bruchdehnung $A^{*1)}$ werden durch die Schweißgeschwindigkeit im untersuchten Geschwindigkeitsbereich zwischen 2 m/min und 4,5 m/min bei jeweils durchgeschweißten Proben nicht signifikant beeinflusst. Erst bei sehr hohen und sehr niedrigen Schweißgeschwindigkeiten ergibt sich eine tendenzielle Abnahme der Festigkeitswerte. Dieser Effekt konnte durch zusätzliche Untersuchungen des Geschwindigkeitseinflusses bestätigt werden. Dabei hat die Werkstückdicke nur einen quantitativen Einfluss auf dieses Verhalten.

In Abbildung 5.10 wird dieses Verhalten deshalb exemplarisch nur am Einfluss der Streckenenergie (unter Veränderung der Schweißgeschwindigkeit) auf die statische Festigkeit für Proben mit 3 mm Dicke dargestellt. Abbildung 5.11 können die Versuchsergebnisse aus zwei Versuchsreihen bei der Legierung AZ91HP und einer Dicke von 3 mm entnommen werden, die zum Vergleich mit einem CO₂-Laser geschweißt wurden. Hierfür werden die Ergebnisse der Versuchsreihen direkt dargestellt, wodurch auch die starke Streuung der Versuchsergebnisse zu erkennen ist. Es zeigt sich das gleiche prinzipielle Verhalten trotz der stark unterschiedlichen Versuchsbedingungen.

Die Abnahme der Festigkeit bzw. der übertragbaren Kräfte bei hohen Schweißgeschwindigkeiten kann damit begründet werden, dass vermehrt

¹⁾Der Stern bei R_m^* , $R_{p0,2}^*$ und A^* kennzeichnet, dass die Festigkeitswerte mit nicht normgerechten Proben ermittelt wurden (vgl. Kap. 4).

Unregelmäßigkeiten mit hoher Kerbwirkung wie Nahtrandkerben oder ein scharfkantiger Nahteinfall auftreten (vgl. Abbildung 5.12).

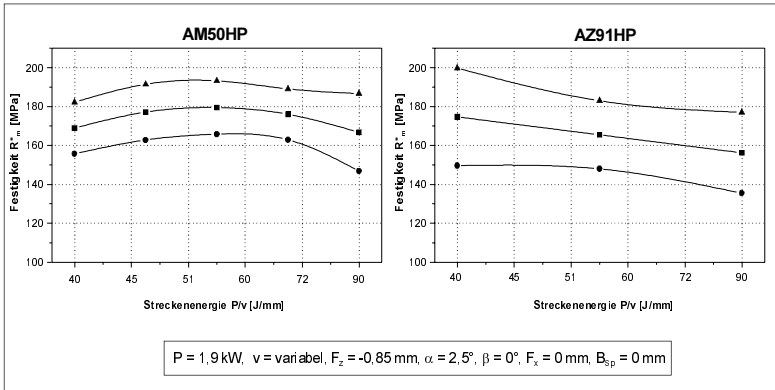


Abbildung 5.10: Einfluss der Streckenenergie P/v auf die statische Festigkeit R_m^* bei Veränderung der Schweißgeschwindigkeit und 3 mm dicken Proben.

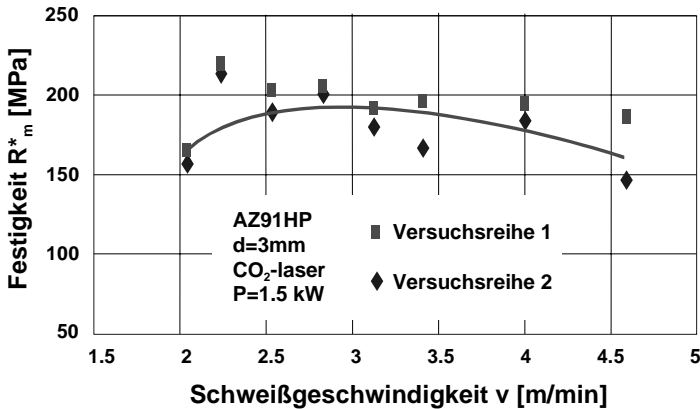


Abbildung 5.11: Vergleichende Schweißung mit einem CO₂-Laser: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit v auf die statische Festigkeit R_m^* (nach REINHART U.A. (1998))

Niedrige Schweißgeschwindigkeiten führen zu Nahtdurchhängen, die eine geringe Querschnittsverminderung zur Folge haben. Die Kerbwirkung der

Nahtdurchhänge, die aus niedrigen Schweißgeschwindigkeiten resultieren, ist gegenüber derjenigen bei hohen Schweißgeschwindigkeiten deutlich geringer, da aufgrund der wesentlich breiteren Nähte in der Regel kein scharfkantiger Nahteinfall auftritt.

In Abbildung 5.12 sind Querschliffe der Legierung AZ91HP bei verschiedenen Geschwindigkeiten dargestellt. Insgesamt ist die Abnahme der Festigkeit bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten etwas geringer als die Abnahme bei hohen Schweißgeschwindigkeiten. Der Geschwindigkeitsbereich ohne signifikante Änderung der Festigkeit bzw. der Bruchdehnung ist dabei im Vergleich zu den beim Werkstoff Aluminium erreichbaren Geschwindigkeitsänderungen sehr groß.

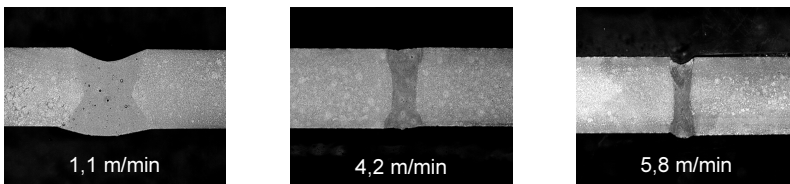


Abbildung 5.12: Querschliffe von I-Nähten bei verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten, Nd:YAG-Laser, AZ91HP, 3 mm, $P=2,5$ kW.

5.1.3 Einfluss der Fokusslage

5.1.3.1 Nahtgeometrie

Die Fokusslage hat auf die Nahtgeometrieparameter Nahtbreite B_N und Nahtquerschnittsfläche A_{NQ} sowohl bei AZ91HP als auch bei AM50HP keinen signifikanten Einfluss. Dieses Verhalten ist exemplarisch in Abbildung 5.13 dargestellt.

Bei niedrigen Laserleistungen hat eine Veränderung der Fokusslage aufgrund der Veränderung der Intensität auf der Werkstückoberfläche einen Einfluss auf die Einschweißtiefe. Eine Einstellung der Fokusslage in der Nähe der Oberfläche führt dabei zu einer Zunahme der Einschweißtiefe (vgl. Abbildung 5.14). Bei hohen Laserleistungen konnte dieser Effekt nicht

nachgewiesen werden, da dort die Intensität ausreichend war, um die Proben durchzuschweißen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich dieser Effekt auch auf hohe Laserleistungen übertragen lässt.

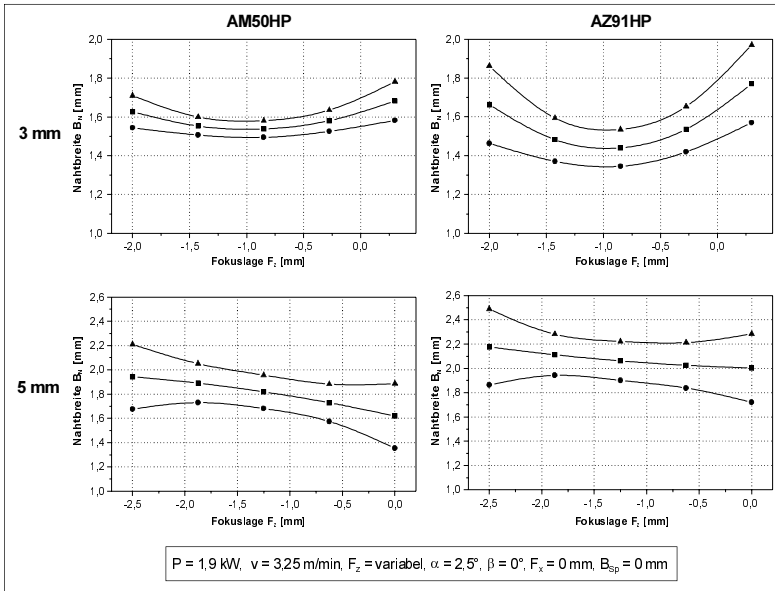


Abbildung 5.13: Einfluss der Fokusslage F_z auf die Nahtbreite B_N .

Eine Verschiebung der Fokusslage in das Bauteil und somit eine Defokussierung des Laserstrahls bzw. Veränderung der Intensität am Werkstück hat jedoch einen deutlichen Einfluss auf die Naht- bzw. Oberrauenqualität. Dies trifft insbesondere bei nicht durchgeschweißten Nähten zu. Die deutliche Defokussierung beruhigt das Schmelzbad. Eine Fokusslage direkt an der Oberfläche des Bauteils führt zu einer drastischen Zunahme an eruptiven Nahtauswürfen und somit zu einer äußerst unruhigen Oberraupe. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die bei BEYER (1995) beschriebene Verengung des Keyholes bei Fokusslagen nahe der Oberfläche sein. Hierdurch wird die Entgasung aus dem Keyhole erschwert, wodurch sich im Keyhole ein erhöhter Druck aufbaut, der zu diesen Nahtauswürfen führt.

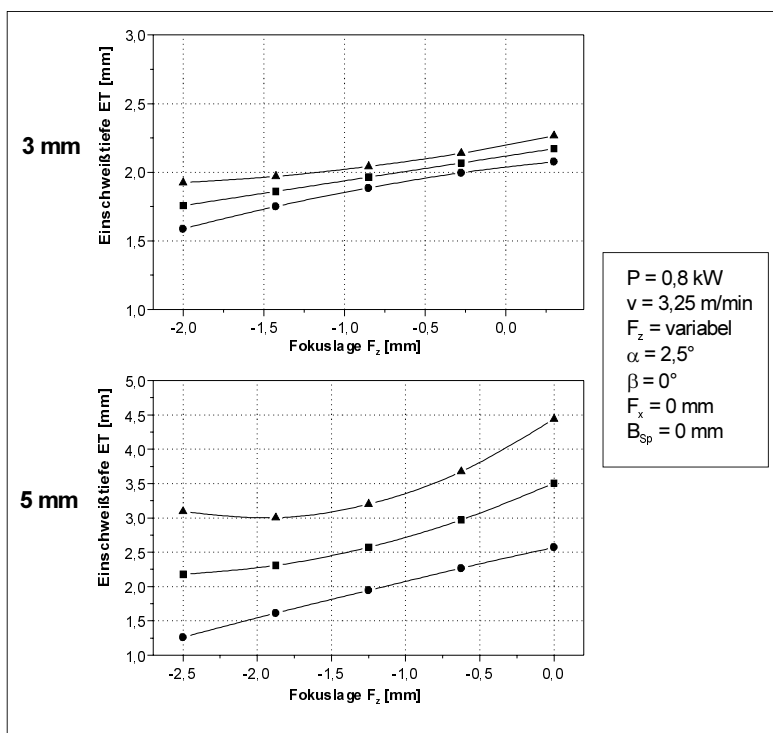


Abbildung 5.14: Einfluss der Fokuslage F_z auf die Einschweißtiefe ET bei niedriger Laserleistung ($P=0,8 \text{ kW}$). AM50HP.

In Abbildung 5.15 sind Querschliffe von Schweißnähten der Legierung AZ91HP bei einer Laserleistung von $3,0 \text{ kW}$ und einer Schweißgeschwindigkeit von $2,0 \text{ m/min}$ bei niedriger und hoher Fokuslageneinstellung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei einer Fokuslage nahe der Oberfläche eine unregelmäßige Oberraupe entsteht.

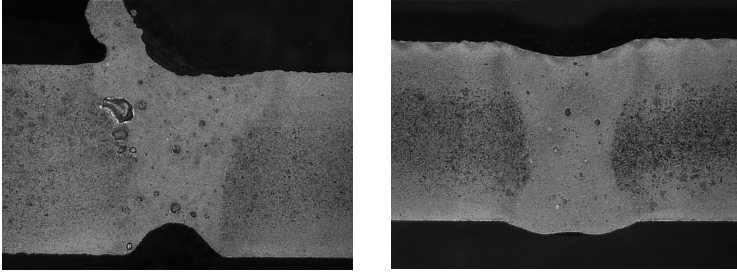


Abbildung 5.15: Einfluss der Fokusslage. Links: Fokusslage $F_z = +0,3$ mm. Rechts: Fokusslage $F_z = -2,0$ mm. AZ91HP, 3mm

5.1.3.2 Statische Festigkeitsparameter

Bei den Untersuchungen des Einflusses der Fokusslage auf die statische Festigkeit zeigt sich, dass bei niedrigen Laserleistungen eine Fokusslage nahe der Oberfläche gewählt werden sollte, um wie oben beschrieben die Einschweißtiefe zu erhöhen. Die Oberrauenqualität ist bei niedrigen Laserleistungen und Fokusslagen in der Nähe der Oberfläche besser als bei hohen Laserleistungen (vgl. Kap. 5.1.3.1), woraus eine geringere Kerbwirkung resultiert. Somit können auch bei niedrigen Laserleistungen höhere Kräfte übertragen werden.

Bei hohen Laserleistungen sollte eine Fokusslage deutlich unterhalb der Werkstückoberfläche gewählt werden, um oben beschriebenen Effekt zu vermeiden. Die geringe Oberrauenqualität, bei Fokusslagen in der Nähe der Werkstückoberfläche, führt aufgrund der hohen Kerbwirkung der Auswürfe zu einer verminderten Festigkeit. Die Streckgrenze und die Bruchdehnung verhalten sich analog zur Bruchfestigkeit.

Insgesamt kann die Aussage getroffen werden, dass der Einfluss der Fokusslage auf die Oberrauenqualität der bestimmende Effekt im Hinblick auf die statische Festigkeit ist.

5.1.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Laserleistung einen großen Einfluss sowohl auf die Nahtgeometrie als auch auf die Festigkeitswerte hat. Dabei führen hohe Laserleistungen auch zu höheren Festigkeits- und Dehnungswerten. Die optimale Einstellung der Laserleistung hängt von der Werkstückdicke ab und liegt für 3 mm dicke Proben zwischen 2,0 kW und 2,5 kW ($7,08 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ und $8,85 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$). Bei Proben mit einer Dicke von 5 mm sollte eine Laserleistung zwischen 2,5 kW und 3,0 kW ($8,85 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ und $1,06 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$) eingestellt werden.

Die Schweißgeschwindigkeit hat gegenüber der Laserleistung einen geringeren Einfluss auf das Schweißergebnis. Erst sehr hohe bzw. sehr niedrige Schweißgeschwindigkeiten führen zu einer signifikanten Reduzierung der Festigkeitswerte. Die optimale Einstellung der Schweißgeschwindigkeit hängt von eingestellter Laserleistung ab, wobei Streckenenergien ab 40 J/mm die günstigsten Festigkeitseigenschaften erwarten lassen.

Faktor	Einstellung
P	3 mm Werkstückdicke: 2,0 kW bis 2,5 kW ($7,08 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ bis $8,85 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$) 5 mm Werkstückdicke: 2,5 kW bis 3,0 kW ($8,85 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ bis $1,06 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$)
v	Angepasst an die eingestellte Laserleistung. Streckenenergie ca. 45 J/mm
F _z	Hohe Laserleistung: F _z ca. 1 mm unterhalb der Oberfläche Niedrige Laserleistung: F _z in der Nähe der Oberfläche

Tabelle 5.1: Einstellungen der grundlegenden Parameter Leistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokuslage

Die Fokusslage hat auf die Nahtgeometrieparameter einen nur geringen Einfluss. Hohe bzw. niedrige Laserleistungen erfordern jedoch ein Verschieben der Fokusslage, um hohe Festigkeitswerte zu erzielen. Insgesamt sind höhere Laserleistungen und eine Verschiebung der Fokusslage in das Bauteil zu empfehlen, damit eine ruhige Oberraupe mit geringer Kerbwirkung und hoher Festigkeit erzielt werden kann. In Tabelle 5.1 sind diese Erkenntnisse zusammengefasst dargestellt.

5.2 Fertigungstechnische Einflüsse

Im Rahmen dieses Abschnittes werden die Einflüsse des Einstrahlwinkels, der lateralen Fokusposition und eines Fügespaltes auf das Schweißergebnis beschrieben. Die im folgenden vorgestellten Ergebnisse wurden aufgrund des ähnlichen Verhaltens der Legierungen AZ91HP und AM50HP mit den Dicken 3 mm und 5 mm (s. Kapitel 5.1) nur für die Legierung AM50HP, 3mm (Kapitel 5.2.1.1) bzw. AZ91HP, 3mm (ab Kapitel 5.2.1.2) ermittelt. Die verwendeten Versuchspläne können Kapitel 4.1.2 entnommen werden. Die Darstellung der statischen Festigkeitsparameter erfolgt durchgehend für durchgeschweißte Proben.

5.2.1 Einfluss des Einstrahlwinkels

5.2.1.1 Winkel α

Durch die Veränderung des Einstrahlwinkels α wird das Einkoppelverhalten des Lasers in das Werkstück verändert. Bei dreidimensionalen Schweißnähten, beispielsweise beim Schweißen einer Welle, ist es in der Regel notwendig, die Bearbeitungsoptik immer nahezu senkrecht zur Bauteiloberfläche zu orientieren. Zur Vermeidung von Geschwindigkeitseinbrüchen bei großen Umrorientierungen ist es notwendig eine Vorwegnahme der Orientierung (Vorlauf) durchzuführen. Nach der Welle sollte auf einer gewissen Nachlaufstrecke die Orientierungsänderung erst allmählich wieder ausgeglichen werden (vgl. Abbildung 5.16) [Bauer 1997].

Die Veränderung des Einkoppelverhaltens kann insbesondere an der Veränderung der Nahtquerschnittsfläche abgelesen werden. In Abbildung 5.17 ist der Einfluss der Einstrahlwinkelveränderung auf die Nahtquerschnittsfläche dargestellt. Es zeigt sich, dass durch eine Veränderung des Einstrahlwinkels aus der Senkrechten mehr Energie im Werkstück absorbiert wird. Die Winkelabhängigkeit der Absorption entspricht den bei BEYER (1995) beschriebenen Effekten. In Schlepprichtung wirkt sich dieser Effekt dabei etwas geringer aus (vgl. Abbildung 5.17).

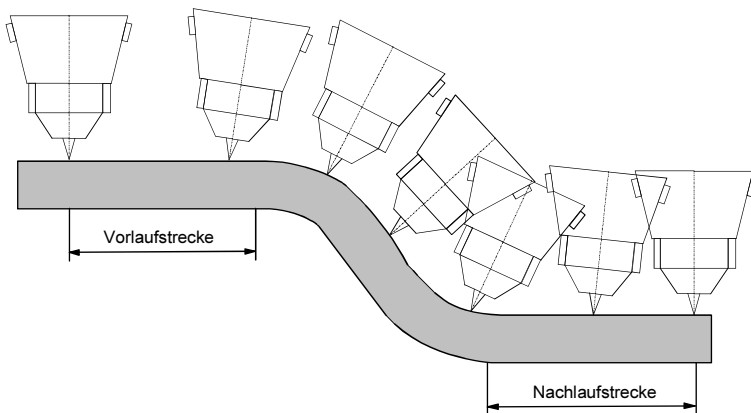


Abbildung 5.16: Vor- und Nachlauf bei einer starken Orientierungsänderung der Bearbeitungsoptik.

In Abbildung 5.18 ist der Einfluss einer Veränderung des Einstrahlwinkels α auf die statische Festigkeit durchgeschweißter Nähte exemplarisch für die Legierung AM50HP, 3 mm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Einstellung des Einstrahlwinkels α von etwa 10° in Schlepprichtung die höchsten Festigkeiten ermöglicht. In der Praxis sollte ein Einstrahlwinkel α von mindestens 2° bis 5° eingestellt werden, um Rückreflexionen in den Laser zu vermeiden. Einstrahlwinkel α ab ca. 20° sowohl in Schlepp- als auch in Stechrichtung führen zu einer Verminderung der statischen Festigkeit. Das Verhalten der Streckgrenze $R_{p0,2}$ sowie der Bruchdehnung ist analog.

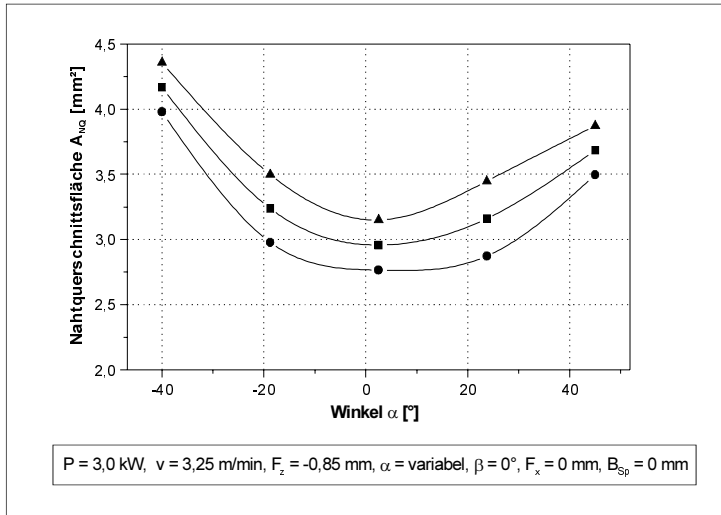


Abbildung 5.17: Einfluss des Einstrahlwinkels α auf die Nahtquerschnittsfläche A_{NQ} . AM50HP, 3mm

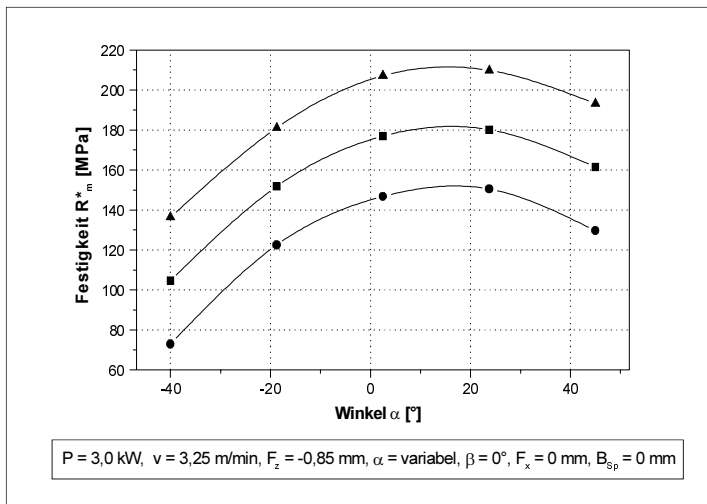


Abbildung 5.18: Einfluss des Einstrahlwinkels α auf die statische Festigkeit R_m^* . AM50HP, 3mm

Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass durch eine schleppende Einstellung des Einstrahlwinkels α bessere Oberrauten der Schweißnaht erzielt werden können. Bei schleppender Einstellung können fein gefiederte Oberrauten erzielt werden, während sich bei stechender Einstellung ein unregelmäßiges Oberrautenbild ergibt. Insgesamt ist daher eine Einstellung des Einstrahlwinkels α in Schlepprichtung zu empfehlen.

5.2.1.2 Winkel β

Eine Veränderung des seitlichen Einstrahlwinkels β ist beispielsweise notwendig, um eine eingeschränkte Zugänglichkeit zur Naht auszugleichen. Eine Vergrößerung des seitlichen Einstrahlwinkels β führt zu einer Verminderung der statischen Festigkeit. In Abbildung 5.19 die Wirkung des Winkels β exemplarisch anhand der Legierung AZ91HP dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ab Winkeln zwischen 5° und 10° ein signifikanter Abfall der Festigkeit erfolgt.

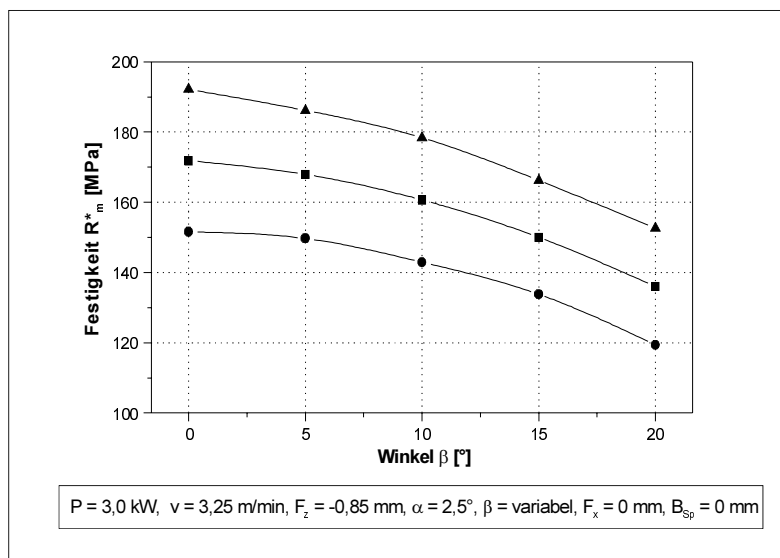


Abbildung 5.19: Einfluss des Einstrahlwinkels β auf die statische Festigkeit R_m^* , AZ91HP, 3 mm.

Betrachtet man den Einfluss des seitlichen Einstrahlwinkels auf die Nahtgeometrie, so ist tendenziell eine lineare Zunahme der Nahtbreite und der Nahtquerschnittsfläche (vgl. Abbildung 5.20) mit dem Winkel β zu erkennen (vgl. auch Veränderung Winkel α , Kap 5.2.1.1). Auf die Einschweißtiefe hingegen hat eine Veränderung des Winkels β nur einen geringen Einfluss.

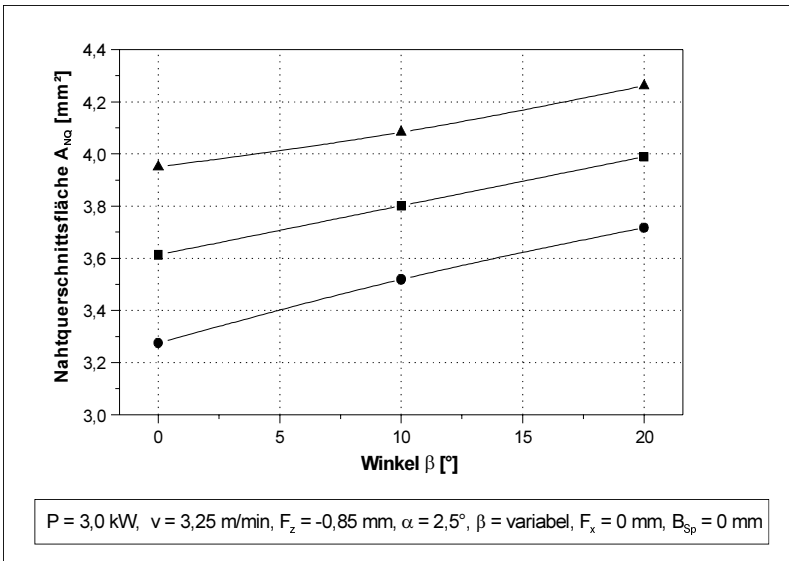


Abbildung 5.20: Einfluss des Einstrahlwinkels β auf die Nahtquerschnittsfläche A_{NQ} . AZ91HP, 3 mm.

5.2.2 Einfluss der lateralen Fokusposition

Eine seitliche Verschiebung des Fokus, beispielsweise aufgrund von Lage-toleranzen des Bauteils, führt zu einer linearen Abnahme der statischen Festigkeit. In Abbildung 5.21 ist exemplarisch der Einfluss der lateralen Fokusposition auf die statische Festigkeit dargestellt. Die Streckgrenze sowie die Bruchdehnung verhalten sich ebenfalls linear fallend mit einer zunehmenden seitlichen Fokuspositionierung. Auf die Nahtgeometrie-parameter hat eine laterale Verschiebung des Fokus keinen Einfluss.

Laterale Verschiebungen der Fokusalage F_x zwischen 0,2 mm und 0,3 mm führen zu einer starken Verminderung der Festigkeit, da die Kanten der beiden Fügepartner nicht mehr vollständig aufgeschmolzen werden können. Verschiebungen von mehr als 0,3 mm ergeben keine Verbindung mehr. Treten größere Toleranzen auf, muss eine Optik mit größerer Brennweite und somit größerem Fokusbereich eingesetzt werden.

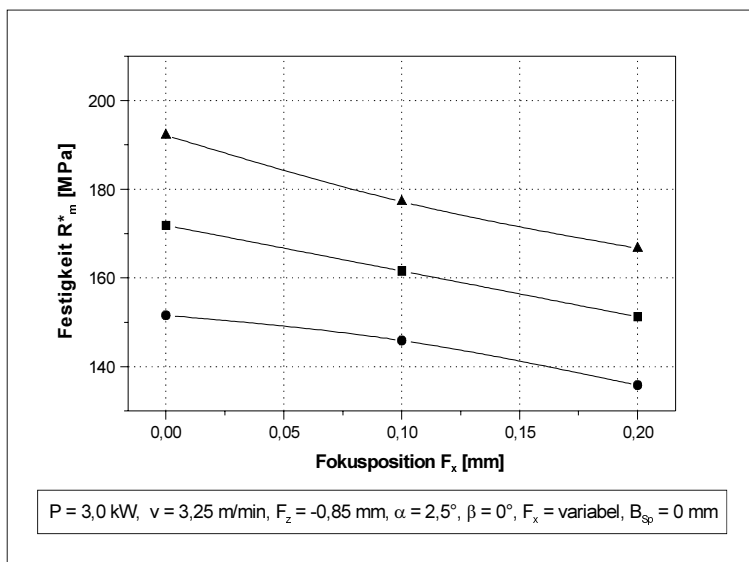


Abbildung 5.21: Einfluss der lateralen Fokusposition F_x auf die statische Festigkeit R^*_m . AZ91HP, 3mm

5.2.3 Einfluss eines Fügespalts

Fügespalte entstehen aufgrund von Toleranzen der Fügepartner. In den Abbildungen 5.22 und 5.23 ist der Einfluss der Spaltbreite auf die statische Festigkeit dargestellt. Zum Vergleich der Ergebnisse, die mit Hilfe der statistischen Versuchspläne geschweißt wurden, sind einige Bestätigungsversuche durchgeführt worden. In Abbildung 5.22 sind die Ergebnisse der Bestätigungsversuche mit drei Versuchsreihen dargestellt. Abbildung 5.23 kann der Einfluss der Spaltbreite B_{sp} auf die statische Festigkeit R^*_m , wie er sich aus den statistischen Versuchen ergibt, entnommen werden.

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Spaltbreite zunächst ein Anstieg der Zugfestigkeit erreicht wird. Dies liegt darin begründet, dass bei kleinen Fügespalten eine bessere Ausgasung der Schmelze möglich ist. Auf diese Weise wird ein homogeneres Nahtgefüge mit einer geringeren Anzahl an Poren erreicht. Erst ab größeren Spaltbreiten führt die durch den vergrößerten Nahtdurchhang erzeugte Kerbwirkung zu einer Verminderung der statischen Zugfestigkeit.

Es kann festgestellt werden, dass bei Schweißversuchen ohne Zusatzmaterial Fügespalte bis zu 0,1 mm zu keiner Festigkeitsabnahme führen. Ab etwa 0,2 mm Fügespalt ist ein deutlicher Festigkeitsverlust zu erwarten. Spaltbreiten über 0,3 mm führen bei einer Bearbeitungsoptik mit 100 mm Brennweite und einem resultierenden Fokusbereich von etwa 0,3 mm zu keiner Verbindung mehr.

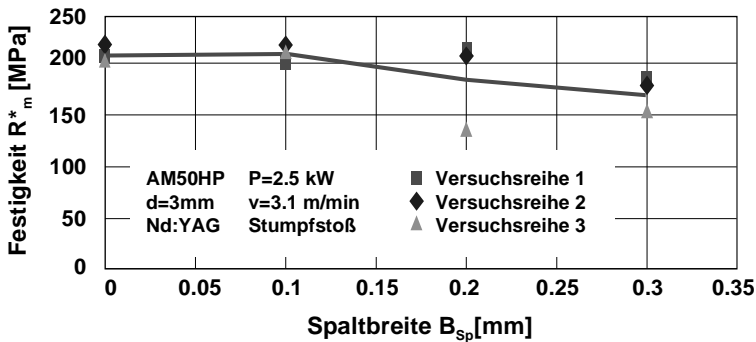


Abbildung 5.22: Bestätigungsversuch: Einfluss der Spaltbreite B_{sp} auf die statische Festigkeit R_m^* .

Weitere Versuche mit einer Bearbeitungsoptik mit einer Brennweite $f=200$ mm und einem resultierenden Fokusbereich von 0,6 mm haben gezeigt, dass aufgrund des größeren Fokusbereichs mehr Material der Fügpartner an der Stoßkante aufgeschmolzen wird. Somit konnten Spalte bis zu 0,4 mm ohne Zusatzmaterial verschweißt werden. Dieses Ergebnis entspricht der von BEYER U.A. (1988) angegebenen Grenze der Spaltbreite des 0,7-fachen des Fokusbereichs.

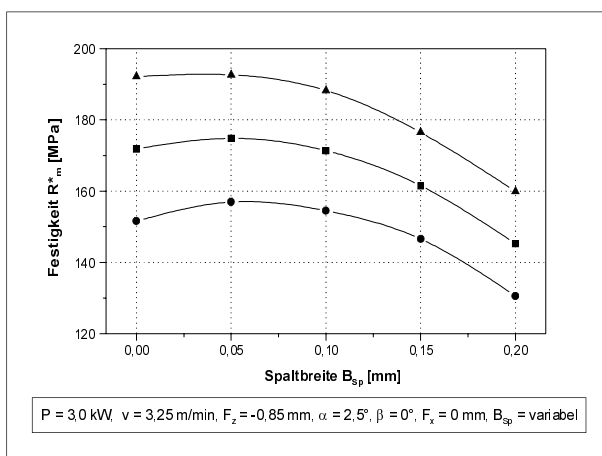


Abbildung 5.23: Einfluss der Spaltbreite B_{sp} auf die statische Zugfestigkeit R^*_m . AZ91HP, 3mm.

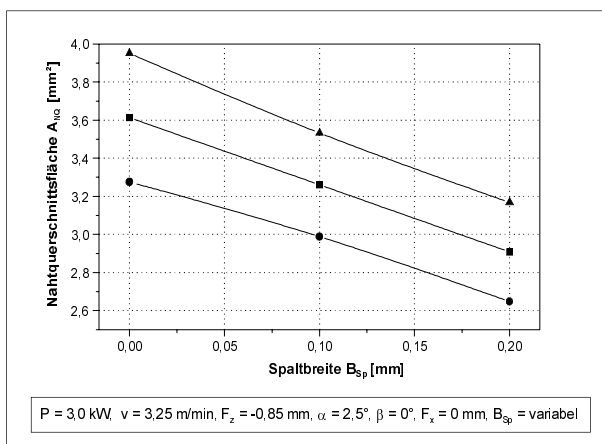


Abbildung 5.24: Einfluss der Spaltbreite B_{sp} auf die Nahtquerschnittsfläche A_{NQ} . AZ91HP, 3mm.

Versuche an 5 mm dickem Material haben gezeigt, dass etwas größere Spaltbreiten als beim 3 mm Material verschweißt werden konnten. Die verschweißbaren Spaltbreiten liegen dann zwischen 0,3 und 0,4 mm.

Betrachtet man den Einfluss der Spaltbreite auf die Nahtgeometrieparameter, so ist insbesondere eine Abnahme der Nahtquerschnittsfläche zu verzeichnen, da aufgrund des Spaltes weniger Material für die Schweißnaht zur Verfügung steht (vgl. Abbildung 5.24).

5.3 Wechselwirkungen der Einflussparameter

Nach der Betrachtung der Hauptwirkung der Einflussparameter auf das Schweißergebnis ist insbesondere die Kenntnis der Wechselwirkungen der verschiedenen Einflussparameter von Bedeutung. Wechselwirkungen können dazu führen, dass der Einfluss eines Parameters bzw. das Verhalten des Schweißergebnisses aufgrund der Einstellung eines Parameters durch die Einstellung eines anderen Parameters verändert wird. Im Rahmen dieses Punktes werden deshalb die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Parametern aufgezeigt, wodurch eine vollständige Betrachtung des Prozessverhaltens des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesiumdruckguss ermöglicht wird. Hierfür werden insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den grundlegenden Parametern Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokuslage sowie die Wechselwirkungen der grundlegenden Parameter mit den produktionstypischen Parametern beschrieben. Somit kann festgestellt werden, ob durch eine veränderte Einstellung der grundlegenden Parameter auf produktionstypische Einflüsse reagiert werden kann.

Die im folgenden vorgestellten Ergebnisse wurden aufgrund des ähnlichen Verhaltens der Legierungen AZ91HP und AM50HP mit den Dicken 3 mm und 5 mm (s. Kapitel 5.1) nur für die Legierung AM50HP, 3 mm bzw. AZ91HP, 3 mm ermittelt. Die Darstellung der statischen Festigkeitsparameter erfolgt durchgehend für durchgeschweißte Proben.

5.3.1 Wechselwirkung zwischen Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokuslage

Betrachtet man das Verhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses unter dem Einfluss von Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokuslage, so zeigt sich erwartungsgemäß eine deutliche Wechselwirkung zwischen Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit. Bei niedrigen Laserleistungen führt eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit zu einer Abnahme der Festigkeitswerte und der Bruchdehnung. Bei hohen Laserleistungen führt eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit demgegenüber zu einer Erhöhung der Festigkeitswerte und der Bruchdehnung.

Bei einer zusätzlichen Veränderung der Fokuslage kann der in Kapitel 5.1.3 beschriebene Effekt einer Zunahme der Festigkeit bei niedriger Laserleistung und gleichzeitiger Einstellung der Fokuslage nahe der Oberfläche beobachtet werden (vgl. Abbildung 5.25). Insgesamt zeigt sich, dass eine Fokuslageneinstellung von etwa -0,7 mm bis -1,2 mm zu einem geringeren Einfluss der Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit auf die Festigkeitswerte und die Bruchdehnung führt.

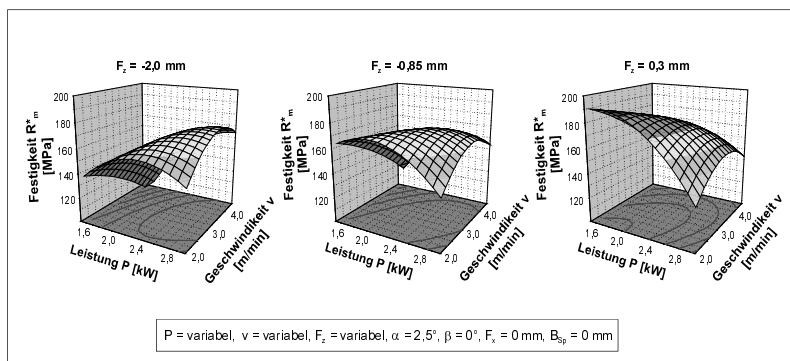


Abbildung 5.25: Einfluss der Laserleistung P und der Schweißgeschwindigkeit v auf die Festigkeit R_m bei drei verschiedenen Fokuslagen F_z , AM50HP, 3mm.

Eine optimale Einstellung der Fokusslage führt somit zu einer Vergrößerung des Prozessgebietes, in dem Schwankungen der Laserleistung oder der Schweißgeschwindigkeit toleriert werden können. In Abbildung 5.25 ist dieses Verhalten für den Einfluss der Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit bei drei verschiedenen Fokusslagen auf die statische Festigkeit R^*_m exemplarisch dargestellt, wie es sich aus den in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Versuchsplänen ergibt. Das Verhalten bei der Legierung AZ91HP sowie bei den Dicken 3 mm und 5 mm ist ähnlich (vgl. auch Kapitel 5.1.1).

5.3.2 Wechselwirkung zwischen Einstrahlwinkel und Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokusslage

Bei den Untersuchungen zum Einfluss des Einstrahlwinkels (Versuchspläne s. Abschnitt 4.1.2) zeigt sich, dass kleine Einstrahlwinkel α und β ($\alpha, \beta \approx 0^\circ$) zu den höchsten Festigkeiten und Einschweißstiefen führen (vgl. Kapitel 5.2.1). Verändern sich die Einstrahlwinkel, beispielsweise aufgrund eingeschränkter Zugänglichkeit zur Fügestelle, so muss eine Anpassung der grundlegenden Prozessparameter (Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokusslage) erfolgen.

In Abbildung 5.26 ist der Einfluss des Einstrahlwinkels α auf die Festigkeit beispielhaft für die Legierung AM50HP dargestellt, wie er sich aus den in Kapitel 4.1.2 dargestellten Versuchsplänen ergibt. Dabei ist zu erkennen, dass für schleppende Einstrahlwinkel ($\alpha > 0^\circ$) hohe Leistungen zu einer Erhöhung der Festigkeit führen, während bei stechenden Einstrahlwinkeln ($\alpha < 0^\circ$) niedrige Laserleistungen zu höheren Festigkeiten führen. Die optimale Einstellung der Schweißgeschwindigkeit und der Fokusslage entspricht dann dem in Kapitel 5.3.1 dargestellten Verhalten. Das bedeutet, dass bei niedrigen Laserleistungen, und somit Winkeln $\alpha < 0^\circ$, eine Fokusslage nahe der Oberfläche des Werkstückes gewählt werden sollte. Die Schweißgeschwindigkeit muss anschließend entsprechend optimiert werden.

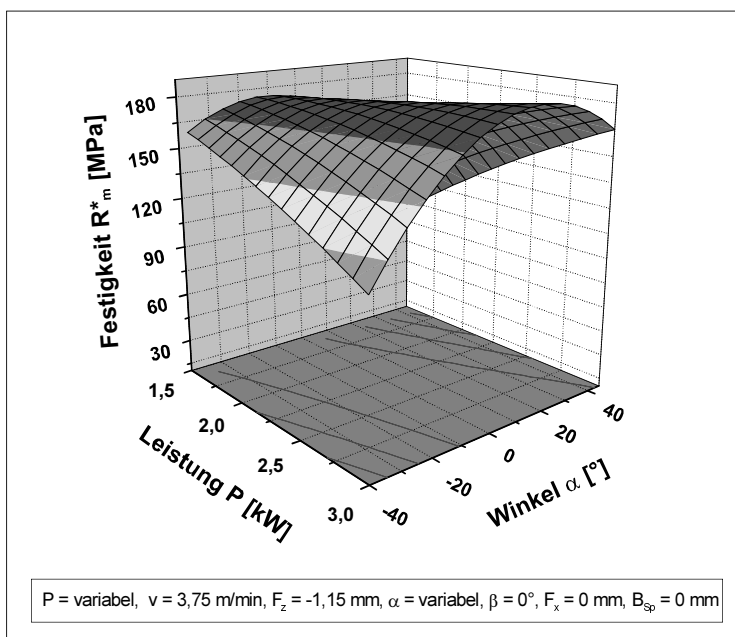


Abbildung 5.26: Einfluss des Einstrahlwinkels α auf die Festigkeit R_m^* , AM50HP, 3mm

Abbildung 5.26 kann ferner entnommen werden, dass bei kleinen Einstrahlwinkeln α die Laserleistung einen nur geringen Einfluss auf die statische Festigkeit hat. Tendenziell werden jedoch höhere Festigkeiten bei höheren Laserleistungen erreicht.

In Abbildung 5.27 ist der Einfluss des seitlichen Einstrahlwinkels β auf die statische Festigkeit dargestellt (Versuchsplan s. Kap. 4.1.2). Dabei ist festzustellen, dass der grundsätzliche Einfluss der Laserleistung durch eine Veränderung des Einstrahlwinkels β nicht verändert wird. Größere Einstrahlwinkel β reduzieren jedoch die Festigkeit.

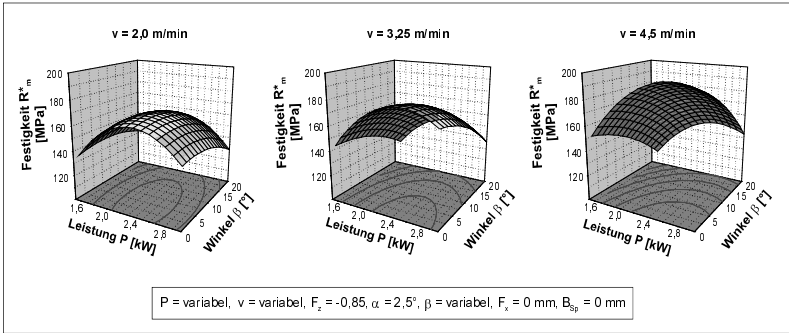


Abbildung 5.27: Einfluss des Einstrahlwinkels β und der Laserleistung P auf die Festigkeit R_m^* bei verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten v . AZ91HP, 3mm

Zum Einfluss der Fokusslage kann festgestellt werden, dass eine Fokusslage nahe der Oberfläche zu einer Zunahme der Festigkeit bei großen Winkeln β führt. Die Festigkeit bei Fokusslagen nahe der Oberfläche ist jedoch insgesamt deutlich niedriger als bei Fokusslagen im Werkstück. In Abbildung 5.28 ist dieses Verhalten beispielhaft für die Legierung AZ91HP dargestellt. Für die Streckgrenze $R_{p0,2}^*$ und die Bruchdehnung A^* ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten (Versuchsplan vgl. Kap. 4.1.2).

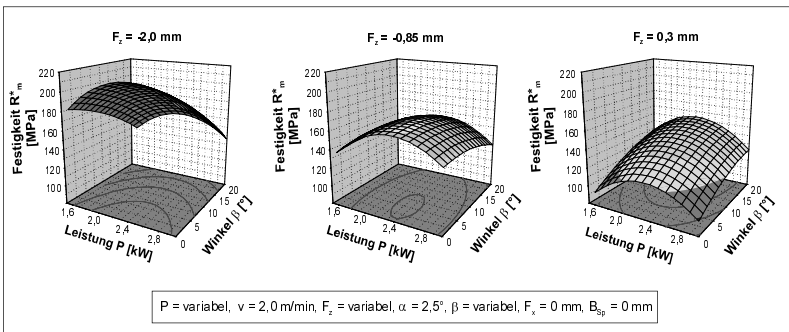


Abbildung 5.28: Einfluss des Einstrahlwinkels β und der Laserleistung P auf die Festigkeit R_m^* bei verschiedenen Fokusslagen F_z . AZ91HP, 3mm

Die Einstellung der optimalen Schweißgeschwindigkeit erfolgt wiederum nach der Einstellung der optimalen Laserleistung und Fokusslage. In Abbildung 5.27 ist der Einfluss der Geschwindigkeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei kleinen Einstrahlwinkeln β eine hohe Schweißgeschwindigkeit v zu höheren Festigkeiten R_m^* führt. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten wirkt sich eine Veränderung des Einstrahlwinkels β hingegen nicht so deutlich aus. Bei zunehmenden Einstrahlwinkeln β ist es daher zu empfehlen, die Schweißgeschwindigkeit zu reduzieren und eine Laserleistung zwischen 2,0 kW und 2,5 kW einzustellen (vgl. auch Abbildung 5.28).

5.3.3 Wechselwirkung zwischen lateraler Fokusposition und Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokusslage

Eine seitliche Verschiebung des Fokus führt zu einer linearen Abnahme der Festigkeit mit der Zunahme der seitlichen Verschiebung (vgl. Kap. 5.2.2). Die Untersuchung des Prozessverhaltens bei einer seitlichen Verschiebung des Fokus (Versuchsplan vgl. Kapitel 4.1.2) führt zu der Erkenntnis, dass mit zunehmender seitlicher Verschiebung des Fokus die Fokusslage weiter von der Oberfläche in das Bauteil gelegt und eine höhere Leistung eingestellt werden sollte, um höhere Festigkeiten zu erzielen (vgl. Kapitel 5.1.3).

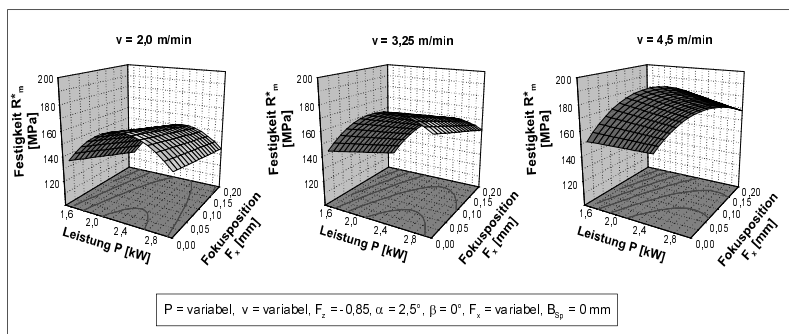


Abbildung 5.29: Einfluss von Laserleistung P und Fokusposition F_x auf die statische Festigkeit R_m^* bei verschiedenen Geschwindigkeiten. AZ91HP, 3 mm

Zur Einstellung der Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit bei einer seitlichen Verschiebung empfiehlt es sich, eine mittlere Leistung und somit auch eine mittlere Schweißgeschwindigkeit einzustellen, wenn neben hohen Festigkeiten auch hohe Dehnungswerte erzielt werden sollen (s. Abbildung 5.29 und 5.30).

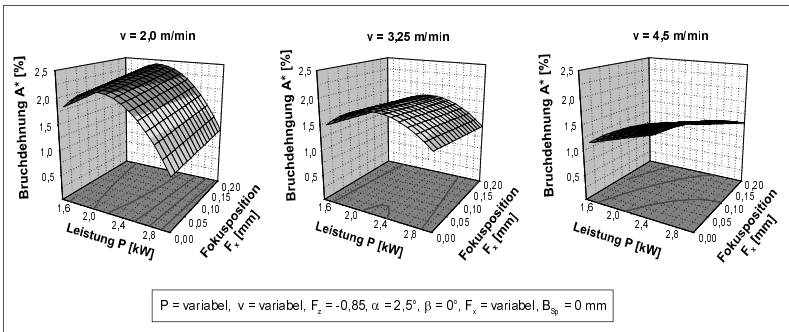


Abbildung 5.30: Einfluss der Laserleistung P und der lateralen Fokusposition F_x auf die Bruchdehnung A^* bei verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten v . AZ91HP, 3mm

5.3.4 Wechselwirkung zwischen Spaltbreite und Laserleistung, Geschwindigkeit und Fokuslage

Bei der Betrachtung des Einflusses eines Fügspaltes auf die statische Festigkeit R_m^* zeigt sich (Versuchsplan vgl. Kapitel 4.1.2), dass eine Verringerung der Schweißgeschwindigkeit bei größeren Spaltbreiten zu höheren Festigkeiten führt (s. Abbildung 5.31). Hohe Schweißgeschwindigkeiten ermöglichen bei kleinen Spaltbreiten hingegen die höchsten Festigkeiten. In der Regel sollte deshalb mit hohen Schweißgeschwindigkeiten geschweißt werden und zum Ausgleich von größeren Spalten die Geschwindigkeit reduziert werden.

Eine weitere Möglichkeit zum Ausgleich von größeren Spalten bei hohen Schweißgeschwindigkeiten ergibt sich durch eine Verschiebung der Fokuslage in die Nähe der Oberfläche. Der starke Abfall der Festigkeit bei größeren Spaltbreiten wird dadurch reduziert (vgl. Abbildung 5.32).

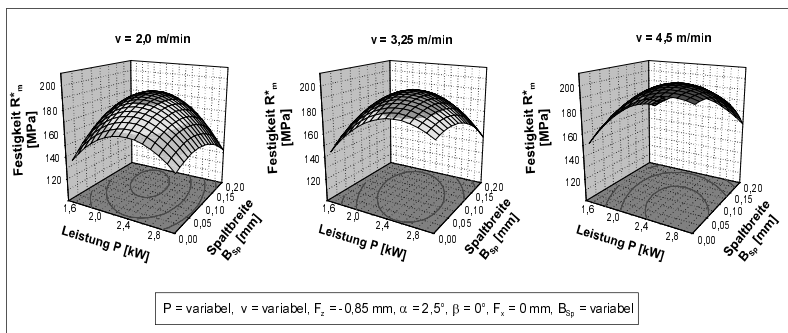


Abbildung 5.31: Einfluss der Laserleistung P und Spaltbreite B_{sp} auf die Festigkeit R_m^* bei verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten v . AZ91HP, 3mm

Querschliffe von Schweißnähten, die mit verschiedenen Laserleistungen und Schweißgeschwindigkeiten geschweißt wurden, bei einem Fügeseit von 0,2 mm sind in Abbildung 5.33 dargestellt.

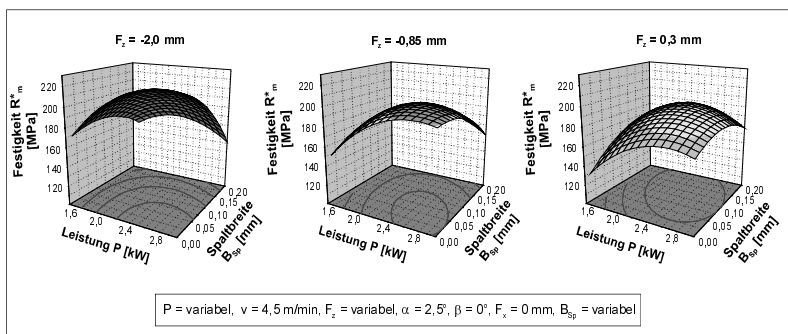


Abbildung 5.32: Einfluss der Laserleistung P und der Spaltbreite B_{sp} auf die Festigkeit R_m^* bei verschiedenen Fokuslagen F_z . AZ91HP, 3 mm

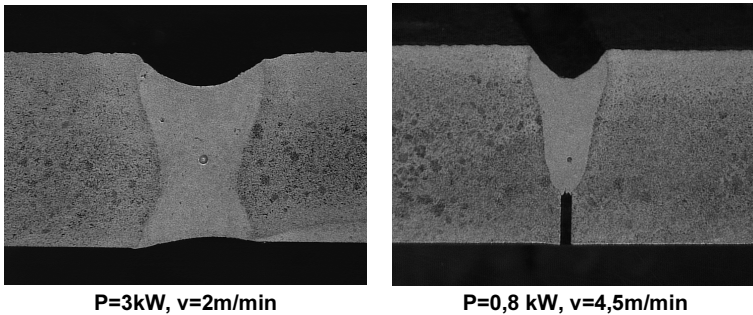


Abbildung 5.33: Einfluss von Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit bei einem Spalt von 0,2 mm. AZ91HP, 3 mm

5.3.5 Wechselwirkung zwischen lateraler Fokusposition, Einstrahlwinkel und Spaltbreite

Hongping & Duley (1998) haben nachgewiesen, dass beim Laserstrahlschweißen mit einem seitlich geneigten Laserstrahl die Spaltüberbrückbarkeit erhöht wird. Im Rahmen dieses Abschnittes werden die Ergebnisse der Untersuchungen, ob ein seitlich geneigter Laserstrahl auch bei Magnesiumdruckgusslegierungen eine signifikante Erhöhung der Spaltüberbrückbarkeit ermöglicht, vorgestellt (Versuchsplan vgl. Kapitel 4.1.2).

In Abbildung 5.34 ist die Wechselwirkung zwischen der Spaltbreite und dem Einstrahlwinkel β auf die Festigkeit R_m^* bei verschiedenen lateralen Fokuspositionen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit einer Vergrößerung des Einstrahlwinkels β die Festigkeit R_m^* deutlich abnimmt (vgl. auch Kapitel 5.2.1.2). Selbst eine Veränderung der lateralen Fokusposition in Richtung des Einstrahlwinkels β (vgl. Abbildung 5.35) zur Verbesserung der Spaltüberbrückung bewirkt keine Erhöhung der Zugfestigkeit bei großen Spaltbreiten.

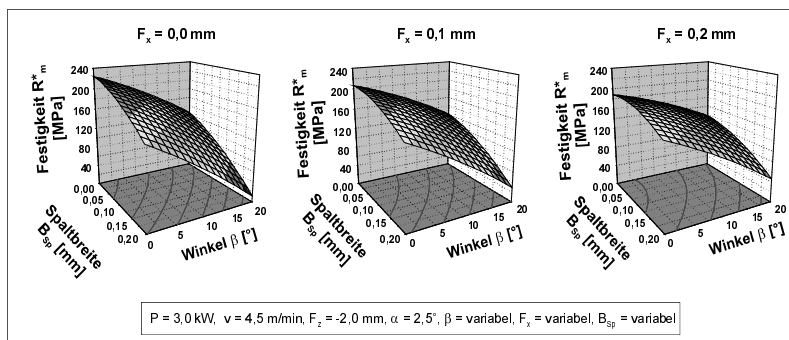


Abbildung 5.34: Einfluss der Spaltbreite B_{sp} und des seitlichen Einstrahlwinkels β auf die Festigkeit R_m^* bei verschiedenen Fokusposition F_x , AZ91HP, 3mm.

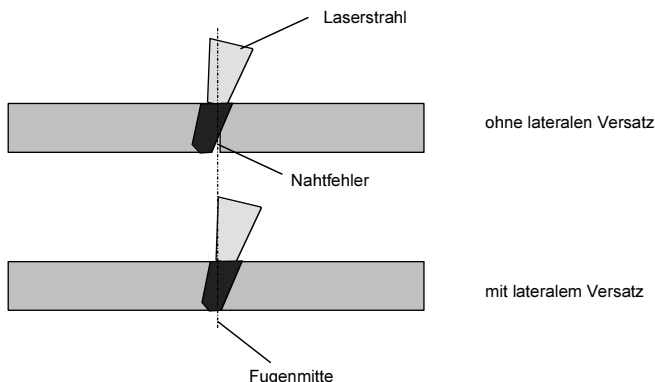


Abbildung 5.35: Veränderung der lateralen Fokusposition bei einem seitlichen Einstrahlwinkel zur Vermeidung von Nahtfehlern

In Abbildung 5.36 sind Querschliffe von Schweißnähten mit einem Einstrahlwinkel $\beta=20^\circ$ und einer Spaltbreite $B_{sp} = 0,2 \text{ mm}$ bei unterschiedlichen Einstellungen von Schweißgeschwindigkeit und Laserleistung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es im Wurzelbereich bei niedriger Leistungseinstellung zu Bindefehlern kommen kann. Eine hohe Laserleistung bewirkt eine vollständige Durchschweißung. Es kommt jedoch zu einem

Wurzelrückzug und zu einem scharfkantigen Nahtefall auf der Nahtoberseite.

Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass Fügespalte nicht durch eine Veränderung des Einstrahlwinkels in Kombination mit einer Veränderung der lateralen Fokusposition ausgeglichen werden können. Können Fügespalte nicht vermieden werden, sollten daher die in Kapitel 5.3.4 dargestellten Maßnahmen ergriffen werden. Zur Überbrückung größerer Fügespalte sollte außerdem der Einsatz von Zusatzmaterial geprüft werden.

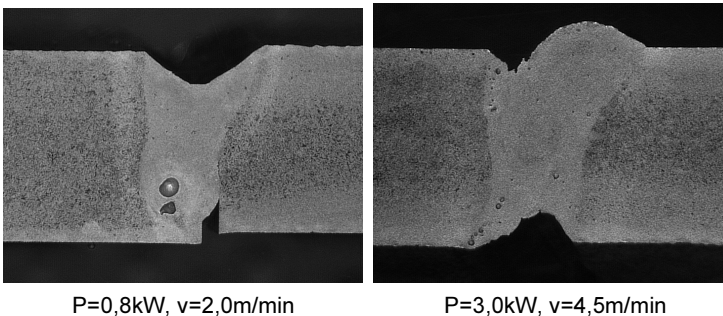


Abbildung 5.36: Querschliffe von Schweißnähten mit einem seitlichen Einstrahlwinkel $\beta=20^\circ$ und einer Spaltbreite $B_{sp}=0,2$ mm bei verschiedenen Einstellungen der Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit. AZ91HP, 3 mm

5.3.6 Erkenntnisse

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass hohe Laserleistungen (bzw. Intensitäten) zu höheren Festigkeits- und Dehnungswerten sowie zu höheren Einschweißstiefen führen, wobei bei optimaler Einstellung der Schweißgeschwindigkeit eine nur geringe Zunahme der Nahtbreite erwartet werden muss. Die höchsten Festigkeiten können je nach Werkstückdicke bei Laserleistungen zwischen 2,0 kW und 3,0 kW ($7,08 \cdot 10^5$ W/cm² und $1,06 \cdot 10^6$ W/cm²) und entsprechend angepassten Schweißgeschwindigkeiten (Streckenenergie ca. 45 J/mm) erreicht werden. Die Fokusslage sollte bei niedrigen Laserleistungen nahe der Werkstückoberfläche liegen und bei zunehmender Laserleistung weiter in das Werkstück verschoben werden.

Der Einstrahlwinkel sollte sowohl in als auch orthogonal zur Schweißrichtung möglichst gering gewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass zur Vermeidung von Rückreflexionen in das Strahlführungssystem und somit auch in den Laser ein geringer Einstrahlwinkel eingestellt werden sollte. Eine Vergrößerung des Einstrahlwinkels führt zu einer Verringerung der Festigkeits- und Dehnungswerte.

Einstrahlwinkel in Schweißrichtung (Winkel α) führen bis zu einem Winkel von $\alpha = \pm 15^\circ$ zu keiner signifikanten Abnahme der Festigkeit. Bei einer Analyse des Nahtbildes bzw. der Oberrautenstruktur zeigt sich, dass schleppende Einstrahlwinkel ($\alpha > 0^\circ$) eine günstigere Nahtoberfläche ermöglichen. Durch eine Vergrößerung des Einstrahlwinkels wird die Absorption der Laserstrahlung im Werkstoff verbessert, was durch eine Zunahme der Nahtbreite nachgewiesen wurde.

Der seitliche Einstrahlwinkel β sollte ebenfalls möglichst gering gewählt werden. Winkel β bis zu 10° führen dabei zu keiner signifikanten Abnahme der Festigkeitswerte. Bei großen Einstrahlwinkeln β sollte die Fokusslage auch bei hohen Laserleistungen in die Nähe der Werkstückoberfläche eingestellt werden.

Kommt es zu Fehlpositionierungen des Laserfokus aufgrund von Toleranzen, wie Lagetoleranzen des Bauteils, verschiebt sich die laterale Fokusposition des Laserstrahls. Die seitliche Verschiebung des Fokus führt zu einer Abnahme der Festigkeits- und Dehnungswerte. Bei einem Fokusdurchmesser von 0,3 mm können dabei Verschiebungen bis zu etwa 0,2 mm toleriert werden. Größere Verschiebungen führen zu Bindefehlern am Stoß und zu einem deutlichen Abfall der Festigkeit. Bei seitlichen Verschiebungen von mehr als 0,3 mm werden die Stoßkanten nicht mehr vollständig aufgeschmolzen. Zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit sollte deshalb eine Sensorik zur Detektierung der Fügekanten eingesetzt werden.

Fügespalte haben einen deutlichen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung. Kleine Fügespalte können zu einem Anstieg der Festigkeit führen, da aufgrund des Spaltes eine bessere Ausgasung des Schmelzbades möglich ist. Fügespalte von mehr als 0,2 mm führen zu einer deutlichen Abnahme der Festigkeit. Als Toleranzgrenze können bei einem Fokusdurchmesser von 0,3 mm und einer Werkstückdicke von 3 mm Fügespalte von 0,2 mm angegeben werden. Bei einem Fokusdurchmesser von 0,6 mm können

Fügespalte von 0,3 mm bis 0,4 mm toleriert werden, was durch zusätzliche Versuche bestätigt wurde. Größere Materialdicken erlauben geringfügig größere Spaltbreiten, da hier mehr Material an den Stoßkanten zum Auffüllen des Fügespaltes zur Verfügung steht. Können diese Toleranzen nicht eingehalten werden oder werden die geschweißten Bauteile dynamisch belastet, muss aufgrund der mit dem Nahteinfall verbundenen Kerbwirkung trotz der hohen Kosten Zusatzmaterial eingesetzt werden.

In Tabelle 5.2 sind diese Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt.

Faktor	Einstellung
P	3 mm Werkstückdicke: 2,0 kW bis 2,5 kW ($7,08 \cdot 10^5$ W/cm ² bis $8,85 \cdot 10^5$ W/cm ²) 5 mm Werkstückdicke: 2,5 kW bis 3,0 kW ($8,85 \cdot 10^5$ W/cm ² bis $1,06 \cdot 10^6$ W/cm ²)
v	Angepasst an die eingestellte Laserleistung. Streckenenergie ca. 45 J/mm
F _z	Hohe Laserleistung: F _z ca. 1 mm unterhalb der Oberfläche Niedrige Laserleistung: F _z in der Nähe der Oberfläche
α	± 15°; nach Möglichkeit ≈ 0°
β	± 10°; nach Möglichkeit ≈ 0°
F _x	Optimal 0 mm - 0,2 mm; max. 0,3 mm
B _{sp}	Optimal 0 mm - 0,2 mm; max. 0,3 mm

Tabelle 5.2: Einstellbereiche der untersuchten Einflussparameter

5.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich Festigkeitswerte produktionssicher erreichen lassen, die zwischen 80% und 90% der Festigkeit des Grundmaterials liegen. Grundsätzlich zeigen die Untersuchungen, dass Durchschweißungen sowohl optisch als auch festigkeitsbezogen hochwertige Schweißnähte ergeben.

Die Qualität des Grundmaterials hat auf die Schweißnahtqualität einen entscheidenden Einfluss. Dies wird auch durch Untersuchungen beispielsweise bei NIEMEYER (1999) bestätigt. Insbesondere ist darauf zu achten, dass in der Prozesskette der Bauteilherstellung und insbesondere beim Gießprozess eine möglichst wasserstofffreie Atmosphäre eingestellt werden sollte (vgl. Kapitel 3.3.3).

Im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen weisen insbesondere die große Versuchsstreuung bei den Festigkeitsuntersuchungen von 10 MPa bis zu 40 MPa und die großen daraus resultierenden Vertrauensbereiche auf diesen Faktor hin. Ein Vergleich der Streubereiche der Festigkeitswerte der geschweißten Proben mit den Streubereichen ungeschweißter Proben zeigt eine weitgehende Übereinstimmung. Es ist deshalb davon auszugehen, dass „schlechte“ Werkstücke durch den Laserstrahlschweißprozess nicht verbessert werden können. Die dargestellten Effekte sind jedoch über eine große Versuchsanzahl und eine Reihe von Bestätigungsversuchen statistisch abgesichert und können auf das qualitative Prozessverhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses mit besserem Grundmaterial übertragen werden.

Für den Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens in der Produktion ist es somit von entscheidender Bedeutung die Qualität des Grundmaterials zu verbessern.

6 Beurteilung des Prozessverhaltens

Zur Beurteilung des Prozessverhaltens und der Prozessrobustheit wird im folgenden eine Definition für die Größe eines Prozessfensters vorgeschlagen und anhand dieser Definition die Größe des Prozessfensters für das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Magnesium ermittelt. Anhand der Prozessfensterbreite wird abschließend die Eignung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens für einen Produktionseinsatz beurteilt.

6.1 Definition des Begriffes „Prozessfenster“

Da in der Literatur keine einheitliche Definition des Begriffes „Prozessfenster“ zu finden ist, soll der Begriff „Prozessfenster“ folgendermaßen definiert werden:

Das Prozessfenster ist der Bereich, in dem die Einflussparameter verändert werden können, ohne dass der Sollbereich einer Zielgröße verlassen wird.

Das bedeutet, dass ausgehend von einer bestimmten Prozesseinstellung, bei der die Zielgröße innerhalb des Toleranzbereichs eines vom Konstrukteur vorgegebenen Sollwertes liegt, einer oder mehrere Einflussparameter absichtlich oder unabsichtlich so lange verändert werden können, bis die Zielgröße einen Wert annimmt, der außerhalb des Toleranzbereichs der Sollvorgabe liegt. In Abbildung 6.1 ist dieser Zusammenhang vereinfacht für einen Einflussparameter dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass es bei einem vom Konstrukteur vorgegebenen Toleranzbereich mehrere Prozessfenster geben kann, die die Vorgaben des Konstrukteurs erfüllen. Gibt der Konstrukteur nur einen Minimalwert an, so kann sich ein sehr großes Prozessfenster ergeben.

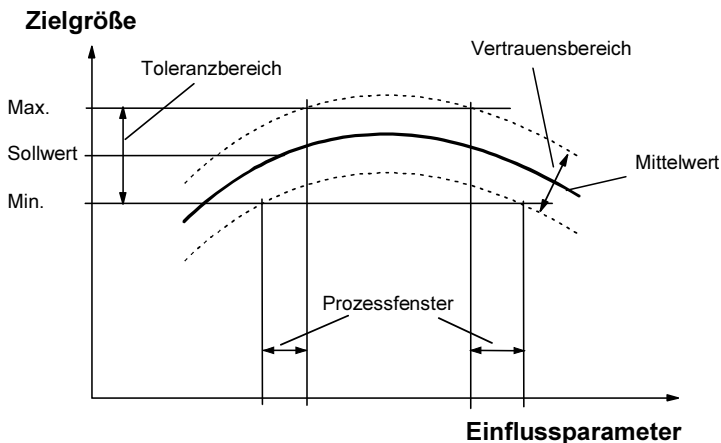


Abbildung 6.1: Definition des Begriffes „Prozessfenster“

Werden Prozesse betrachtet, bei denen Wechselwirkungen der Einflussparameter berücksichtigt werden müssen, so kann sich das Prozessfenster für einen Einflussparameter bei Veränderung eines oder mehrerer anderer Einflussparameter verändern. Dieser Zusammenhang soll im folgenden für zwei Einflussparameter veranschaulicht werden. In Abbildung 6.2 ist ein Beispiel für eine Prozessoberfläche für zwei Einflussparameter dargestellt.

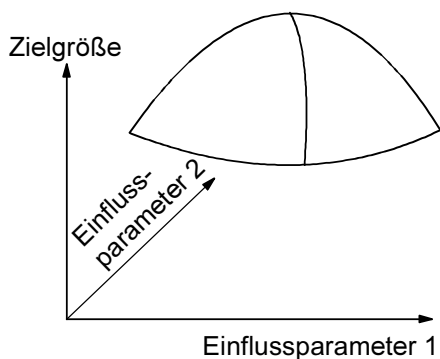


Abbildung 6.2: Beispiel einer Prozessoberfläche bei zwei Einflussparametern

Wird vom Konstrukteur in diesem Fall ein minimaler Wert der Zielgröße gefordert, so kann eine Ebene auf Höhe des Minimums der Zielgröße durch die Prozessoberfläche gelegt werden. Der Schnitt der Ebene mit der Prozessoberfläche ergibt den Bereich in dem beide Einflussparameter verändert werden dürfen, ohne dass der Sollwert (in diesem Fall ein Minimum) unterschritten wird. Dieser Zusammenhang ist für einen allgemeinen Fall in Abbildung 6.3 dargestellt.

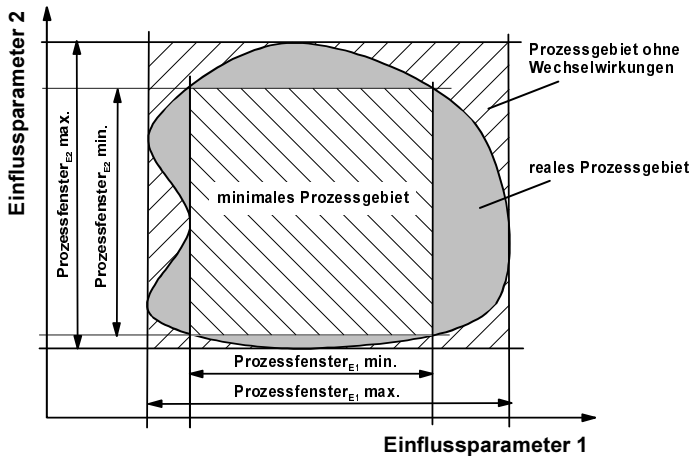


Abbildung 6.3: Ebener Schnitt durch eine Prozessoberfläche. Veränderung des Prozessfensters aufgrund von Wechselwirkungen

Für eine Beurteilung der Prozessrobustheit, unter der Berücksichtigung von Wechselwirkungen, ist die Angabe der Prozessfensterbreite für einzelne Einflussparameter ohne Berücksichtigung des Einflusses der anderen Einflussparameter somit nicht ausreichend. Erst die Angabe der minimalen Prozessfensterbreiten und somit eine Einschränkung des real verfügbaren Prozessgebietes auf ein minimales Prozessgebiet ermöglicht eine Beurteilung der Robustheit.

Da der Ermittlung der minimalen Prozessfensterbreiten bzw. des minimalen Prozessgebietes bei mehreren Einflussparametern aufgrund des aufgespannten n -dimensionalen Raumes schwierig und sehr aufwendig ist, wird im folgenden eine Normierung der Prozessfensterbreite B_{Prozess} vorgeschlagen. Hierzu wird die Prozessfensterbreite B_{Prozess} für den jeweiligen Einfluss-

parameter auf die technisch realisierbare Einstellgenauigkeit dieses Parameters, unter Berücksichtigung möglicher Abweichungen, bezogen. Für die Ermittlung der muss zunächst das Prozessverhalten, beispielsweise mittels eines statistischen Versuchsplans, ermittelt werden. Die Prozessfensterbreiten für einen Einflussparameter sollte dann bei einer Einstellung der weiteren Einflussparameter so erfolgen, dass sich ein möglichst großes Prozessfenster B_{Prozess} ergibt.

Die normierte Prozessfensterbreite $B_{\text{Prozess, norm.}}$ kann nach folgender Gleichung (6.1) definiert werden:

$$B_{\text{Prozess, norm.}} = \frac{\text{Prozessfensterbreite}}{\text{Einstellgenauigkeit}} \quad (6.1)$$

Daraus ergeben sich folgende Fälle:

$B_{\text{Prozess, norm.}} \gg 1$ Das Prozessfenster ist wesentlich größer als die Einstellgenauigkeit. Eine Veränderung des Prozessergebnisses aufgrund ungewollter Schwankungen des Einflussparameters ist unwahrscheinlich.

Sind die normierten Prozessfensterbreiten aller Einflussparameter wesentlich größer als die Einstellgenauigkeit, so kann davon ausgegangen werden, dass der Prozess stets innerhalb des minimalen Prozessgebietes gehalten werden kann. Somit kann von einem robusten Prozess ausgegangen werden.

$B_{\text{Prozess, norm.}} \approx 1$ Das Prozessfenster entspricht in etwa der Einstellgenauigkeit. Eine Veränderung des Prozessergebnisses aufgrund ungewollter Schwankungen des Einflussparameters ist wahrscheinlich.

Liegt das Prozessfenster einer der Einflussparameter in diesem Bereich, so muss dieser Parameter und seine Wechselwirkungen mit den anderen Parametern nochmals genauer untersucht werden. Dabei ist zu prüfen, ob der Prozess innerhalb des real verfügbaren Prozessgebietes trotz der Schwankungen des Einflussparameters gehalten werden kann.

$B_{\text{Prozess, norm.}} \ll 1$ Das Prozessfenster ist wesentlich kleiner als die Einstellgenauigkeit. Von einer Veränderung des Prozessergebnisses aufgrund ungewollter Schwankungen dieses Einflussparameters ist auszugehen.

Liegen einer oder mehrere Einflussparameter in diesem Bereich und kann die Einstellgenauigkeit nicht verbessert werden, so eignet sich dieser Prozess nicht für eine industrielle Fertigung.

Prozesse, bei denen die normierte Prozessfensterbreite für alle Einflussparameter wesentlich größer als eins ist, weisen daher eine hohe Robustheit gegenüber ungewollten, aber technisch normalen Veränderungen der Einflussparameter auf. In einem gewissen Rahmen können bei diesen Prozessen bewusste Veränderungen der Einstellparameter, beispielsweise zum Ausgleich von Bauteiltoleranzen ohne Einfluss auf das Prozessergebnis vorgenommen werden. Prozesse bei denen die normierte Prozessfensterbreite eines oder mehrerer Einflussparameter wesentlich kleiner als eins ist, müssen als nicht robust angesehen werden. In diesem Fall müssen Strategien entwickelt werden, die die Veränderungen der kritischen Einflussparameter kompensieren.

Die Ermittlung der normierten Prozessfensterbreiten bietet somit ein klares Entscheidungskriterium, ob der Prozess für diesen Einflussparameter genauer untersucht werden muss. Ferner werden diejenigen Einflussparameter identifiziert, die die Robustheit des Prozesses gefährden. Mit dieser Information können gezielt Strategien zur Erhöhung der Einstellgenauigkeit dieses Parameters, wie beispielsweise konstruktive oder systemtechnische Maßnahmen, erarbeitet werden.

6.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der Prozessfensterbreite

Bei der Vorgehensweise zur Ermittlung der Prozessfensterbreiten einzelner Einflussparameter können drei Fälle unterschieden werden:

1. Der Prozess ist unbekannt
2. Der Prozess wird bereits an einem Betriebspunkt betrieben, aber das Prozessverhalten ist unbekannt
3. Das Prozessverhalten ist bekannt

Ist der Prozess unbekannt, so muss zunächst das Prozessverhalten für die grundlegenden Prozessparameter ermittelt werden. Hierfür kann zur Reduzierung der Versuchsanzahl ein statistischer Versuchsplan verwendet werden. Anschließend sollte das Verhalten des Prozesses unter produktions-typischen Randbedingungen ebenfalls mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans ermittelt werden, da diese einen großen Einfluss auf die Prozessrobustheit ausüben können. Anschließend werden die Prozessfensterbreiten der jeweiligen Einflussparameter für eine spezifische Vorgabe des Konstrukteurs ermittelt. Stehen mehrere Prozessfenster zur Verfügung an denen der Prozess entsprechend der Vorgaben betrieben werden kann, so kann der Prozessbereich mit den größten Prozessfensterbreiten ausgewählt werden.

Der Fall, dass ein Prozess bereits in der Produktion betrieben wird, aber das Prozessverhalten noch unbekannt ist, tritt dann auf, wenn die Prozesseinstellungen nur durch einige Versuche ermittelt wurden. Meist kann mit einigen wenigen Versuchen bereits eine Prozesseinstellung ermittelt werden, die die Vorgaben des Konstrukteurs erfüllt. In diesem Fall existiert jedoch kein Wissen darüber, ob und wo im gesamten Prozessgebiet eventuell eine Prozesseinstellung möglich ist, die ein breiteres Prozessfenster aufweist. Es wird deshalb vorgeschlagen, ausgehend vom derzeitigen Betriebspunkt, einen statistischen Versuchsplan zur Ermittlung des Prozessverhaltens aufzustellen. Dabei sollte der aktuelle Betriebspunkt, falls technisch möglich, das Zentrum des Versuchsplans bilden. Dabei sollten alle möglichen Einflussparameter berücksichtigt werden. Als Ergebnis kann der Prozessbereich identifiziert werden, der die größten Prozessfensterbreiten der Einflussparameter zulässt. Darüber hinaus können aus dem Prozessverhalten

Strategien zur Kompensation von produktionstypischen Einflüssen abgeleitet werden, sofern diese nicht innerhalb des Prozessfensters liegen.

Im dritten Fall, einem bekannten Prozessverhalten, können die Prozessfenster bzw. Prozessfensterbreiten direkt ermittelt werden und Strategien zur Kompensation produktionstypischer Einflüsse abgeleitet werden. Dies kann einerseits die Auswahl der notwendigen Systemtechnik wie Sensorik oder Spanntechnik sein. Andererseits können dies adaptive Funktionen zur Anpassung des Prozesses auf die entsprechenden Einflüsse sein. Die Beurteilung der Prozessfensterbreite $B_{\text{Prozess, norm.}}$ bietet dabei ein klares Entscheidungskriterium, ob auf die im konkreten Fall vorliegenden Einflüsse gesondert reagiert werden muss oder ob sie aufgrund der Größe des Prozessfensters toleriert werden können. Ferner kann beim Wechsel konstruktiver Vorgaben schnell eine neue Prozesseinstellung ermittelt werden.

6.3 Beurteilung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesium

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Zielgrößen und Sollvorgaben wird im folgenden die Prozessfensterbreite B_{Prozess} beispielhaft für die statische Festigkeit R_m angegeben (s. Tabelle 6.1). Für eine möglichst allgemeine Darstellung der Prozessfensterbreite wird nicht von einem konkreten Sollwert ausgegangen, sondern lediglich der Bereich des jeweiligen Einflussparameters angegeben, der eine Veränderung der statischen Festigkeit um 10 MPa bewirkt. Die Werte wurden in den Bereichen der größten Veränderung der statischen Festigkeit unter Einfluss des jeweiligen Parameters ermittelt. Die dargestellten Werte stellen folglich die minimalen Prozessfensterbreiten dar.

	Prozessfensterbreite B_{prozess}	
	3 mm Dicke	5 mm Dicke
Laserleistung P	0,3 kW	0,3 kW
Schweißgeschwindigkeit v	0,5 m/min	0,5 m/min
Fokuslage F_z	0,4 mm	0,4 mm
Fokusposition F_x	0,1 mm	0,15 mm
Einstrahlwinkel α (ab 0°)	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$
Einstrahlwinkel β (ab 0°)	$\pm 5^\circ$	$\pm 7^\circ$
Spaltbreite B_{sp}	0,1 mm	0,15 mm

Tabelle 6.1: Prozessfensterbreiten für verschiedene Einflussgrößen bei einer Veränderung der statischen Festigkeit um 10 MPa

Zur Ermittlung der normierten Prozessfensterbreiten werden die in Kapitel 4 sowie bei REEK (2000) und BAUER (1999) angegebenen Daten zur Genauigkeit eines Standard-Industrieroboters verwendet. Das Durchfahren einer engen Kurve/Ecke wird hier nicht berücksichtigt. Als Gusstoleranzen zur Ermittlung der Spaltbreite können etwa 0,2 mm (s. Kapitel 2) angenommen werden. Demnach ergeben sich für die normierten Prozessfensterbreiten die in Tabelle 6.2 dargestellten Werte.

Eine Betrachtung der in Tabelle 6.2 dargestellten normierten Prozessfensterbreiten für das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Magnesiumdruckguss zeigt, dass es sich um einen relativ robusten Prozess handelt. Betrachtet man das Prozessverhalten in Bezug auf die Streckgrenze und die Bruchdehnung, so ergibt sich ein ähnliches Bild.

Kritisch erweisen sich die tolerierbaren Spaltbreiten und Abweichungen bei der seitlichen Fokusposition F_x . Hier werden folglich erhöhte Anforderungen an die Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit gestellt. Für den Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesiumdruckguss in der Produktion sollte deshalb zum Ausgleich der seitlichen Fokusposition eine

Nahtfolgesensorik eingesetzt werden. Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass die Fokusslage genauer eingehalten werden kann.

	Normierte Prozessfensterbreite $B_{\text{prozess, norm.}}$	
	3 mm Dicke	5 mm Dicke
Laserleistung P	30	30
Schweißgeschwindigkeit v	5	5
Fokusslage F_z	1,5	1,5
Fokusposition F_x	0,35	0,4
Einstrahlwinkel α (ab 0°)	15	15
Einstrahlwinkel β (ab 0°)	5	7
Spaltbreite B_{sp}	0,5	0,5

Tabelle 6.2: Prozessfensterbreiten für verschiedene Einflussgrößen bei einer Veränderung der statischen Festigkeit um 10 MPa

Zur Erhöhung der Prozesssicherheit bei Bauteilen, bei denen die Spaltbreiten nicht in der geforderten Toleranz gehalten werden können, ist einerseits wiederum der Einsatz einer Nahtfolgesensorik und die Anwendung der bei REEK (2000) beschriebenen adaptiven Schweißfunktionen zur Anpassung der Laserleistung an die Spaltbreite zu empfehlen. Andererseits müssen die geringen zulässigen Fügespalte in den vorausgehenden Prozessschritten und in der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die anderen Einflussparameter können mit derzeit industriell verfügbaren Handhabungs- und Lasergeräten problemlos innerhalb der geforderten Bereiche gehalten werden.

6.4 Zusammenfassung

Nach Ermittlung des Prozessverhaltens können Prozessfenster für eine spezifische konstruktive Vorgabe einer Zielgröße angegeben werden. Mit Hilfe der Prozessfenster kann der Prozess so eingestellt werden, dass er relativ unempfindlich gegenüber Veränderungen der Einflussparameter ist. Es ist somit möglich einerseits die Grenzen des Prozesses in Form von Hinweisen an den Konstrukteur zu formulieren. Andererseits können Strategien entwickelt werden, den Prozess innerhalb des Prozessfensters zu halten. Dies kann beispielsweise durch eine verbesserte Prozesstechnik erfolgen, die den Prozess innerhalb der durch das Prozessfenster definierten Grenzen hält. Ist dies nicht möglich so können aus dem Prozessverhalten Strategien entwickelt werden, wie der Prozess bei Veränderung eines kritischen Einflussparameters nachgeführt werden muss. Im Fall des Laserstrahlschweißens bieten sich hierfür beispielsweise adaptive Schweißfunktionen an.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Magnesiumdruckguss insgesamt eine hohe Robustheit gegenüber aus Toleranzen resultierenden Veränderungen der Einflussparameter aufweist. Kritische Einflussparameter sind die seitliche Fokuspersion und Fügspalte. Zur Kompensation dieser Einflussparameter kann eine Nahtfolgesensorik mit adaptiven Schweißfunktionen eingesetzt werden.

7 Gestaltung von Prozess und Produkt

Von entscheidender Bedeutung für einen Einsatz eines Prozesses in der Produktion ist neben einem robusten Prozessverhalten auch die fertigungsgerechte Konstruktion der Bauteile. Für das Laserstrahlschweißen von Magnesium existieren bisher nur wenige Hinweise zur fertigungsgerechten Konstruktion. Im Rahmen dieses Kapitels werden deshalb einige Hinweise für eine laserstrahlschweißgerechte Prozess- und Produktgestaltung von Magnesiumbauteilen vorgestellt. Neben den hier vorgestellten Hinweisen für den Werkstoff Magnesium wird insbesondere auf die in weiteren Arbeiten, z.B. bei RUGE 1985, RADAJ 1993A, ZOPF 1995 und MATZEIT 1996, vorgestellten Hinweise zur fertigungsgerechten Konstruktion hingewiesen.

7.1 Schweißbarkeit verschiedener Nahtformen

Zur Beurteilung der konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten wurden neben den bisher ausführlich beschriebenen I-Nähten am Stumpfstoß auch weitere Naht- bzw. Stoßformen geschweißt. In Abbildung 7.1 sind Querschliffe einer I-Naht am Stumpfstoß und am Überlappstoß sowie einer Kehlnaht am Überlappstoß dargestellt. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte eine gute Schweißbarkeit dieser Nahtformen bei hohen statischen Zugscherfestigkeiten nachgewiesen werden.

Aus konstruktiver Sicht sind insbesondere auch Verbindungen unterschiedlich dicker Bauteile interessant. Es wurden deshalb Dick-dünn-Verbindungen geschweißt. Auch für diese Verbindungen konnten hohe Festigkeiten im Bereich der Grundmaterialwerte erzielt werden. Beim Einsatz des Laserstrahlschweißens konnte ferner ein nur sehr geringer Verzug dieser Verbindungen trotz des unterschiedlichen Wärmeabfuhrverhaltens ermittelt werden.

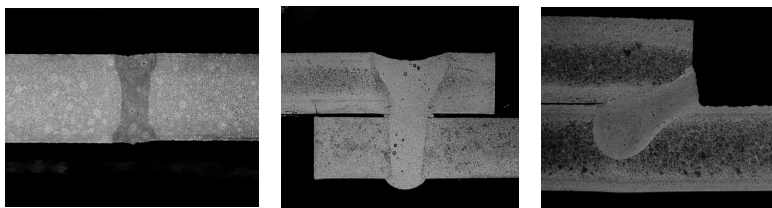


Abbildung 7.1: I-Naht am Stumpfstoß, I-Naht am Überlappstoß, Kehlnaht am Überlappstoß

7.2 Verbindung unterschiedlicher Legierungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden durch die Analyse der Verbindung unterschiedlicher Magnesiumlegierungen abgerundet. Hierfür wurden sowohl die Legierungen AZ91 und AM50 miteinander verschweißt (s. auch Abbildung 7.2) als auch die Druckgusslegierungen AZ91 und AM50 jeweils mit den Strangpresslegierungen AZ31 und AZ61. Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass diese Verbindungen ebenso wie die Verbindung

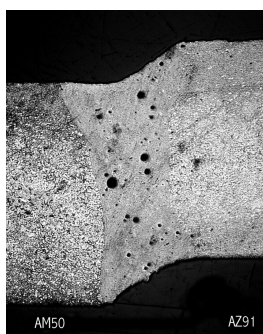


Abbildung 7.2:
Verbindung AZ91HP-
AM50 HP

artgleicher Legierungen gut schweißbar sind. Die erreichbaren mechanischen Kennwerte liegen im Bereich des Fügepartners mit den niedrigeren mechanischen Kennwerten. Der Anriss liegt ebenfalls auf der Seite des Fügepartners mit niedrigeren mechanischen Kennwerten. Bei der Verbindung der Gusslegierungen mit den Strangpresslegierungen konnte zusätzlich festgestellt werden, dass eine deutliche Richtungsabhängigkeit der Kennwerte zur Lage der Strangrichtung besteht. Die erreichbaren statischen Zugfestigkeiten bei Proben mit einer Strangrichtung quer zur Zugrichtung liegen bei etwa 80% der erreichbaren Festigkeiten von Proben mit einer längs zur Zugrichtung liegenden Strangrichtung.

7.3 Prozessgestaltung

Im Rahmen dieses Punktes werden Hinweise zur Prozessgestaltung aus den in Kapitel 5 sowie den Abschnitten 7.1 und 7.2 vorgestellten Ergebnissen abgeleitet.

7.3.1 Heften

Die Bauteile sollten vor dem Schweißen entweder durch eine Spannvorrichtung zueinander fixiert oder miteinander geheftet werden. Heftnähte sollten möglichst kurz sein, wenn anschließend über die Heftnähte geschweißt werden soll, da beim Überschweißen der Heftnähte vermehrt Poren auftreten können.

7.3.2 Schweißen in Nahtüberlappungsbereichen

Beim Schweißen von geschlossenen Nähten, beispielsweise an Gehäusen, bei denen die Schweißnaht Dichtfunktion hat, müssen sich Nahtanfang und Nahtende überlappen. Im Überlappungsbereich treten wie beim Heften vermehrt Poren auf. Um die Fehlerbildung im Überlappungsbereich zu minimieren schlägt RADAJ (1993a) vor, das Nahtende mit Hilfe von Parameterrampen (Leistungsrampe, Fokusrampe, Geschwindigkeitsrampe) so zu steuern, dass eine Minimierung von Schweißnahtfehlern erreicht wird. NIEMEYER (1999) schlägt zur Vermeidung eines Nahtendkraters eine ähnliche Vorgehensweise zur Vermeidung von Heissrissen im Nahtendkrater vor.

7.3.3 Toleranzanforderungen

7.3.3.1 Spaltbreite

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zur Bestimmung der zulässigen Toleranzen beziehen sich hauptsächlich auf die I-Naht am Stumpfstoß. Dabei konnte festgestellt werden, dass Spaltbreiten zwischen 0,1 mm und 0,2 mm einen nur geringen Abfall der statischen Festigkeit bewirken. Maximal lassen sich Spaltbreiten bis zu 0,4 mm verschweißen,

wenn eine Bearbeitungsoptik mit einem Fokusdurchmesser von 0,6 mm oder größer eingesetzt wird. Für größere Spaltbreiten muss Zusatzwerkstoff eingesetzt werden. Für hohe dynamische Anforderungen ist der Einsatz von Zusatzwerkstoff und ein anschließendes spanendes Abtragen von Nahtüberhöhungen erforderlich [NIEMEYER 1999]. Allgemein können als maximal tolerierbare Spaltbreite etwa 10% der Blechdicke angegeben werden. Dabei muss der maximale Spalt immer kleiner als der Fokusdurchmesser sein, da ansonsten die Fügekanten nicht angeschmolzen werden können.

Untersuchungen der zulässigen Spaltbreiten für die I-Naht am Überlappstoß haben gezeigt, dass hier Spaltbreiten im Bereich zwischen 0,1 und 0,3 mm zulässig sind. Höhere Laserleistungen und etwas langsamere Schweißgeschwindigkeiten führen zu größeren Nahtbreiten, wodurch der tragende Querschnitt am Stoß vergrößert werden kann. Aufgrund des ungünstigen Kraftflusses bei der I-Naht am Überlappstoß ist diese Nahtform jedoch die technologisch ungünstigste Nahtform.

Technologisch günstiger ist die Kehlnaht am Überlappstoß. Sie ermöglicht das Verschweißen wesentlich größerer Spaltbreiten ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoff, da bei dieser Nahtform mehr Freiheitsgrade bei den Prozesseinstellungen vorhanden sind. Es ist beispielsweise möglich, den Fokus des Laserstrahls weiter in das obere Bauteil zu verlegen, wodurch mehr Material von der oberen Kante des Bauteils aufgeschmolzen wird und vorhandene Spalte gefüllt werden können. Für den Einsatz an Stahlblechen konnten Spalte in der Größenordnung der Blechdicke ohne den Einsatz von Zusatzmaterial auf diese Weise überbrückt werden [REINHART U.A. 1995]. Für das Laserstrahlschweißen von Magnesiumdruckguss sind Spaltbreiten bei der Kehlnaht am Überlappstoß bis zu 1 mm auf diese Weise beherrschbar.

7.3.3.2 Kantenversatz

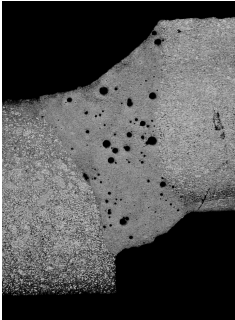


Abbildung 7.3:
Kantenversatz am
Stumpfstoß

Beim Schweißen von Stumpfstößen tritt häufig das Problem eines Kantenversatzes auf (vgl. auch Abbildung 7.3). Das liegt daran, dass kein Formschluss zur Positionierung der Stirnflächen zueinander erzeugt werden kann. Für das Laserstrahlschweißen von Magnesiumdruckguss kann ein Kantenversatz von bis zu 0,5 mm bei 3 mm Materialdicke ohne großen Festigkeitsverlust verschweißt werden [REINHART U.A. 1998]. Bei größeren Bauteildicken kann entsprechend den Ergebnissen bei RADAJ (1993A) ein etwas größerer Kantenversatz toleriert werden. Der maximal zulässige Kantenversatz liegt somit bei etwa 15% der Blechdicke.

7.3.3.3 Kantenvorbereitung

Die Vorbereitung der Fügekanten ist insbesondere beim Stumpfstoß von großer Bedeutung für ein prozesssicheres Schweißergebnis. Formfehler der Fügekanten können zu einer Querschnittsverminderung, zu Bindefehlern sowie zu einem Nahtefall und somit zu einer Kerbwirkung der Schweißnaht führen. Eine spanende Bearbeitung der zu fügenden Gusskanten wird deshalb empfohlen (vgl. Kapitel 3).

7.3.3.4 Positionierung des Laserfokus

Der Laserstrahl sollte das Bauteil bei der I-Naht am Stumpfstoß möglichst in der Fugenmitte treffen. Ein zu großer lateraler Versatz des Laserstrahls führt zu Bindefehlern in der Schweißnaht bis hin zu einer vollständigen Trennung der zu fügenden Bauteile, wenn kein gemeinsames Schmelzbad der beiden Fügepartner mehr vorliegt. Der zulässige laterale Versatz ist vom Fokusdurchmesser der verwendeten Schweißoptik und der Werkstückdicke abhängig. Bei einem Fokusdurchmesser von 0,3 mm und einer Werkstückdicke von 3 mm ist ein lateraler Versatz von 0,2 mm zulässig. Bei einer

Werkstückdicke von 5 mm und einem Fokusbereich von 0,6 mm können 0,45 mm lateraler Versatz toleriert werden. Allgemein kann damit ein lateraler Versatz von etwa 7% der Blechdicke zugelassen werden. Der maximale Versatz muss jedoch immer kleiner als der Durchmesser des Laserfokus sein.

Die Fokusslage in Strahlrichtung hängt von der eingestellten Streckenenergie und der verwendeten Fokussierung bzw. der Kaustik des Laserstrahls ab. Eine Veränderung der Fokusslage in Strahlrichtung von $\pm 0,5$ mm ist nicht kritisch (vgl. Kapitel 5 und Kapitel 6).

7.3.3.5 Zusammenfassung

Insgesamt sollten die in Abbildung 7.4 für die I-Naht am Stumpfstoß dargestellten Toleranzen eingehalten werden. Die Toleranzgrenzen des Einstrahlwinkels wurden aus den Ergebnissen in Kapitel 5 abgeleitet. Es wird darauf hingewiesen, dass sich diese Werte deutlich verringern können, wenn mehrere Toleranzfälle gleichzeitig auftreten.

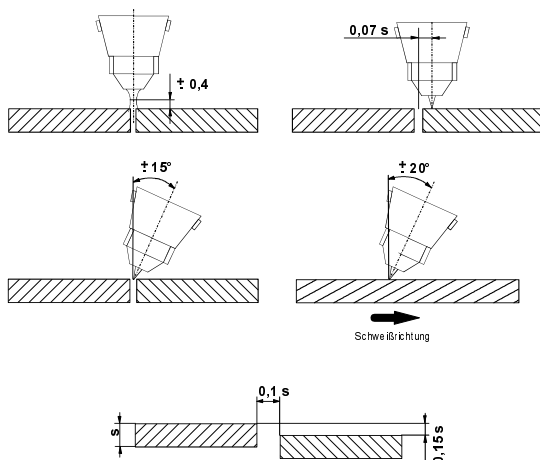


Abbildung 7.4: Einzuhaltende Toleranzen beim Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Magnesiumdruckguss

Für die I-Naht am Überlappstoß können Spaltbreiten bis zu 0,4 mm zugelassen werden. Eine deutliche Abhängigkeit der Spaltbreite von der Werkstückdicke konnte nicht nachgewiesen werden. Ein lateraler Versatz des Laserstrahls ist bei dieser Nahtform unerheblich. Für die Einstrahlwinkel gelten die für Stumpfstoß dargestellten Grenzen.

7.4 Produktgestaltung

Im Rahmen dieses Punktes werden Hinweise zur konstruktiven Gestaltung auf Basis der in den vorangehenden Abschnitten und Kapitel 5 erarbeiteten Erkenntnisse für laserstrahlschweißgerechte Magnesiumbauteile dargestellt. Dazu wird besonders auf die von RADAJ (1993A) vorgestellten Konstruktionsrichtlinien hingewiesen. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf die für das Laserstrahlschweißen von Magnesiumdruckgusslegierungen besonders relevanten Gestaltungshinweise eingegangen.

7.4.1 Gestaltung und Lage der Fügezone

Richtlinie 1: Durchgeschweißte Nähte bevorzugen

Im Rahmen der Untersuchungen des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesium hat sich gezeigt, dass durchgeschweißte Nähte ein wesentlich besseres Nahtbild ergeben. Dies liegt an der besseren Entgasung der Schmelze während des Schweißprozesses (vgl. Abbildung 7.5). Neben der besseren Entgasung haben durchgeschweißte Nähte den Vorteil, dass die Prozessparameter einfacher bestimmbar sind und die Qualitätskontrolle (Sichtprüfung) erleichtern [RADAJ 1993A]. Bei der Konstruktion schweißgerechter Magnesiumbauteile sollte deshalb eine Nahtform gewählt werden, bei der problemlos durchgeschweißt werden kann. Das bedeutet, dass bei Überlappstößen eine Materialdicke von insgesamt 6 mm nicht überschritten werden sollte.

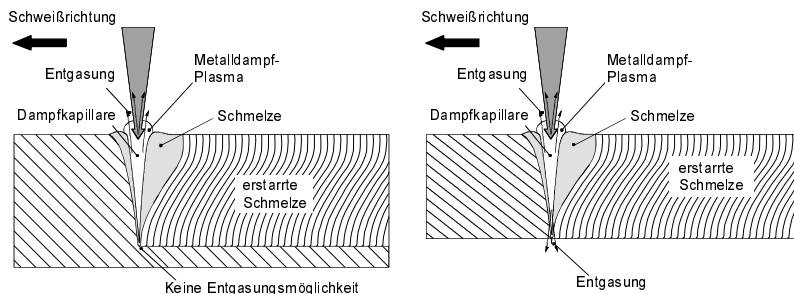


Abbildung 7.5: Entgasungsmöglichkeiten der Schmelze bei einer Ein- bzw. Durchschweißung

Richtlinie 2: Entgasung durch Spalte erleichtern

Soll oder kann aus konstruktiven Gründen nicht durchgeschweißt werden (z.B. Nahtwurzel im Sichtbereich), so sollten definierte Fügespalte vorgesehen werden. Allerdings sollte der Fügespalt die oben angegebenen Toleranzgrenzen nicht überschreiten, da ansonsten mit starken Einbußen der Festigkeit zu rechnen ist. Zur Vermeidung einer aufwendigen Spann- bzw. Positioniervorrichtung können entsprechende Abstandshalter bereits bei der Gusskonstruktion vorgesehen werden oder vor dem Schweißen eingelegt werden (s. Abbildung 7.6).

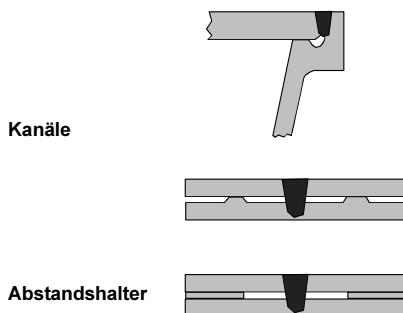


Abbildung 7.6: Entgasungsgerechte Gestaltung der Fügezone

Einen Sonderfall stellt die I-Naht am Flansch dar. Hierfür kann entweder die in Abbildung 7.6 dargestellte Entgasungsmöglichkeit mittels Kanälen gewählt werden oder die I-Naht direkt an das Ende des Radienauslaufes gelegt werden (vgl. Abbildung 7.7). Auf diese Weise ergibt sich zumindest auf einer Seite ein keilförmiger Spalt. Nachteile dieser Verbindung ergeben sich aus den hohen Anforderungen der Positionierung der Naht. Wird zu weit vom Radienauslauf entfernt geschweißt, entfällt diese Entgasungsmöglichkeit. Wird im Radienbereich selbst geschweißt, so kann der zu überbrückende Spalt zu groß werden.

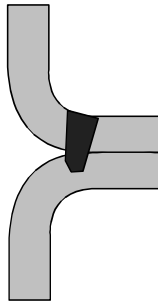


Abbildung 7.7: I-Naht am Flansch mit Entgasungsmöglichkeit durch Keilspalt

Richtlinie 3: Guten Kraftfluss anstreben

Aufgrund der hohen Sprödigkeit von Magnesium sind mehrachsige Spannungszustände zu vermeiden. Eine Um- oder Auslenkung des Kraftflusses sollte deshalb möglichst vermieden bzw. möglichst gering gehalten werden, um die Momenten-Belastung der Verbindung und speziell der Schweißnaht zu minimieren. Aus diesem Grund sollte nach Möglichkeit die I-Naht am Stumpfstoß angestrebt werden, da sich hier ein „idealer“ Kraftfluss ergibt [RADAJ 1993A]. Zum Ausgleich der höheren Anforderungen an die Positionierung des Laserstrahls sollte dann ein Nahtverfolgungssensor eingesetzt werden. Zur sensorgerechten Bauteilgestaltung können die bereits von RADAJ 1993A erarbeiteten Hinweise übernommen werden.

Kann die I-Naht am Stumpfstoß aufgrund zu großer Gusstoleranzen und daraus resultierender Spaltbreiten nicht verwendet werden, so sollte die in Abbildung 7.6 oder 7.7 dargestellte I-Naht am Flansch verwendet werden.

Für die in Abbildung 7.7 dargestellte Naht ist jedoch zu beachten, dass die Flanschbreite möglichst gering gewählt wird.

Richtlinie 4: Fugen/Nahtarten so kombinieren, dass ein mehrachsiger Toleranzausgleich möglich ist.

Die Ergebnisse aus Kapitel 5 und 6 zeigen, dass für das Laserstrahlschweißen von Magnesium insbesondere Veränderungen der seitlichen Fokusposition und Spalte als kritisch anzusehen sind. Bei der Konstruktion von Magnesiumbauteilen muss daher darauf geachtet werden, dass Lagetoleranzen der Naht sowie Toleranzen, die zu Fügespalten führen, möglichst gering sein müssen. Bei der Gestaltung von Magnesiumbauteilen ist daher darauf zu achten, dass ein mehrachsiger Toleranzausgleich möglich ist.

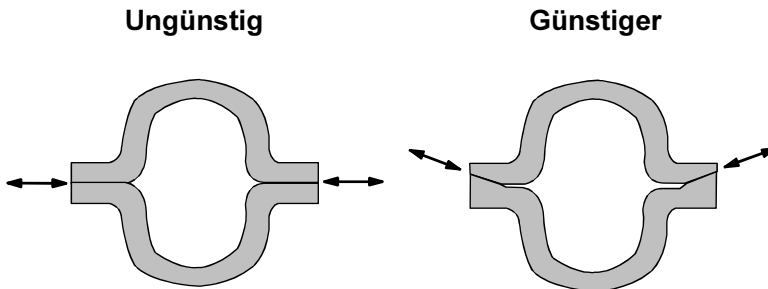


Abbildung 7.8: Toleranzausgleich in verschiedenen Richtungen

In Abbildung 7.8 ist in der links gezeigten Lösung ein Toleranzausgleich in nur gleicher Richtung möglich. Andere Abweichungen, wie beispielsweise ein Winkelversatz, können nicht ausgeglichen werden. Bei der auf der rechten Seite dargestellten Lösung sind die Fügeebenen zueinander geneigt. Auf diese Weise ist ein Toleranzausgleich in verschiedenen Richtungen möglich. Ein zusätzlicher Vorteil der Lösung auf der rechten Seite ist, dass das obere Bauteil im unteren Bauteil selbst zentriert wird. Eine derartige Gestaltung eignet sich insbesondere für Magnesiumdruckgussgehäuse. Zur Wahl der Nahtform bei einer derartigen Gestaltung sollte insbesondere wieder auf eine Durchschweißung und einen möglichst guten Kraftfluss geachtet werden.

Richtlinie 5: Schweißnähte bevorzugt in dünnwandige Gussbereiche legen

Die Gießbarkeit dünner Wandstärken stellt einen der herausragenden Vorteile des Magnesiumdruckgießens dar. Für die Schweißbearbeitung von Magnesiumlegierungen zeigt sich, dass diese dünnen Wandstärken besser schweißbar sind als größere Dicken, da hier die Gussqualität besser ist. Dies liegt daran, dass in dickwandigen Bereichen vermehrt Lunker oder andere Fehlstellen auftreten. Schweißnähte sollten daher überwiegend in dünnwandige Bereiche gelegt werden.

Richtlinie 6: Schweißnähte in Bereiche des Angusses oder von Steigern bzw. Überläufen legen

In Bereichen des Angusses und von Steigern bzw. Überläufen liegt häufig eine bessere Gussqualität mit einer geringeren Anzahl an Fehlstellen vor. Es ist deshalb empfehlenswert, Schweißnähte in diese Bereiche zu legen.

7.4.2 Bauteilvor- und -nachbehandlung***Richtlinie 7: Verschmutzungen möglichst entfernen***

Verschmutzungen auf der Oberfläche und in der Gusshaut können während des Schweißens einfach verdampft werden. Es ist jedoch zu empfehlen die Bauteile von Fett- und Schmiermittelrückständen zur Bauteilvorbereitung zu reinigen, um eine erhöhte Prozesssicherheit zu gewährleisten (vgl. Kapitel 3.3.5.6). Eine spanende Bearbeitung der Fügezone ist empfehlenswert, um Oxydrückstände und andere Verunreinigungen in der Gusshaut zu entfernen und geringe Formtoleranzen der Fügekanten einzuhalten.

Richtlinie 8: Lackierungen, Imprägnierungen und Korrosionsschutz erst nach dem Schweißen aufbringen

Magnesiumschweißnähte müssen in der Regel nicht nachbearbeitet werden. Sollten sehr hohe dynamische Festigkeiten gefordert sein, ist eine spanende Nachbearbeitung der aufgrund der Zufuhr von Zusatzmaterial entstandenen Nahtüberhöhungen erforderlich.

Imprägnierungen und Korrosionsschutz dürfen erst nach dem Schweißen aufgebracht werden, da die Bauteile ansonsten nicht mehr schweißbar sind (vgl. Kap. 3.3.5.6).

7.5 Zusammenfassung

Insgesamt zeigt sich, dass beim Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Magnesium neben der in Kapitel 5 vorgestellten Nahtform, die I-Naht am Stumpfstoß, auch weitere Nahtformen wie die I-Naht am Überlappstoß oder die Kehlnaht am Überlappstoß gut schweißbar sind. Ferner können verschiedene Legierungen miteinander verbunden werden.

Die Hinweise zur Prozess- und Produktgestaltung ermöglichen einerseits dem Konstrukteur laserstrahlschweißgerechte Magnesiumbauteile zu gestalten. Andererseits kann der Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozess von Magnesium in der Produktion, in Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 und 6, schnell und sicher eingestellt werden.

8 Anwendungsbeispiele

Im Rahmen dieses Punktes werden die Möglichkeiten zur Anwendung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesiumdruckgussbauteilen anhand von zwei Beispielen, mit hohem wirtschaftlichen Potential, verdeutlicht.

8.1 Dichtschweißen von Gehäusen

Von hoher Relevanz für das Schweißen von Magnesiumdruckgussbauteilen ist das Dichtschweißen von Gehäusen. Aufgrund seiner guten Gießeigenschaften eignet sich Magnesium zur Herstellung hochkomplexer Bauteile. Die Herstellung von komplexen Gehäusen ist deshalb ein wichtiger Einsatzbereich von Magnesiumdruckguss. Beispiele hierfür aus dem Kraftfahrzeugbau sind unter anderen Getriebegehäuse und Ansaugrohre (Schaltsaugrohre).

Derzeitiger Stand der Fügetechnik bei der Herstellung und Montage dieser Gehäuse sind Verschraubungen der Gehäuse. Hierfür ist es notwendig, vor der Verschraubung der Gehäuseschalen Gewinde in das Bauteil einzubringen und die Trennstelle der Gehäusahälften mit einer flüssigen oder einer festen Dichtung gegeneinander abzudichten. Dies erfordert eine Vielzahl von Prozessschritten, die durch eine dichte Verschweißung der Gehäusahälften auf den Schweißvorgang reduziert werden können.

Eine Dichtschweißung bietet neben der Reduzierung von Prozessschritten den zusätzlichen Vorteil, dass die punktförmige Kraftübertragung an den Schraubstellen vermieden und durch eine linienartige Übertragung der Kräfte ersetzt wird. Ferner können die an den Schraubstellen zur Verstärkung der Schraubstelle notwendigen Materialanhäufungen sowie Schraubflansche vermieden werden. Hieraus ergibt sich ein geringerer Materialeinsatz und somit eine Reduzierung der Materialkosten.

Daneben tritt bei Schraubverbindungen das Problem auf, dass bei Magnesium unter Belastung und Temperaturen von über 150°C starke Kriechvorgänge auftreten. Die erzeugte Vorspannkraft und somit die Funktion der Schraubverbindung wird auf diese Weise nicht mehr gewährleistet.

Als Beispiel zum Dichtschweißen eines Gehäuses wird im Folgenden das Verschweißen eines Ölpumpengehäuses vorgestellt. Das in Abbildung 8.1 abgebildete Gehäuse wird als Serienbauteil aus Aluminiumdruckguss hergestellt. Für Untersuchungen zur Gießbarkeit dieses Gehäuses aus Magnesium, wurde das Druckgusswerkzeug magnesiumgerecht modifiziert, die schraubgerechte Konstruktion jedoch belassen.

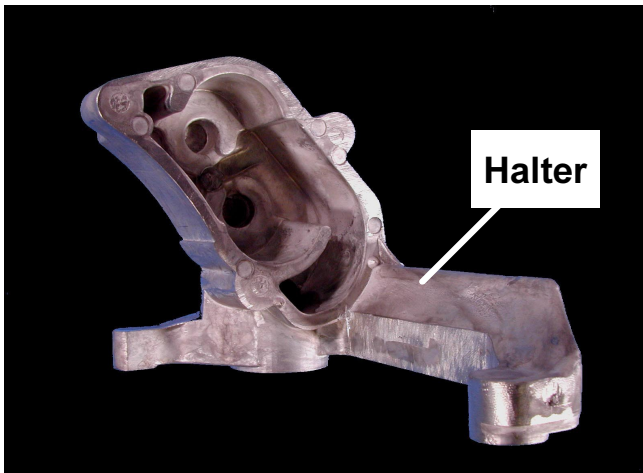


Abbildung 8.1: Ölpumpengehäuse aus Magnesiumdruckguss

Für Schweißbarkeitsuntersuchungen wurde auf das in der Legierung AZ91HP abgegossene, schraubgerecht konstruierte Gehäuse ein Deckel aus der Legierung AZ91HP aufgeschweißt (s. Abbildung 8.2). Als Naht bzw. Stoßform wurde die I-Naht am Überlappstoß gewählt, da der nach oben auskragende Halter zur Befestigung des Ölpumpengehäuses ein seitliches Verschweißen des Deckels verhindert. Eine Durchschweißung war auf diese Weise nicht möglich, so dass mit Poren in der Schweißnaht aufgrund der schlechteren Entgasungsmöglichkeiten der Schmelze gerechnet werden musste. Vorteil dieser Nahtform waren die geringeren Anforderungen an die laterale Positionierung des Laserstrahls. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit zur Schweißnaht im Bereich des Halters wurde eine

Schweißoptik mit einer Brennweite von $f=200$ mm gewählt. Als Schutzgas wurde Helium eingesetzt.

Um durch den Deckel auch in das Gehäuse einzuschweißen und somit eine dichte Verbindung zu erzeugen, sollte eine Einschweißtiefe von 3 mm erreicht werden. Dabei sollte die Nahtbreite am Stoß mindestens 1 mm betragen. Zur Wahl der Schweißparameter wurden die in Kapitel 5 dargestellten Erkenntnisse ausgenutzt. Als erste Einstellung der Kernparameter Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokusslage wurden $P=2$ kW, $v=3$ m/min und $F_z=-1,5$ mm gewählt, bei einem geringen Einstrahlwinkel $\alpha=4^\circ$. Zur Überprüfung und Anpassung dieser Parameter an das vorliegende reale Bauteil mit seinem im Vergleich zu ebenen Probeplatten veränderten Wärmehaushalt wurden zunächst Schweißversuche im gut zugänglichen Bereich durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass mit vorliegenden Parametern eine zu geringe Einschweißtiefe erreicht wurde. Ferner konnte keine befriedigende Oberräumenqualität erreicht werden. Aus diesen Gründen wurden in wenigen Schritten, bei denen sowohl die Schweißgeschwindigkeit als auch die Fokusslage variiert wurden, die Schweißgeschwindigkeit auf $v=2,7$ m/min und die Fokusslage auf $F_z=-2,0$ mm optimiert.

Im Bereich des Halters liegen völlig andere Verhältnisse vor, da in diesem Bereich mit einem Einstrahlwinkel $\beta=45^\circ$ trotz der Brennweite $f=200$ mm geschweißt werden musste. Wie Kapitel 5.3.2 zu entnehmen ist sollte bei großen Einstrahlwinkeln β eine Fokusslage F_z in der Nähe der Oberfläche gewählt werden. Aus diesem Grund wurde für erste Schweißversuche in diesem Bereich die Fokusslage $F_z=0$ gewählt. Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit wurden nicht geändert. Aufgrund des sehr hohen Einstrahlwinkels konnte allerdings keine ausreichende Einschweißtiefe erreicht werden. Erst nach einer weiteren Geschwindigkeitsreduzierung auf $v=2$ m/min konnte eine Einschweißtiefe von 2,3 mm erreicht werden. Die Schweißparameter sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst dargestellt.

Parameter	Wert
Brennweite der Optik f	200 mm
Schutzgas zentral von oben	He 4.6
Laserleistung P	2,0 kW
Schweißgeschwindigkeit v	2,7 m/min bzw. 2,0 m/min
Fokuslage F_z	-2,0 bzw. 0 mm
Einstrahlwinkel α	-4°
Einstrahlwinkel β	0° bzw. 45°

Tabelle 8.1: Schweißparameter zum Verschweißen des Ölpumpengehäuses

In einem letzten Optimierungsschritt wurden die Erkenntnisse aus den oben beschriebenen Versuchen für beide Bereiche des Gehäuses für das Schweißen einer durchgehenden Schweißnaht umgesetzt. In Abbildung 8.2 ist die Oberraupe der erzeugten Schweißnaht zu erkennen.

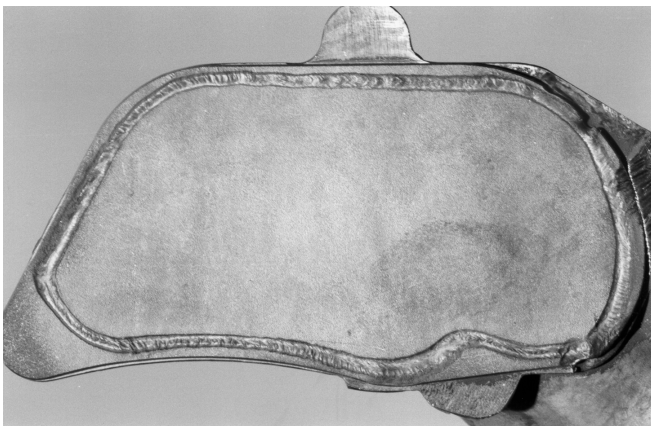


Abbildung 8.2: Auf das Ölpumpengehäuse geschweißter Deckel

Bei den Schweißversuchen hat sich deutlich gezeigt, dass das Ölpumpengehäuse für einen wirtschaftlichen und prozesssicheren Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens in der Produktion zunächst lasergerecht umkonstruiert werden muss. Insbesondere im Bereich des Halters konnten die Anfor-

derungen nicht erfüllt werden. Es konnte im Bereich des Halters zwar der Deckel mit dem Gehäuse verschweißt werden, die Einschweißtiefe wurde jedoch so stark reduziert, dass der 2 mm dicke Deckel gerade noch durchgeschweißt werden konnte. Hohe Dichtigkeitsanforderungen können mit einer solchen Schweißnaht nicht erfüllt werden. Ein Querschliff der Schweißnaht (Abbildung 8.3) zeigt außerdem, dass im Bereich des Stoßes eine Vielzahl von Poren auftreten. Aus diesen Gründen wird im folgenden deshalb ein Vorschlag zur Umkonstruktion des Bauteils anhand der in Kapitel 7 dargestellten Richtlinien erarbeitet.

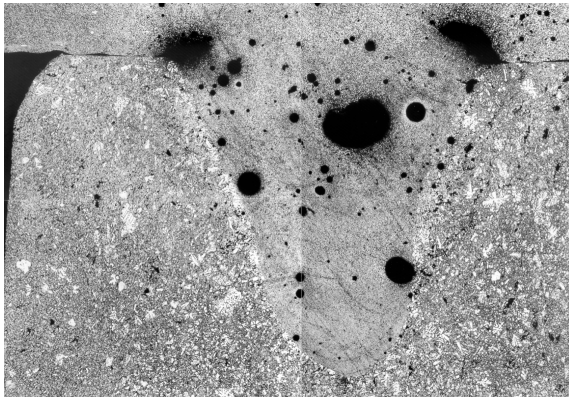


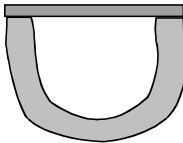
Abbildung 8.3: Querschliff der erzeugten Schweißnaht

Das größte Hemmnis für eine Schweißbearbeitung des Ölpumpengehäuses stellt der nach oben ausragende Halter dar. Für eine schweißgerechte Gestaltung muss der Halter folglich so umkonstruiert werden, dass eine freie Zugänglichkeit zur Schweißnaht möglich ist. Eine Möglichkeit hierfür stellt eine Drehung des Halters um 90° dar. Er würde somit nicht mehr nach oben sondern zur Seite stehen. Dies führt zu einer verdrehten Einbaulage der Ölpumpe, was jedoch durch Anpassung der Anschlüsse ausgeglichen werden kann.

Das zweite Hemmnis stellt die für die Schweißversuche gewählte Naht- bzw. Stoßform dar. Nach **Richtlinie 1** (s. Kapitel 7) sollten durchgeschweißte

Nähte bevorzugt werden. Dies ist bei vorliegender Stoßform nicht möglich. Nach **Richtlinie 4** eignen sich für Gehäuse insbesondere Stoßformen, die einen Toleranzausgleich in mehrere Richtungen ermöglichen. Günstig ist die in Abbildung 8.4 dargestellte Stoßform, die einerseits einen Toleranzausgleich in verschiedenen Richtungen ermöglicht und den Deckel zentrieren kann (vgl. Kapitel 7.4.1). Eine nachträgliche spanende Herstellung dieser Stoßform war jedoch nicht möglich.

Bestehende Stoßform



Günstiger

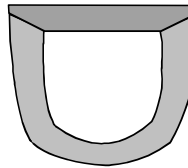


Abbildung 8.4: Günstige Stoßform zum Verschweißen des Ölpumpengehäuses

Bei einer Wahl der vorgeschlagenen Stoßform ergeben sich prinzipiell drei Möglichkeiten, die beiden Bauteile zu verschweißen (s. Abbildung 8.5). Die ersten beiden Möglichkeiten stellen das Schweißen einer I-Naht am Überlappstoß mit einer Wahl der Einstrahlrichtung senkrecht von oben oder von der Seite dar. Von Vorteil dabei ist, dass die Anforderungen an die laterale Positionierung des Laserfokus nur gering sind. Nachteilig wirkt sich dagegen aus, dass bei dieser Nahtform nicht durchgeschweißt werden kann. Eine Entgasung der Schmelze ist somit nur durch das Keyhole nach oben bzw. zur Seite möglich. Ein weiterer Nachteil ist der geringere erzielbare tragende Nahtquerschnitt. Hohe Innendrucke können bei dieser Nahtform nicht zugelassen werden.

Die dritte Möglichkeit die beiden Bauteile zu verschweißen, stellt die Verschweißung in Fugenrichtung dar. Auf diese Weise kann die Naht durchgeschweißt werden und es ergibt sich ein großer tragender Querschnitt. Allerdings stellt diese Möglichkeit hohe Anforderungen an die Positionierung des Laserstrahls.

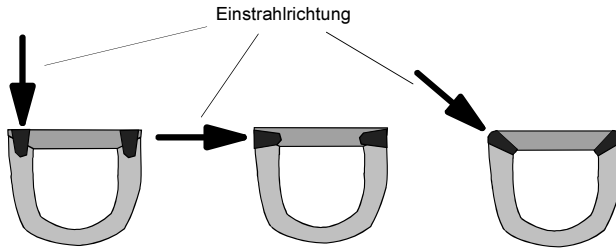


Abbildung 8.5: Verschiedene Möglichkeiten zur Verschweißung des Ölpumpengehäuses

Zur Überprüfung dieser Möglichkeit wurde eine Probeplatte aus AZ91HP der Dicke 2 mm an eine weitere Probeplatte aus AZ91HP der Dicke 5 mm geschweißt. Mit dem Dickenunterschied der beiden Probeplatten sollte der Wärmehaushalt, wie er am realen Ölpumpengehäuse vorliegt, simuliert werden. Die Kanten der beiden Probeplatten wurden im 45° Winkel abgefräst. Die beiden Probeplatten wurden anschließend im 90° Winkel verschweißt. Der in Abbildung 8.6 dargestellte Querschliff weist nur noch eine geringe Anzahl an Poren und keine Risse auf.

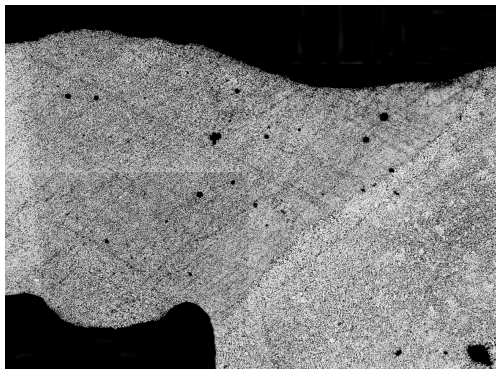


Abbildung 8.6: Querschliff einer durchgeschweißten Naht. Probeplatten unter 45°angeschrägt.

In einem nächsten Schritt müssten diese Ergebnisse auf ein laserschweißgerecht umgestaltetes Druckgussbauteil übertragen werden. Aufgrund der hohen Kosten für ein entsprechend gestaltetes Druckgusswerkzeug konnte dieser letzte Schritt im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden. Die vorliegenden Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass ein erfolgreicher Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens von Magnesiumdruckguss in einem Serieneinsatz wahrscheinlich ist.

8.2 Einschweißen eines Halters in ein Grundbauteil

Mit diesem Beispiel soll darauf hingewiesen werden, dass sich bei geschickter Konstruktion von Magnesiumbauteilen unter Einbeziehung des Laserstrahlschweißens wirtschaftliche Vorteile ergeben können. Eine industrielle Umsetzung dieses Beispiels ist nach Wissens des Autors bisher nicht erfolgt.

Druckgusswerkzeuge bieten nur eine geringe Flexibilität bezüglich der gießbaren Varianten eines Bauteils. Gerade bei großen und komplexen Werkzeugen, die sehr hohe Investitionskosten erfordern, muss geprüft werden, ob es technologisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist, ein für alle Varianten gleiches Grundbauteil in hoher Stückzahl zu gießen und die Varianten durch Einschweißen von beispielsweise stranggepressten Bauteilen zu bilden. Auf diese Weise lassen sich in einer Art Baukastensystem auch Varianten mit geringeren Stückzahlen wirtschaftlich herstellen.

Ein Beispiel hierfür ist ein Sitzgestell aus Magnesiumdruckguss. In Sitzgestelle werden je nach Kundenwunsch eine Vielzahl von Verstellmöglichkeiten eingebaut, um größtmöglichen Sitzkomfort zu bieten. Zum Einbau von Stellmotoren in das Sitzgestell, mit denen diese Verstellmöglichkeiten realisiert werden können, müssen Halter vorgesehen werden.

Eine Möglichkeit zur Realisierung aller denkbaren Verstellmöglichkeiten ist es, ein äußerst komplexes Gussbauteil herzustellen, in das bereits alle Halter integriert sind. Bei dieser Strategie sind zwei Problemfälle denkbar: 1. Das Bauteil wird so komplex, dass es nicht mehr gießbar ist. 2. Nicht vorgedachte Varianten können nachträglich nicht mehr realisiert werden. Eine kurzfristige Reaktion auf Kundenwünsche ist somit nicht möglich.

Zur Lösung dieser Probleme bietet sich die oben beschriebene Strategie eines Grundbauteils mit eingeschweißten variantenbildenden Elementen an. Im Folgenden wird dieser Fall deshalb genauer analysiert.

Voraussetzung zur Realisierung des hier vorgeschlagenen Baukastensystems ist die Bildung von standardisierten Fügestellen am Grundbauteil und den einzuschweißenden Haltern. Abbildung 8.7 kann ein Vorschlag für eine solche Fügestelle entnommen werden.

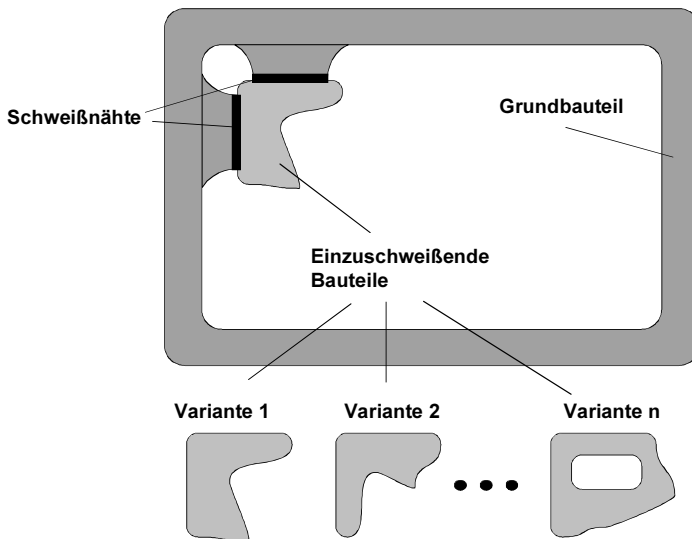


Abbildung 8.7: Einschweißen von Varianten an einer definierten Fügestelle

Die Detailgestaltung der Fügezone kann entsprechend der in dieser Arbeit und bei RADAJ (1993A) vorgestellten Richtlinien je nach Art und Höhe der Belastung erfolgen.

9 Bewertung

Abschließend wird darauf eingegangen, welcher Nutzen sich durch die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Kenntnisse des Prozessverhaltens, der Definition des Prozessfensters und den Hinweisen für die Konstruktion ergibt.

Die erarbeiteten Kenntnisse bringen sowohl technologische als auch wirtschaftliche Vorteile mit sich (vgl. auch Tabelle 9.1). Der Aufwand für die Umstellung auf neue Bauteile verringert sich, da bereits Kenntnisse des Gesamtprozesses vorhanden sind. Somit sind nur noch einige Bestätigungsversuche zur Anpassung auf das neue Bauteil und zur Optimierung des Prozesses für die Produktion notwendig.

Bei der Einführung neuer Bauteile verringert sich darüber hinaus der Aufwand der Konstruktion, da mit den vorliegenden Richtlinien bereits frühzeitig günstig gestaltete Bauteile konstruiert werden können und ein iteratives Optimieren zwischen Konstruktion und Fertigung vermieden werden kann.

Dejustierte Prozesse in der Fertigung können bei Kenntnis des Prozessverhaltens schnell und zielsicher wieder neu eingestellt werden. Dies verringert Anlagenstillstandszeiten und erhöht somit die Produktivität.

Der Konstrukteur kann aufgrund der Kenntnis des Prozessverhaltens zusätzlich die Leistungsfähigkeit des Verfahrens frühzeitig abschätzen und das Bauteil entsprechend gestalten. Ist keine Kenntnis des Prozessverhaltens in der Konstruktion vorhanden, so kann das zu nicht erfüllbaren Forderungen an die Fertigung bzw. die Einstellung des Prozesses führen. Eine umfangreiche Umgestaltung des Bauteils zur Erfüllung der Anforderungen ist somit vermeidbar.

Die Kenntnis des Prozessverhaltens im Zusammenhang mit der Bestimmung von Prozessfenstern bietet dem Fertigungsplaner die Möglichkeit einerseits die Art und den Umfang der benötigten Systemtechnik, wie einzusetzende Sensorik oder den Aufwand für die Spanntechnik, zu bestimmen. Unnötige Investitionen für Systemtechnik können somit vermieden werden. Andererseits kann der Fertigungsplaner bei mehreren möglichen Prozesseinstellungen die optimale Einstellung auswählen und den Prozess mit robusten

Einstellungen betreiben (vgl. Kap. 6). Hierfür können bei Kenntnis des Prozessverhaltens mit geringem Aufwand adaptive Schweißfunktionen entwickelt werden, um den Prozess an mögliche, durch andere Maßnahmen nicht vermeidbare produktionstypische Einflüsse anzupassen. Dies hat Auswirkungen auf die Ausschussquote und die Qualität der hergestellten Teile.

Kriterium \	Ohne Kenntnisse des Prozessverhaltens und von konstruktiven Hinweisen	Mit Kenntnissen des Prozessverhaltens und konstruktiven Hinweisen
Aufwand für die Einführung neuer Bauteile	○	◐
Aufwand zur Neueinstellung dejustierter Prozesse	◐	●
Auswahl benötigter Systemtechnik	○	●
Auswahl optimaler Prozesseinstellungen	○	●
Aufwand zur Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen	○	●

○ hoch/schlecht ◐ mittel ● gering/gut

Tabelle 9.1: Nutzen der Kenntnis des Prozessverhaltens und konstruktiven Hinweisen

10 Zusammenfassung und Ausblick

Umfassende Leichtbaukonzepte erfordern eine gesamtheitliche Betrachtung von Werkstoff, Gestaltung und Fertigung. Im Bereich des Stoffleichtbaus gewinnen Magnesiumlegierungen in Industriezweigen, in denen bewegte Massen eine große Rolle spielen, einen zunehmenden Stellenwert. Die Fügeverfahren spielen bei der Gestaltung von Produkten eine zentrale Rolle. Zur Eröffnung des gesamten Gestaltungspotentials ist es daher notwendig, neben den derzeit industriell hauptsächlich eingesetzten Schraubverbindungen, auch weitere Fügeverfahren industriell verfügbar zu machen. Diese Arbeit leistet hierzu einen entscheidenden Beitrag, da neben dem Verhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckgusslegierungen auch die konstruktive Gestaltung laserstrahlgeschweißter Magnesiumbauteile berücksichtigt wird.

Ausgehend vom Nachweis der Schweißbarkeit und den Eigenschaften laserstrahlgeschweißter Magnesiumdruckgussverbindungen sowie der besonderen Eignung des Nd:YAG-Lasers zur Schweißbearbeitung von Magnesium wurde das Prozessverhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses beschrieben. Dabei wurde insbesondere auf produktionstypische Randbedingungen wie aus Bauteiltoleranzen resultierende Fügespalte und auf die Auswirkungen einer Fehlpositionierung des Laserfokus eingegangen.

Zur Beurteilung der Prozessrobustheit wurde ausgehend von einer Definition des Prozessfensters ein Kriterium zur Beurteilung der Größe des Prozessfensters abgeleitet. Damit ist es möglich optimierte Prozesseinstellungen im Hinblick auf die Prozessrobustheit vorzunehmen.

Insgesamt zeigt sich, dass der Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozess von Magnesium ein relativ großes Prozessfenster aufweist. Zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit ist es jedoch empfehlenswert, geeignete Sensorik besonders zur Positionierung des Laserstrahls einzusetzen.

Aus dem Prozessverhalten wurden anschließend konstruktive Gestaltungsregeln abgeleitet. Dabei wird insbesondere darauf hingewiesen, dass Magnesiumschweißnähte möglichst so geplant werden sollen, dass eine Durchschweißung möglich ist. Ist dies nicht möglich, so sollten ausreichende Möglichkeiten zur Entgasung der Schmelze vorgesehen werden.

Abschließend wurden anhand von zwei Anwendungsbeispielen Szenarien zum Einsatz des Nd:YAG-Laserstrahlschweißens in der Produktion aufgezeigt und der Nutzen der in dieser Arbeit erarbeiteten Kenntnisse wirtschaftlich und technologisch bewertet. Eine industrielle Umsetzung der angeführten Anwendungsbeispiele ist bisher trotz des wirtschaftlichen Potentials dieser Beispiele nicht erfolgt. Eine Erklärung hierfür bietet die von WEULE (1992) aufgestellte These, dass Innovationen zunächst einen mühsamen Durchsetzungsprozess durchlaufen. Als Zielsetzung dieser Arbeit sollte daher das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen durch die Untersuchung technologischer, wirtschaftlicher und konstruktiver Gesichtspunkte in erhöhtem Umfang der wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden. Nach den vorliegenden Ergebnissen dieser Arbeit kann erwartet werden, dass zumindest in einigen Pilotprojekten eine industrielle Umsetzung bald erfolgen wird.

Die Bewertung der in dieser Arbeit erarbeiteten Kenntnisse zeigt, dass insbesondere der Aufwand in Konstruktion und Fertigung für neue Bauteile und die Neueinstellung dejustierter Prozesse deutlich reduziert werden kann. Darüber hinaus können die erarbeiteten Kenntnisse und die Methode zur Bestimmung des Prozessfensters einen deutlichen Beitrag zur Erhöhung der Prozesssicherheit leisten. Dies wird durch die Auswahlmöglichkeit der optimalen Prozesseinstellungen, der vereinfachten Auswahl der notwendigen Systemtechnik und der vereinfachten Ableitung adaptiver Schweißfunktionen gewährleistet.

Insgesamt wurde gezeigt, dass das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen sowohl von technologischer als auch wirtschaftlicher Seite ein großes Potential für einen Produktionseinsatz bietet. Vor einem Produktionseinsatz ist jedoch insbesondere die Gussqualität zu verbessern. Dabei muss speziell darauf geachtet werden, dass während des Gießprozesses keine wasserstoffhaltige Atmosphäre vorliegt. Kann dies nicht gewährleistet werden, so ist es im Sinne einer hohen und prozesssicheren Schweißnahtqualität notwendig, die Gussbauteile vor dem Schweißprozess wasserstofffrei zu glühen.

Zukünftige Arbeiten sollten sich daher insbesondere auf die Qualität des Gusses beziehen, da das Problem des Wasserstoffgehaltes im Guss nicht nur die Prozesssicherheit der Schweißtechnik einschränkt sondern sich auch negativ bei weiteren „warmen“ Prozessschritten wie dem Aufbringen von Lackierungen auswirken kann.

Neben der Verbesserung der Gussqualität im Hinblick auf eine Reduzierung des enthaltenen Wasserstoffes ist auch eine deutliche Verbesserung des dynamischen Festigkeitsverhaltens für einen breiten Einsatz von Magnesiumguss notwendig. In diesem Zusammenhang ist insbesondere sinnvoll, nach einer Verbesserung der Gussqualität, das Prozessverhalten des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses im Hinblick auf das dynamische Betriebsverhalten genau zu untersuchen, da dies nicht Teil dieser Arbeit war. Aus den hier vorgestellten Ergebnissen kann lediglich auf das Verhalten unter dynamischer Last geschlossen werden.

Zukunftsweisende Leichtbaukonzepte erfordern den Einsatz des optimalen Werkstoffs und der optimalen Struktur entsprechend den Bauteilbelastungen. Es ist daher zu erwarten, dass in Zukunft Produkte nicht nur aus einem Werkstoff bzw. einer Werkstoffklasse aufgebaut werden sollen. Dies stellt besonders hohe Anforderungen an die Fügetechnik zur Realisierung dieser Mischbauweisen. Hierfür ist es erforderlich Mischverbindungen, beispielsweise von Aluminium mit Magnesium oder Magnesium mit Kunststoffen, mit hohen Festigkeiten zu erzeugen. Die Entwicklung hierfür geeigneter Fügetechniken stellt die Herausforderung der nächsten Jahre dar.

11 Literaturverzeichnis

ALBRIGHT & RUDEN 1994

Albright, D.L.; Ruden, T.: Magnesium Utilization in the North American Automotive Industry. Light Metal Age 52 (1994) 3-4, S. 26-28.

ALBRIGHT 1995

Albright, D.L.: Current trend in the development and utilization of magnesium alloys. Magnesium in perspective: IMA 52, May 21-23, 1995, San Francisco, CA, USA, S. 30-37.

ARATA U.A. 1976

Arata, Y.; Ohsumi, M.; Hayakawa, Y.: Elektronenstrahlschweißen von Magnesiumgußlegierung AZ91C. Transactions of JWRI 5 (1976) 2, S. 111-118.

ARGE 1998

N.N.: Datenbank des Steinbeis Transferzentrums Arge Metallguss an der FH Aalen, 1998.

ASAHINA U.A. 1991

Asahina, T., Kato, K., Tokisue, H.: Friction Welding of Magnesium Alloy AZ31. Journal of Japan Institute of Light Metals 41 (1991) 10, S. 674-680.

ASM 1990

N.N.: ASM Metals Handbook, Volume 2: Properties and Selections: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10. Aufl., ASM International, USA, 1990.

ASTM B93-90

ASTM B93/B93M-90:Standard Specification for Magnesium Alloys in Ingot Form or Sandcastings, Permanent Mold Castings, and Die Castings. Annual Book of ASTM Standards. Section 2: Nonferrous Metal Products. Volume 02.02 Aluminum and Magnesium Alloys; Die Cast Metals, 1990.

AUNE & WESTENGEN 1996

Aune, T.K.; Westengen, H.: Magnesiumdruckguß - Legierungen und Eigenschaften. Gießerei-praxis (1996) 19/20, S. 398-403.

AUTOMOBIL 1996

N.N.: Renaissance des Magnesium. Automobilproduktion 10 (1996) 6, S. 96-98.

BAESLAK U.A. 1986

Baeslack, W. A.; Savage, S.J.; Froes, F.H.: Laser-weld heat affected zone liquation and cracking in a high-strength Mg-based alloy. Journal of Material Science Letters (1986) 5, S. 935-939.

BARBER 1974

Barber, R.: Laser welding applications. Technical Paper Society of Manufacturing Engineers AD74-045, 1974.

BAUER 1999

Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen. Berlin: Springer 1999.

BECK 1939

Beck, A.: Magnesium und seine Legierungen. Berlin: Springer 1939.

BESKE 1992

Beske, E.U.: Untersuchungen zum Schweißen mit Nd:YAG-Laserstrahlung. Dissertation, Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. (Reihe 2, Nr. 257)

BEYER 1995

Beyer, R.-E.: Schweißen mit Laser - Grundlagen. Berlin: Springer 1995.

BÖNDEL 1992

Böndel, B.: Magnesium ist im Kommen. kfz-Betrieb (1992) 9, S.166-169.

BS 3019

BS3019: TIG welding - Part 1: Specification for TIG welding of aluminium, magnesium and their alloys. British Standard BS 3019: Part 1, Sept. 1984.

BUSK 1987

Busk, R.S.: Magnesium products design. New York: Dekker 1987, S. 3 ff.

CARSON 1983

Carson, F.: Magnesium: An Automotive Perspective. SAE Technical Paper Series SAE-830520.

CATON 1996

Caton, P.: Meeting customer requirements with magnesium diecastings. In: N.N.: Towards 2000: The Inst. Of British Foundrymen's 93rd annual Conf. Castcon '96, Blackrod. Alvechurch: IBF Inst. Of British Foundrymen 1996, S. 301, 303-310.

CHEN & ROTH 1992

Chen, G.; Roth, G.: Streckenenergie und Leistungsintensität - Schlüsselfaktoren beim Laserstrahlschweißen von Aluminium und Stahl im Dauerbetrieb. Schweißen & Schneiden 44(1992)10, S. 553-559.

CLOW 1998

Clow, B.: Global Supply/Demand Outlook for Magnesium. In: Klein, F. (Hrsg.): 6. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar 1998, Aalen.

DANZER & LEHNER 1997

Danzer, W.; Lehner, C.: Fügen von Magnesium. In: Klein, F.: 5. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar, Aalen. Aalen: FH Aalen 1997.

DANZER 1998

Danzer, W.: Besonderheiten beim Schweißen von Magnesium im Vergleich zu Aluminium. In: Klein, F. (Hrsg.): 6. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar 1998, Aalen.

DANZER 1999

Danzer, W.: Abschlussbericht MADICA. Abschlussveranstaltung zum MADICA-Verbundprojekt am 1./2.12.1999 an der FH Aalen, S.116-154.

DARGUSCH 1998

Dargusch, G.L.: Elevated Temperature Creep and Microstructure of Die Cast Mg-Al-Alloys. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 277-282.

DILTHEY 1999

Dilthey, U.: Vorwort. In: Dilthey, U.: 6. Aachener Schweißtechnik Kolloquium: Fügen zukunftsweisender Werkstoffe, Aachen. Aachen: Shaker 1999, S.III.

DILTHEY U.A. 1999

Dilthey, U.; Brandenburg, A.; Träger, G.; Haferkamp, H.; Niemeyer, M.: Laser- und Elektronenstrahlschweißen von Magnesiumwerkstoffen. In: Dilthey, U.: 6. Aachener Schweißtechnik Kolloquium: Fügen zukunftsweisender Werkstoffe, Aachen. Aachen: Shaker 1999, S. 81-98.

DILTHEY 2000

Dilthey, U. (Hrsg.): Laserstrahlschweißen – Prozesse, Werkstoffe, Fertigung und Prüfung. Handbuch zum BMBF-Projektverbund „Qualifizierung von Laserverfahren“ im Rahmen des Förderkonzeptes LASER 2000. Düsseldorf: DVS-Verlag 2000. (Fachbuchreihe Schweißtechnik)

DIN 8528-1

DIN 8528, Teil 1: Schweißbarkeit - metallische Werkstoffe, Begriffe. Berlin: Beuth 1973.

DIN 8580

DIN 8580, Teil 0: Fertigungsverfahren; Einteilung. Berlin: Beuth 1985.

DIN 8593

DIN 8593, Teil 0: Fertigungsverfahren Fügen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 1985.

DIN 8593-6

DIN 8593, Teil 6: Fertigungsverfahren Fügen; Fügen durch Schweißen; Einordnung, Unterteilung. Berlin: Beuth 1985.

DIN EN 60068-2-11

DIN 60068, Teil 2-11: Umweltprüfungen. Teil 2: Prüfungen-Prüfung – Ka: Salznebel. Berlin: Beuth 1999.

DIN EN 60825-1

DIN EN 60825, Teil 1: Sicherheit von Laser-Einrichtungen; Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien". Berlin: Beuth 1995.

DIN EN 10002-1

DIN En 10002, Teil 1: Metallische Werkstoff; Zugversuch; Teil 1: Prüfverfahren (bei Raumtemperatur). Berlin: Beuth 1991.

DIN EN ISO 11145

DIN EN ISO 11145: Laser und Laseranlagen. Begriffe und Formelzeichen. Berlin: Beuth 1995.

DIN EN ISO 9956-11

DIN EN ISO 9956, Teil 11: Anforderungen und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe. Berlin: Beuth 1996.

DOBENECK 1997

von Dobeneck, D.: Schnelle Elektronenstrahl-Schweißanlagen als günstige Alternative zu Laser-Schweißmaschinen. Maschinenmarkt 7 (1997), S. 30-33.

DRAUGELATES U.A. 1996A

Draugelates, U.; Bouaifi, B.; Bartzsch, J.: Schweißtechnische Verarbeitung von Feinblechwerkstoffen aus Magnesium. In: Zenner, H.: Leichtbau durch innovative Fertigungsverfahren, Berlin. Berlin: DVM-Verlag 1996, S. 41-50. (DVM-Bericht 122)

DRAUGELATES U.A. 1996B

Draugelates, U.; Bouaifi, B.; Bartzsch, J.: Verarbeitung neuzeitlicher Magnesiumwerkstoffe. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 1996, HFF-Bericht Nr. 13, S. 203-220.

DRAUGELATES U.A. 1997

Draugelates, U.; Bouaifi, B.; Bartzsch, J.; Ouaisa, B.; Brozek, J.: Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre von Magnesiumlegierungen. In: Klein, F.: 5. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar, Aalen. Aalen: FH Aalen 1997.

DRAUGELATES U.A. 1998

Draugelates, A.; Schram, B.; Bouaifi, B.; Kettler, C.: Joining Technologies for Magnesium Alloys. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 29-35.

DRAUGELATES U.A. 1998A

Draugelates, U.; Bouaifi, B.; Bartzsch, J.; Ouaisa, B.: Properties of Non Vacuum Electron Beam Welds of Magnesium Alloys. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 601-606.

DRAUGELATES U.A. 1998C

Draugelates, U.; Schram, A.; Kettler, C.: Laserstrahlschweißen und Reibschweißen von Magnesiumlegierungen. In: Schweißen und Schneiden'98, Hamburg 1998. Düsseldorf: DVS-Verlag 1998, S. 129-135. (DVS-Bericht 194)

DREYER 1998

Dreyer, H.: Den Aufwand begrenzen. Erforderliche Stichprobenumfänge in faktoriellen Versuchsplänen. Qualität und Zuverlässigkeit 43 (1998) 5, S.582-S.583.

EMLEY 1957

Emley, E.F.: The Metallurgical Background to Magnesium Alloy Welding. British Welding Journal (1957) 7, S. 307-321.

EMLEY 1966

Emley, E.F.: Principles of Magnesium Technology. Pergamon Press 1966.

FISCHER 1999

Fischer, G.: Magnesiumprofile: Die Leichtbaulösung. In: Woydt, M.; Ebert, F. (Hrsg.): "Fortschritte mit Magnesium im Automobilbau", Bad Nauheim 11./12.2.1999. Berlin: tci-Verlag 1999, S. 69-98.

FRIEDRICH & SEBASTIAN 1997

Friedrich, H.; Sebastian, W.: Umweltaspekte im Automobilbau. Einsatz von Magnesium zur Minderung des Fahrzeuggewichts. UWF Umweltwirtschaftsforum 5 (1997) 2, S. 50-53.

FRITZ U.A. 1989

Fritz, D.; Lachner, R.; Kloss, I.; Thüne, K.; Rudolph, L.: Elektronenstrahl-Schweißen für Werkstücke in Großserien. Werkstatt und Betrieb 122 (1989) 11, S. 957-960.

FÜGETECHNIK 1987

N.N.: Fügetechnik - Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS-Verlag 1987.

GALUN 1998

Galun, R.: Werkstoffkundliche Untersuchungen zur Laserstrahloberflächenbearbeitung und zum Laserstrahlschweißen von Magnesiumbasiswerkstoffen. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 1998.

GALUN U.A. 1997

Galun, R.; Weisheit, A.; Mordike, B.: Schweißen von Magnesiumlegierungen mit einem CO₂-Laser. Schweißen & Schneiden 49 (1997) 10, S. 784-787.

GEIGER & LUTZ 1995

Geiger, M.; Lutz, N.: Lasertechnologie für die Fabrik 2000. In: Geiger, M.: Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Bamberg: Meisenbach 1995, S. 3-12.

GEISER 1978

Geiser, W. (Hrsg.): Fertigungstechnik II. 3. Aufl. Hamburg: Handwerk und Technik Verlag 1978.

GUV 2.20

GUV 2.20: Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung (VGB 93). Köln Carl Heynemanns 1987.

HAFERKAMP U.A. 1997A

Haferkamp, H.; Bach, Fr.-W.; Burmester, I.; Höfemann, M.; Niemeyer, M.; Kreutzburg, K.: Laserstrahlfügen von innovativen Werkstoffen für die Automobilindustrie. Bänder-Bleche-Rohre (1997) 3, S. 28-35.

HAFERKAMP U.A. 1997B

Haferkamp, H.; Bach, Fr.-W.; Burmester, I.; Kreutzburg, K.; Niemeyer, M.: Nd:YAG Laser Beam Welding of Magnesium Constructions. In: Lorimer, G.W.: Proceedings of the Third International Magnesium Conference, Manchester. London: The Institute of Materials 1997, S. 89-97.

HAFERKAMP U.A. 1997C

Haferkamp, H.; von Alvensleben, I.; Burmester, I.; Niemeyer, M.: The Characteristics of Laser Beam Welded Magnesium Alloys. In: N.N.: Proceedings of the Laser Materials Processing Conference ICALEO '97. Laser Institute of America 1997, S.140G-149G.

HAFERKAMP U.A. 1997D

Haferkamp, H.; Burmester, I.; Niemeyer, M.; Doege, E.; Dröder, K.: Innovative Production Technologies for Magnesium Light-Weight Constructions - Laser Beam Welding and Sheet Metall Forming. In: N.N.: ISATA, 30th International Symposium on Automotive Technologies. 1997.

HAFERKAMP U.A. 1998A

Haferkamp, H.; Diltthey, G.; Träger, G.; Burmester, I.; Niemeyer, M.: Beam Welding of Magnesium Alloys. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 595-600.

HAFERKAMP U.A. 1998B

Haferkamp, H.; Niemeyer, M.; Diltthey, U., Träger, G.: Ermittlung der Eigenschaften laser- und elektronenstrahlgeschweißter Magnesium-Druckgußverbindungen. Schlußbericht zum AIF-Vorhaben Nr. 10727 N. Hannover, Aachen 1998.

HALDENWANGER 1997

Haldenwanger, H.-G.: Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarrosserien. Dissertation TU Dresden 1997.

HENNEMANN U.A. 1996

Hennemann, O.D.; Bischoff, J.; Budde, L.: Fügetechnologien als Grundlage für den innovativen Leichtbau. Bänder Bleche Rohre 37 (1996) 9, S. 14, 17-18, 21-22.

HERTEL 1960

Hertel, H.: Leichtbau. Berlin: Springer 1960.

HONGPING&DULEY 1998

Hongping, G.; Duley, W.W.: Performance of tilted laser beam welding of dissimilar steel sheets. Proceedings of the 17th International Congress on applications of Lasers & Electro Optics (ICALEO'98), Orlando, FL, 1998, S. F11-F17.

HÜGEL 1992

Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart: B.G. Teubner 1992.

HYDRO 1998A

N.N.: Machining Magnesium. Firmenbroschüre Hydro Magnesium, Mai 1998.

HYDRO 1998B

N.N.: Datenblatt Magnesium-Druckgußlegierungen. Firmenbroschüre Hydro Magnesium, September 1998.

IVANOV & ZULIN 1976

Ivanov, V.Ya.; Zhulin, A.I.: The Electron-Beam-Welding of Magnesium Alloy MA2-1. Svar. Proiz. (1976)1, S.15-16.

JÜTTNER U.A. 1998

Jüttner, S.; Wohlfahrt, H.; Thomas, K.: Aktueller Stand der Schutzgasschweißtechnik von Magnesiumlegierungen. In: Schweißen und Schneiden'98, Hamburg 1998. Düsseldorf: DVS-Verlag 1998, S. 129-135. (DVS-Bericht 194)

KAMMER 1998

Kammer, C. (Hrsg.): Aluminium-Taschenbuch. Band 1: Grundlagen und Werkstoffe. 15. Aufl. 1. Überarbeitete Ausgabe. Düsseldorf: Aluminium-Verlag 1998.

KASCHNITZ & FUNK 1997A

Kaschnitz; Funk: Thermophysikalische Eigenschaften von Magnesiumlegierungen - Teil 1: Wärmeleitfähigkeit. Gießerei-Praxis (1997) 7/8, S.179-181.

KASCHNITZ & FUNK 1997B

Kaschnitz; Funk: Thermophysikalische Eigenschaften von Magnesiumlegierungen - Teil 2: Thermische Längenänderung und Dichte. Gießerei-Praxis (1997) 9/10, S.199-200.

KASCHNITZ & FUNK 1997C

Kaschnitz; Funk: Thermophysikalische Eigenschaften von Magnesiumlegierungen - Teil 3: Spezifische Wärmekapazität. Gießerei-Praxis (1997) 11/12, S.393-403.

KATO & TOKISUE 1994

Kato, K.; Tokisue, H.: Friction Welding of magnesium alloys. Welding International 8(1994)6, S. 452-457.

KATO U.A. 1997

Kato, K.; Asahina, T.; Tokisue, H.: Mechanical Properties of Friction Welded Joints of AZ31 Magnesium Alloy. In: N.N.: Proceedings of the Seventh (1997) International Offshore and polar Engineering Conference 1997, Honolulu. USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers 1997, S. 37-43.

KEARNS 1982

Kearns, W.H. (Hrsg.): AWS: Welding Handbook Vol. 4: Metals and their Weldability. Seventh Edition. Miami, FL: Americam Welding Society 1982.

KING 1998

King, J.F.: Development of Magnesium Diecasting Alloys. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 37-61.

KLEIN 1992

Klein, F.: Magnesium Alloys and their Applications. In: Proc. Int. Conf., Garmisch-Partenkirchen. DGM-Informationsgesellschaft 1992, S. 53-60.

KLOCKE & FRITSCH 1998

Klocke, F.; Fritsch, R.: Fortschrittliche Magnesiumbearbeitung am Beispiel des Fräsens und der Gewindefertigung. In: Klein, F. (Hrsg.): 6. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar 1998, Aalen.

KOPP 1996

Kopp, J.: Magnesium im Automobilbau: Korrosionserscheinungen an Karosseriebauteilen aus Magnesium verursacht durch legierungs- und verfahrensbedingte Fremdmetallverunreinigungen sowie lokal unterschiedlicher Gefügestände. Dissertation Univ. Erlangen-Nürnberg 1996.

KRAFT 1971

Kraft, K.: Fertigungstechnik II: Urformen. Berlin: VEB 1971.

KROHN & SINGH 1998

Krohn, H.; Singh, S.: Welding of Magnesium Alloys. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 625-626.

KROHN 1998

Krohn, H.: Festigkeits- und Korrosionsuntersuchungen an Magnesiumlegierungen in Abhängigkeit vom Schweißverfahren. Schlussbericht zum AIF-Vorhaben 10331 N, SLV Berlin-Brandenburg GmbH, Berlin 1998.

LEHNER U.A. 1999

Lehner, C.; Reinhart, G.; Schaller, L.: Welding of die-casted magnesium alloys for production. Journal of Laser Applications 11 (1999) 5, S. 206-216.

LEHRHEUER & LISON 1975

Lehrheuer, W.; Lison, R.: Stand und Entwicklungstendenzen des Schweißens und Lötens von Magnesium, Beryllium und ihren Legierungen. Schweißen & Schneiden 27 (1975) 9, S. 371-373.

LEIBINGER 1997

Leibinger, B.: Der Laser in der Fertigungstechnik - Geschichte und Perspektiven eines innovativen Produktes. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Münchener Kolloquium '97: Mit Schwung zum Aufschwung, München. Landsberg/Lech: moderne industrie 1997, S. 81-101.

LEONG U.A. 1998

Leong, K.H.; Kornecki, G.; Sanders, P.G.; Keske, J.S.: Laser Beam Welding of AZ31B-H24 Magnesium Alloy. Proceedings of the 17th International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics (ICALEO'98), Orlando, FL, 1998, S. F28-F36.

LINDL U.A. 1995

Lindl, H.; Pischetsrieder, A.; Trunzer, W.: Laserschweißen von Magnesiumlegierungen. In: Klein, F.: 3. Abnehmerseminar Magnesiumguß 1995, Aalen. Aalen Europäische Forschungsgemeinschaft Magnesiumguß 1995.

MAYER U.A. 1996

Mayer, C.; Fouquet, F.; Robin, M.: Laser welding of Aluminium-Magnesium alloys sheets - Process optimization and welds characterization. Materials Science Forum (1996) 217-222, S. 1679-1684.

MATZEIT 1996

Matzeit, R.-A.: Laserstrahl- und Elektronenstrahlschweißen. Konstruktive Gestaltung und Auslegung von Bauelementen unter Berücksichtigung verfahrenstechnologischer Aspekte. Aachen: Shaker 1996.

METALL 1994

N.N.: Weltproduktion von Magnesium. Metall 48 (1994) 6, S. 42.

MEZOFF 1980

Mezoff, J.G.: Magnesium for Automobiles, In Perspective. SAE800417. Society of Automotive Engineers 1980.

MILBERG 1997

Milberg, J.: Produktion - Eine treibende Kraft für unsere Volkswirtschaft. In: Milberg, J. (Hrsg.); Reinhart, G. (Hrsg.): Mit Schwung zum Aufschwung: Information - Inspiration - Innovation / Münchener Kolloquium '97, München. Landsberg/Lech: mi, Verl. Moderne Industrie 1997, S. 17-30.

MODDE 1999

N.N.: Handbuch zur Software Modde 4.0. Umetri S.A. 1999.

NENTWIG U.A. 1998

Nentwig, A.; Cramer, H.; Baum, L.: Schmelz- und Reibschweißen von Magnesium-Guss- und Knetwerkstoffen. In: N.N.: Dünnblechverarbeitung. Neues zum Schweißen von Leichtbauwerkstoffen, Erding. München: SLV 1998, S. 125, 127-135.

NIEMANN 1980

Niemann, G.: Maschinenelemente. Band I Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 2. Aufl.. Berlin: Springer 1980.

NIEMEYER 1999

Niemeyer, M.: Strahl-Stoff-Wechselwirkung und resultierende Verbindungseigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

NÖRENBERG & RUGE 1992

Nörenberg, K.; Ruge, J.: Untersuchung der Wasserstofffreisetzung verschiedener Aluminiumwerkstoffe beim Aufschmelzen unter besonderer Berücksichtigung der Schweißbarkeit von Aluminium-Druckguß. Giesserei 79 (1992) 5, S. 180-186.

PFEIFER 1993

Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement - Strategien - Methoden - Techniken. München: Hanser 1993.

POHL & SCHULTZ 1997

Pohl, T. Schultz, M.: Laser beam welding of aluminium alloys for light weight structures using CO₂- and Nd:YAG-Laser systems. In: Geiger, M., Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net shape Engineering 2. Proceedings of the LANE'97. Meisenbach, Bamberg, 1997, S. 181-192.

POPRAWÉ & BEHLER 1997

Poprawe, R.; Behler, K.: Funktionsangepaßte Konstruktionen für das Laserstrahlschweißen im Karosseriebau. In: N.N.: Dünnblechverarbeitung. Weiterentwicklungen in der Schweißtechnik. Schwerpunkt Fahrzeugbau, Erding. München: SLV 1997, S. 191-204.

POPRAWÉ U.A. 1998

Poprawe, R.; Loosen, P.; Petring, D.; Ehrhard, A.: New Lasers for New Applications. In: Mordike, B.: ECLAT-European Conference on Laser Treatment of Materials, Hannover. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 11-19.

POPRAWÉ 2000

Poprawe, R.: Eröffnung und Einführung. In: Poprawe, R.: AKL'2000, Aachener Laserkolloquium für Lasertechnik, Aachen. Aachen: ILT 2000, S. 17-22.

RADAJ 1993A

Radaj, D. u. a. (Hrsg.): Handbuch für Konstrukteure. In: Radaj, D. u. a.: Laserschweißgerechtes Konstruieren - Beiträge zu innovativen Fertigungsverfahren. Stuttgart: Daimler-Benz AG 1993, S. 41-157.

RADAJ 1993B

Radaj, D.: Forschungsprojekt zum laserschweißgerechten Konstruieren. In: Radaj, D. u. a.: Laserschweißgerechtes Konstruieren - Beiträge zu innovativen Fertigungsverfahren. Stuttgart: Daimler-Benz AG 1993, S. 3-11.

RADAJ 1994

Radaj, D.: Laserschweißgerechtes Konstruieren: Beiträge zu innovativen Fertigungsverfahren. Düsseldorf: DVS 1994.

REEK 2000

Reek, A.: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahl-schweißen. Dissertation TU München 2000.

REINHART U.A. 1995

Reinhart G.; Pischetsrieder, A.; Meier, H.: Integration von Sensorik zur Qualifizierung der Lasertechnik. In: Präzisionslaserstrahl-fertigungstechnik für den Maschinenbau. Ergebnisbericht zum 1. Forschungsjahr 1994-1995. München: Bayerische Forschungs-stiftung, S. 61-78.

REINHART & LEHNER 1997

Reinhart, G.; Lehner, C.: Optimieren von Fügeverfahren für Magnesiumlegierungen. Maschinenmarkt 103 (1997) 26, S. 32 – 35.

REINHART 1997

Reinhart, G.: Mit Schwung zum Aufschwung - Kreatives Agieren statt optimierendes Reagieren. In: Milberg, J. (Hrsg.); Reinhart, G. (Hrsg.): Mit Schwung zum Aufschwung: Information - Inspiration - Innovation / Münchener Kolloquium '97, München. Landsberg / Lech: mi, Verl. Moderne Industrie 1997, S. 9-16.

REINHART U.A. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement. Berlin: Springer 1996.

REINHART U.A. 1997

Reinhart, G.; Lehner, C.; Pischetsrieder, A.: Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen. In: Frieling, E.; Martin, H.; Tikal, F.: Neue Ansätze für innovative Produktionsprozesse; 1. Kasseler Kolloquium 1997, Kassel. Kassel: university press 1997, S. 385-392.

REINHART U.A. 1998

Reinhart, G.; Lehner, C.; Schaller, L.: Welding of Die-Casted Magnesium Alloys on Production Machines. Proceedings of the 17th International Congress on applications of Lasers & Electro Optics (ICALEO'98), Orlando, FL, 1998, S. F18-F27.

REINHART U.A. 1999A

Reinhart, G.; Lehner, C.; v. Dobeneck, D.; Vogeley, C.: Fügen von Magnesiumdruckguß. VDI-Berichte 1469, 1999. Düsseldorf VDI-Verlag, 1999, S.323-343.

REINHART U.A. 1999B

Reinhart, G.; Lehner, C.; v. Dobeneck, D.; Vogeley, C.: Fügeverfahren für Magnesiumdruckguß. In: Woydt, M.; Ebert, F. (Hrsg.): "Fortschritte mit Magnesium im Automobilbau", Bad Nauheim 11./12.2.1999. Berlin: tci-Verlag 1999, S. 100-116.

RETZLAFF U.A. 1975

Retzlaff, G.; Rust, G.; Waibel, J.: Statistische Versuchsplanung. Weinheim: Verlag Chemie 1975.

RICK 1998

Rick, F.: Lasergerechte Konstruktion.: In: Milberg, J.; Reinhart, G. (Hrsg.): Laser in der Produktion – Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz. München: Utz 1998. (iwb – Seminarberichte; 34)

RIENAß 1999

Rienaß, G.: Neueste Magnesiumanwendungen im Automobilbau. In: Woydt, M.; Ebert, F. (Hrsg.): "Fortschritte mit Magnesium im Automobilbau", Bad Nauheim 11./12.2.1999. Berlin: tci-Verlag 1999, S. 23-68.

ROBERTS 1960

Roberts, C.S.: Magnesium and its alloys. New York: John Wiley & Sons Inc. 1960.

RUDEN 1991

Ruden, T.: Magnesium contra Kunststoff - ein Vergleich. Giesserei-Praxis (1991)4. S. 58-65.

RUGE 1985

Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik Band III: Konstruktive Gestaltung der Bauteile. Berlin: Springer 1985.

RYAZANTSEV 1991

Ryazantsev, V.I.: Weldability of new aluminium and magnesium alloys. Paton Welding Journal 3 (1991) 7, S. 521-523.

SAKKINEN 1994

Sakkinen, D.J.: Physical Metallurgy of Magnesium Die Cast Alloys. SAE Technical Paper 940779, 1994.

SANNES & WESTENGEN 1998

Sannes, S.; Westengen, H.: The Influence of Process Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Die Castings. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 223-228.

SCHUHMANN 1991

Schuhmann, H.: Metallographie. 13. Aufl.. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1991.

SCHULZE & SCHUBERT 1994

Schulze, K.-R.; Schubert, G.: Elektronenstrahlschweißen unter Atmosphärendruck. Schweißen und Schneiden 46 (1994) 12, S. 618-622.

SCHUMANN & FRIEDRICH 1998

Schumann, S.; Friedrich, F.: The use of Magnesium in Cars - Today and in Future. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 3-13.

SEPOLD U.A. 1998

Sepold, G.; Schubert, E.; Weise, S.: Softwareentwicklung zur statistischen Versuchsplanung beim Laserstrahlschweißen. Schweißen und Schneiden 50 (1998) 4, S. 229-234.

SLAVIN U.A. 1991

Slavin, G.A.; Ryazantsev, V.; Ovchinnikov, V.: New technology and equipment for arc welding structures of aluminium and magnesium alloys. Paton Welding Journal 3 (1991) 7, S. 540-542.

SPENHOFF 1991

Spenhoff, E.: Prozeßsicherheit durch statistische Versuchsplanung in Forschung, Entwicklung und Produktion. München: gmft 1991.

STOLBOV U.A. 1991

Stolbov, V.I., Eltsov, V.V.; Oleinik, I.A.; Matyagin, V.F.: Effect of the nature of thermal processes on cracking in repair welding components of magnesium alloys. Welding International 5 (1991) 10, S. 799-802.

TIKAL U.A. 1997

Tikal, F.; Vollmer, C.; Zeißler, M.: Magnesium - Werkstoff der Zukunft. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 28 (1997) 6, S. 276-279.

TRUNZER 1996

Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren. Berlin: Springer 1996.

VDI 2263

VDI 2263: Staubbrände und Staubexplosionen. Berlin: Beuth 1992.

VDMA 1999

N.N.: Laser für die Materialbearbeitung. 4. Aufl. Frankfurt: VDMA Verlag 1999.

VGB 1

VGB 1: Unfallverhütungsvorschriften UVV – Allgemeine Vorschriften (VGB1). Köln: Carl Heynemanns 1998.

VGB 15

VGB 15: Unfallverhütungsvorschrift Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren. Köln: Carl Heynemanns 1993

VOGELEI & DOBENECK 1998

Vogelei, C.; v. Dobeneck, D.: Elektronenstrahlschweißen von Magnesiumgußlegierungen. In: Klein, F. (Hrsg.): 6. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar 1998, Aalen.

WASSENHOVEN 1997

Wassenhoven, J.: Gefahren und Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Magnesium in metallverarbeitenden Betrieben. Moderne Unfallverhütung (1997) 41, S. 78-84.

WEULE 1992

Weule, H.: Wie setzen sich Innovationen durch? - Die Mechanismen des technischen Fortschritts. Technische Rundschau (Bern) 84 (1992) 13, S.28-34.

WINNAKER U.A. 1981

Winnaker, K.; Küchler; Harnisch, H. (Hrsg.) : Metalle. 4. Auflage. München: Carl Hanser, 1981. (Chemische Technologie Band 4)

WOHLFAHRT & JÜTTNER 1998

Wohlfahrt, H., Jüttner, S.: Arc Welding of Magnesium Alloys. In: Mordike, B., Kaiser, K.U.: Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998, S. 589-594.

WOLTER 1997

Wolter, H.-J.: Verbundprojekt MADICA - Sichere Fertigungsprozesse für Magnesium-Druckguß-Anwendungen. wt-Produktion und Management 87 (1997), S. 65.

ZOPF 1995

Zopf, P.: Bauteilgestaltung für das Schweißen mit Festkörperlaser. München: Hanser 1995.

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibler automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wiba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht forms stabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelman, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zettlmeier, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindt, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanner, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in
mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgel leitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 Innovative Montagesysteme · Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell · Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen · Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation · Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser · von der Planung zur Anwendung
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement · der Weg ist das Ziel
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Analysen und Konzepte
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation · Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation · Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe · Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market · Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis · Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet · Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik · mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen · Plug & Play · Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping · Rapid Tooling · Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion · Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik · Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme · Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Abschlußseminar
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 3D-CAD · Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion · Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation · Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung · Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit · Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping · Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling · Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken · Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion · Ablaufsimulation
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6

- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößner, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
 lieferbar ab ca. 08/01
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
 lieferbar ab ca. 08/01
- 150 Böhl, Jörg
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
 lieferbar ab ca. 08/01
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
 lieferbar ab ca. 09/01