

284

Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Laserstrahlschweißen von CF RTP

Stefan Berger

284

Berger

**Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht**

ISSN 1431-6226
ISBN 978-3-87525-408-2

 **Meisenbach**
GmbH Verlag

Stefan Berger

*Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaser-
verbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht*

Stefan Berger

*Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaser-
verbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht*

Bericht aus dem Lehrstuhl für Photonische Technologien
Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 09. Dezember 2015
Tag der Promotion: 23. Mai 2016
Dekan: Prof. Dr. Peter Greil
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Gude, TU Dresden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1431-6226
ISBN 978-3-87525-408-2

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2016
Herstellung: Druckerei Eugen Seubert GmbH, Nürnberg
Printed in Germany

**Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe
mit spezifischem Zusatzdraht**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.
vorgelegt von

Stefan Berger aus Oberschneiding

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	23.05.2016
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. Dr. P. Greil
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt Prof. Dr.-Ing. habil. M. Gude

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungs- und Innovationszentrum der BMW AG in München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt für die fachliche Betreuung dieser Arbeit sowie die konstruktiven Diskussionen die erheblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein großes Dankeschön gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude für die Übernahme des Koreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern des Bayerischen Laserzentrums, des Lehrstuhls für Photonische Technologien sowie allen Studenten die mich bei der Erstellung dieser Arbeit tatkräftig unterstützt haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Florian Oefele für die fachliche und disziplinarische Betreuung dieser Arbeit bei der BMW AG sowie für das entgegengebrachte Vertrauen und die fortwährende Diskussionsbereitschaft. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen für das sehr kooperative und kollegiale Umfeld bedanken. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Fabian Fischer und Herrn Dr.-Ing. Christian Roos für die fortwährende Diskussionsbereitschaft und Motivation.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Familie, meinen Freunden und ganz im Besonderen meiner Freundin Maria für die unermüdliche Motivation und Unterstützung.

München, den 07.06.2016

Stefan Berger

„Neue Herausforderungen erfordern neue Wege“

Gottfried Niebaum

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen.....	9
1 Einleitung.....	13
2 Stand der Technik und Forschung.....	15
2.1 Kohlenstofffaserverstärkte Thermoplaste.....	15
2.1.1 Aufbau und Eigenschaften.....	15
2.1.2 Halbzeugherstellung.....	18
2.1.3 Markt Betrachtung und industrielle Anwendung.....	19
2.2 Fügen thermoplastischer Kunststoffe mit Laserstrahlung.....	20
2.2.1 Definition und Einordnung des Fertigungsverfahrens.....	20
2.2.2 Strahlungserwärmung von Kunststoffen.....	21
2.2.3 Haftungsmechanismen von Schweißverbindungen.....	22
2.2.4 Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen.....	24
2.2.5 Laseranlagen für das Fügen von Kunststoffen.....	28
2.2.6 Einflussgrößen auf den Schweißprozess.....	32
2.2.7 Fügenahtqualität.....	37
2.2.8 Industrielle Anwendungen.....	38
2.3 Einsatz des Lasers zur Bearbeitung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe.....	39
3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	41
3.1 Ableitung des Handlungsbedarfs und Zielsetzung.....	41
3.2 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit.....	41
4 Verfahrensentwicklung und Versuchsdurchführung.....	45
4.1 Verfahrensentwicklung.....	45
4.2 Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff.....	46
4.2.1 Prozessbeschreibung.....	46
4.2.2 Systemtechnik.....	47
4.2.3 Ableitung und Auswahl der zu untersuchenden Einfluss- und Störgrößen.....	52
4.3 Versuchsplanung und -durchführung.....	53
4.3.1 Versuchswerkstoffe.....	53
4.3.2 Versuchsauswertung.....	55

5	Experimentelle Untersuchung.....	60
5.1	Werkstoffcharakterisierung.....	60
5.1.1	Optische Eigenschaften.....	60
5.1.2	Thermische Eigenschaften.....	63
5.1.3	Mechanische Eigenschaften.....	64
5.2	Einfluss der Prozessparameter.....	65
5.2.1	Einfluss des Energieeintrages.....	65
5.2.2	Einfluss der Strahlanstellung.....	70
5.2.3	Einfluss des Fokusdurchmessers.....	75
5.3	Einfluss der Systemparameter.....	77
5.3.1	Einfluss des Werkstofftyps.....	77
5.3.2	Einfluss des Zusatzwerkstoffs.....	81
5.3.3	Einfluss der Nahtgeometrie.....	87
5.3.4	Einfluss des Fügspalts.....	88
5.3.5	Einfluss der Oberflächenqualität.....	89
5.4	Synthese der Ergebnisse.....	91
6	Produktionstechnische Umsetzung.....	94
6.1	Bauteil- und Prozessgestaltungsrichtlinien.....	94
6.2	Technologische Bewertung.....	95
6.3	Wirtschaftliche Bewertung.....	99
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	102
8	Summary and future work.....	105
9	Literaturverzeichnis.....	107

Formelzeichen und Abkürzungen

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A	-	absorbierter Anteil der Strahlung
A_L	mm ²	Anbindungsfläche der Schweißnaht
A_O, A_U	mm ²	bestrahlte Werkstückoberfläche an Ober-/Unterblech
A_S	mm ²	bestrahlte Fläche
α	-	Absorptionskoeffizient
α_w	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
c_p	J/kgK	spezifische Wärmekapazität
D	m ² /s	Diffusionskoeffizient
D_{opt}	-	optische Dämpfungskonstante
d_A	mm	Apertur
d_B	mm	Blechdicke
$d_{c.b.}$	nm	mittlerer Rußpartikeldurchmesser
d_f	mm	Laserstrahldurchmesser im Fokus
d_k	µm	Faserkerndurchmesser
d_z	Mm	Durchmesser des Zusatzwerkstoffs
δ_{opt}	mm	optische Eindringtiefe
e	-	Eulersche Zahl
ε_{th}	-	thermischer Emissionskoeffizient
F_{max}	N	maximale Bruchkraft
f	mm	Brennweite
E_s	J/cm	Streckenenergie
ϑ	mol/m ³	Stoffmengenkonzentration
h	J/kg	spezifische Schmelzenthalpie
I	W/mm ²	Strahlungsintensität
κ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
l_s	mm	Schweißnahtlänge
λ	nm	Wellenlänge
M_{Fok}	-	Abbildungsfaktor der Fokussierung
M_{Koll}	-	Abbildungsfaktor der Kollimation
m	g	Masse
N	-	Anzahl der Versuche
n	-	Brechungsindex
p	N/mm ²	Fügedruck
P_L	W	Laserleistung
$\overline{P_M}$	W	Mittelwert der Laserleistung zur Beschreibung des Prozessfensters

Q	J	thermische Energie
σ	-	Standardabweichung
σ_A	N/mm ²	Zugscherfestigkeit
σ_l	N/cm	längenbezogene Bruchkraft der Fügeverbindung
R	-	(äußerer) reflektierter Anteil der Strahlung
R^*	-	(innerer) reflektierter Anteil der Strahlung
®	-	Registered Trade Mark
ρ	g/cm ³	Dichte
s	-	Schweißfaktor
T	-	transmittierter Anteil der Strahlung
T_G	°C	Glasübergangstemperatur
T_s	°C	Schmelztemperatur
T_z	°C	Zersetzungstemperatur
t	s	Zeit
t_{ww}	s	Wechselwirkungszeit
φ	Vol.-%	Faservolumengehalt
v_r	mm/s	Robotervorschubgeschwindigkeit
v_s	mm/s	Schweißgeschwindigkeit
v_z	mm/s	Zuführgeschwindigkeit des Zusatzwerkstoffs
ν	K/min	Heizrate
ϖ	Gew.-%	Massenanteil
x	mm	Weg
x_O, x_U	mm	Querschnitt der bestrahlten Werkstückoberflächen auf dem oberen/ unteren Fügepartner

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CCD	engl. charge-coupled device
CF	engl. carbon fibers
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CFRTP	Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
cw	continuous wave
DIN	Deutsche Industrienorm
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
DSC	Differential Scanning Calorimetry
engl.	englisch
etc.	lateinisch et cetera
Fa.	Firma
FVK	faserverstärkte Kunststoffe
HDL	Hochleistungsdiodenlaser
LA	laserabsorbierender Fügepartner
LFT	langfaserverstärkte Thermoplaste
LLK	Lichtleitkabel
LT	lasertransparenter Fügepartner
Nd:YAG	Neodym-Yttrium-Aluminium-Granat
Nd ³⁺	Neodym-Ionen
NIR	naher Infrarotbereich des elektromagnetischen Wellenspektrums
PA6	Polyamid 6
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PKW	Personenkraftwagen
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylsulfid
St.	Stück
therm.	thermisch
TWIST	Transmission Welding by an Incremental Scanning Technique
UV	ultravioletter Bereich des elektromagnetischen Wellenspektrums
vgl.	vergleiche

VIS	visueller Bereich des elektromagnetischen Wellenspektrums
Vol.-%	Volumenprozent
WEZ	Wärmeeinflusszone
Y ³⁺	Yttrium-Ionen
Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Yttrium-Aluminium-Granat
z. B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Die natürlichen Ressourcen an Rohstoffen und fossilen Energieträgern sind bekanntermaßen begrenzt. Dem steigenden Umweltbewusstsein und den politischen Forderungen nach Ressourceneffizienz wird sowohl in der Luft- und Raumfahrt, als auch in der Automobil- und Maschinenbauindustrie durch konsequenten Leichtbau Rechnung getragen [1]. Die industrielle Umsetzung des Leichtbaugedankens erfolgt durch unterschiedliche Ansätze. Nach Sobek [2] wird zwischen Werkstoff-, Struktur- und Systemleichtbau unterschieden. Während im Rahmen des *Werkstoffleichtbaus* versucht wird mittels Substitution spezifisch schwerer Werkstoffe durch spezifisch leichtere eine Gewichtsreduzierung zu erreichen, steht beim *Strukturleichtbau* die geometrische Gestaltung, also die Formoptimierung im Vordergrund. Der *Systemleichtbau* vereint durch Funktionsintegration die reine Konstruktion mit weiteren raumabschließenden, wärmetechnischen oder akustischen Funktionen. Diese funktionale Anpassung wird in einem technischen System durch die Modifikation der Wirkeigenschaften erreicht [3].

In den Fokus des Leichtbaus rücken zunehmend Kunststoffe. Bei hochbeanspruchten Bauteilen sind dies vor allem faserverstärkte Kunststoffe (FVK). Sie sind gegenüber Metallen leichter und dennoch sehr stabil. Wie eine repräsentative Studie des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS) zum Forschungsbedarf beim Fügen von Kunststoffen im Leichtbau und im Bereich der erneuerbaren Energien [4] zeigt, werden zukünftig neben den duroplastischen Faserverbundkunststoffen die thermoplastischen deutlich an Bedeutung gewinnen (Bild 1 links). Einer anderen Fragestellung zufolge besteht für die Fügetechnologien thermoplastischer Faserverbundkunststoffe noch deutlicher Forschungsbedarf (Bild 1 rechts), wobei den Verfahren Kleben und Schweißen das größte Potenzial zugeordnet wird. Besonders großes Potenzial hinsichtlich des Leichtbaus bieten kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Sie sind 60 Prozent leichter als Stahl und etwa 30 Prozent leichter als Aluminium [5]. Weitere Vorteile sind die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffs sowie die Eignung für crashrelevante Strukturen. Aus dem Flugzeugbau ist CFK bereits heute nicht mehr wegzudenken. Ein Beispiel dafür bietet der Airbus A350. Das moderne Passagierflugzeug besteht aktuell, gemessen am Strukturgewicht, zu über 50 % aus diesem Werkstoff [6]. Mit dem BMW i3 wird der Werkstoff erstmals in der Großserienproduktion des Automobilbaus eingesetzt [7]. Durch den Einsatz von CFK in der Fahrgastzelle wird der Konflikt zwischen Leichtbau und hohen Sicherheitsstandards bei der Elektrifizierung der Fahrzeuge gelöst [8].

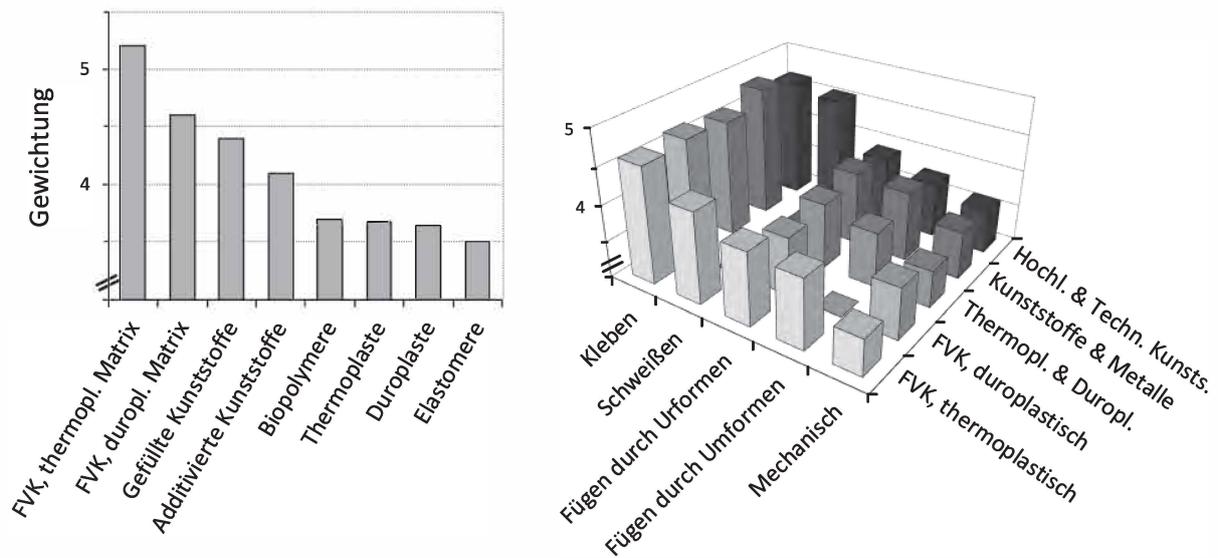


Bild 1: Werkstoffe, die in Zukunft bei Anwendungen im Leichtbau und im Bereich der erneuerbaren Energien an Bedeutung gewinnen werden (links) sowie der zugehörige Forschungsbedarf differenziert nach den entsprechenden Werkstoffkombinationen und Verbindungstechnologien (rechts) [4]

Die derzeit eingesetzten CFK-Werkstoffe basieren vorrangig auf duroplastischen Matrixsystemen, werden jedoch aufgrund des komplexen Herstellungsprozesses und den Herausforderungen hinsichtlich Wartungs-, Reparatur- und Recyclingfähigkeit zunehmend durch Werkstoffe mit thermoplastischer Matrix substituiert [9].

Der Einsatz der Lasertechnologie ist bereits jetzt nicht mehr aus dem Automobilbau wegzudenken [10]. Die neuen Werkstoffe und veränderten Fertigungstechnologien eröffnen zunehmend Einsatzszenarien für die Verwendung der Strahlwerkzeuge in der Automobilproduktion [11]. Das Laserstrahlfügen der thermoplastischen FVKs bietet durch die berührunglose und lokal begrenzte Energieeinbringung ein hohes Maß an Flexibilität, bei gleichzeitig geringer mechanischer und thermischer Belastung der Bauteile.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Kohlenstofffaserverstärkte Thermoplaste

2.1.1 Aufbau und Eigenschaften

Kohlenstofffaserverstärkte Thermoplaste (CFRTP¹) gehören zur Werkstoffklasse der Faserverbundwerkstoffe. Per Definition handelt es sich um makroskopisch, quasihomogene Werkstoffe, die aus zwei oder mehr ineinander nicht löslichen Komponenten (Phasen), einer bettenden Matrix sowie verstärkenden Fasern bestehen [12]. Ihre Werkstoffeigenschaften können die Einzelkomponenten alleine nicht erreichen. Durch die gezielte Kombination der Vorzüge unterschiedlicher Materialien bieten Verbundwerkstoffe den Schlüssel zu effizienten Leichtbauweisen. Sie finden mittlerweile in vielen Industriebereichen Einsatz und substituieren, bzw. ergänzen zunehmend klassische Konstruktionswerkstoffe, wie Stahl und Aluminium.

Gegenüber den derzeit marktdominierenden Faser-Kunststoff-Verbunden mit duroplastischer Matrix zeichnen sich CFRTPs durch eine Reihe von Vorteilen aus [13, 14]:

- Erhöhte Bruchdehnung der Matrix
- Verbessertes Impactverhalten durch hohes Energieaufnahmevermögen der Matrix
- Unbegrenzte Lagerfähigkeit der Halbzeuge
- Großserientaugliche Halbzeugherstellung mit geringen Taktzeiten
- Umspritzbarkeit der Faserverbundwerkstoffe
- Thermische Fügbarkeit
- Thermisch/mechanische Umformbarkeit der Halbzeuge
- Verbesserte Recyclingfähigkeit der Bauteile

Nachteilig zu erwähnen ist die geringere Festigkeit und Härte von Thermoplasten im Vergleich zu Duroplasten [15]. Aufgrund der fehlenden räumlichen Vernetzung neigen Thermoplaste stärker zum Kriechen [16] und weisen ein schlechteres Viskositätsverhalten auf [13]. Dies erschwert mitunter die Herstellung der Faserverbundwerkstoffe.

2.1.1.1 Thermoplastische Matrixsysteme

Unter einem Matrixsystem versteht sich allgemein eine feste Phase, in welche Fasern eingebettet werden. Nach der Verarbeitung entsteht so ein formstabiles Bauteil. Im Faser-Kunststoff-Verbund übernimmt die Matrix die Aufgaben [16, 17],

¹ Gebräuchlich ist die englische Abkürzung und steht für Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics.

- die Kräfte in die Fasern einzuleiten.
- die Kräfte von Faser zu Faser zu übertragen.
- die Bauteilgestalt zu sichern.
- die Kräfte entgegen der Faserlängsrichtung aufzunehmen.
- die Fasern vor Umgebungseinflüssen (z. B. chemischen Reagenzien, mechanischem Abrieb) zu schützen.

Die Auswahl des Matrixsystems beeinflusst entscheidend die mechanischen, thermischen und optischen Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe sowie die Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen. Die Matrix ist grundsätzlich das schwächste Glied im Verbund. Folglich sind die Auswahl eines geeigneten Matrixwerkstoffs und die Art der Verarbeitung mit großer Sorgfalt zu treffen.

Thermoplastische Matrices bestehen aus physikalisch untereinander gebundenen, linearen oder verzweigten Makromolekülen (Polymere). Die innere Gestalt der Kunststoffe wird unter dem Überbegriff der Morphologie zusammengefasst. Sie wird durch Wechselwirkungen der Moleküle untereinander, durch die Verarbeitung und durch die thermische Vorgeschichte der Kunststoffe beeinflusst [18]. Je nachdem, ob die Makromoleküle regelmäßig oder unregelmäßig zueinander liegen, wird zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten unterschieden (Bild 2).

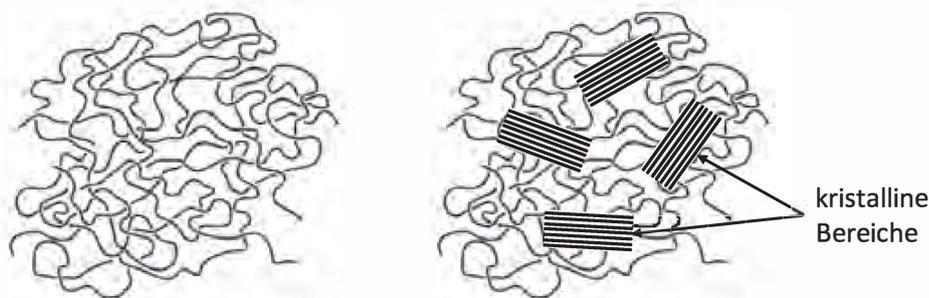


Bild 2: Amorphe (links) und teilkristalline (rechts) Anordnung der Makromoleküle von Thermoplasten (in Anlehnung an [19])

Der amorphe Gefügestand der Thermoplaste ist durch fehlende Fernordnung gekennzeichnet. Das heißt, in submikroskopischen Bereichen gibt es, bedingt durch die strukturelle Anordnung der einzelnen Ketten keinen gleichbleibenden Abstand und keine regelmäßige Anordnung und Orientierung der Makromoleküle [20]. Das Fehlen der Parallelausrichtung hat Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften. Bei amorphen Werkstoffen treten keine Änderungen der Brechungsindizes und keine diffuse Streuung innerhalb der Werkstoffe auf. Ungefüllte, homogene Thermoplaste im amorphen Gefügestand weisen eine hohe Transparenz für auftreffende Laserstrahlung auf. Pauschale Eigenschaftscharakteristika amorpher Kunststoffe sind, neben der bereits genannten Transparenz ein energieelastisches, sprödes Verformungsverhalten unterhalb und ein ausgeprägt duktiles, entropieelastisches Verhalten bei Temperaturen oberhalb ihrer

Glasübergangstemperatur T_G . Ihr linear thermischer Ausdehnungskoeffizient ist mit ca. $70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ geringer und ihr Formschrumpfung bei der Verarbeitung mit ca. 0,5 % kleiner als der teilkristalliner Kunststoffe. Der teilkristalline Gefügestand ist ein Zweiphasensystem, bestehend aus amorphen und teilkristallinen Bereichen. Die amorphen Bereiche, bestehend aus nicht ordnungsfähigen Molekülteilen, sind an den Oberflächen der Kristalllamellen, zwischen den Lamellen in den Sphäroliten und an deren Grenzflächen zu finden. Wegen der höheren Packungsdichte in den kristallinen Bereichen können zwischenmolekulare Bindungskräfte dort stärker ihre Wirkung entfalten. Makroskopisch äußert sich dies in höheren Festigkeits- und Modulwerten, jedoch auch in geringerer Verformbarkeit. Ein weiteres charakteristisches Merkmal von Kunststoffen mit teilkristalliner Struktur ist deren hoher Widerstand gegen Verschleißbeanspruchung. [21]

Thermoplaste besitzen charakteristische Eigenschaften und Verhaltensweisen, die sie von anderen Werkstoffklassen deutlich unterscheiden. Bedingt durch die geringe Masse der Atome, die ihre Moleküle bilden, weisen sie gegenüber anderen Werkstoffen eine niedrigere Dichte auf, die innerhalb der Kunststoffe nur in geringem Maße ($\rho = 0,9$ bis $1,5 \text{ g/cm}^3$) variiert. Da die Makromoleküle nur in Teilbereichen schwingungsfähig sind, handelt es sich bei Thermoplasten um schlechte Wärmeleiter. Ebenfalls auf den molekularen Aufbau zurückzuführen sind die geringeren Festigkeiten im Vergleich zu Metallen.

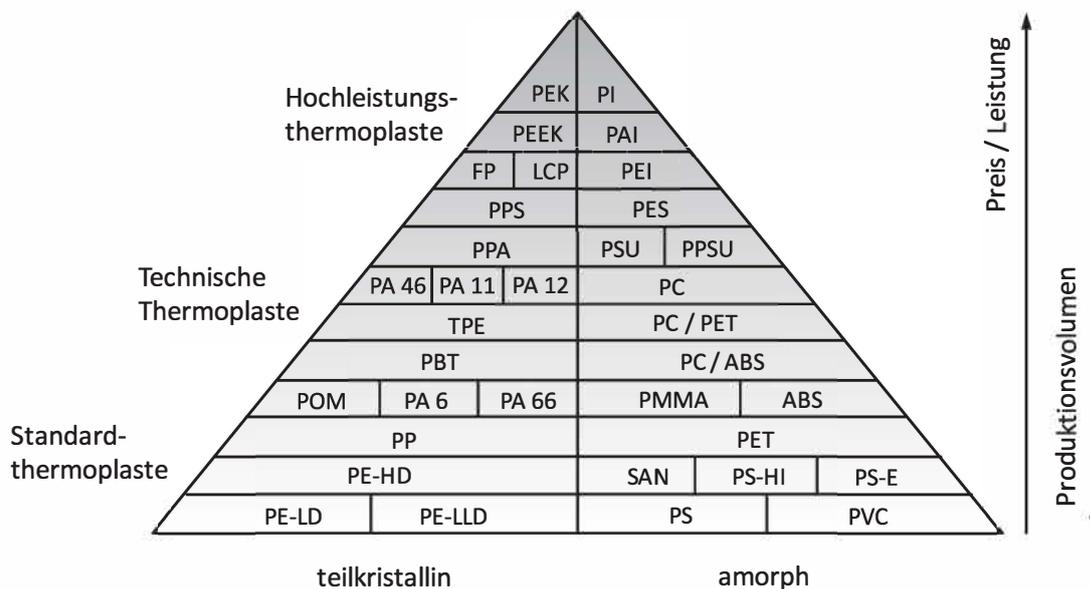


Bild 3: Kunststoffpyramide zur Einteilung der thermoplastischen Polymere nach Preis/Leistung bzw. Produktionsvolumen [22]

Der Markt bietet eine Vielzahl an Thermoplasten, die sich deutlich hinsichtlich ihrer mechanischen-, thermischen- und chemischen Eigenschaften unterscheiden. Eine übersichtliche Einteilung bietet die in Bild 3 dargestellte Kunststoffpyramide nach Kaiser [22]. Die Thermoplaste

werden in Standard-, Technische- und Hochleistungsthermoplaste unterteilt und nach den Kriterien Preis/Leistung bzw. Produktionsvolumen angeordnet.

2.1.1.2 Verstärkungsfasern

Industrielle Bedeutung als Verstärkungsfasern für faserverstärkte Thermoplastlamine haben vor allem Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern. Allen Verstärkungsfasern gemein ist, dass die Steifigkeit, Festigkeit und Wärmebeständigkeit deutlich über den entsprechenden Werten der Matrixpolymere liegen. Kohlenstofffasern bieten die höchste spezifische Festigkeit. Sie werden deshalb bevorzugt für Strukturbauteile in der Automobil- und Luftfahrtindustrie eingesetzt.

Die Verstärkungsfasern werden anhand der Faserlänge im Bauteil voneinander unterschieden. Nach Obermann [23] wird zwischen Kurz-, Lang- und Endlosfaserverstärkung unterschieden (Bild 4). Endlosfaserverstärkte Thermoplaste werden in der Literatur auch als Organobleche bezeichnet [24, 25].

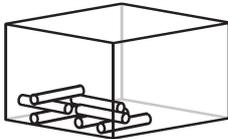
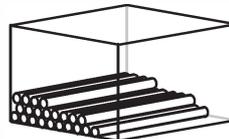
	Kurzfaserverstärkung	Langfaserverstärkung	Endlosfaserverstärkung
Faserlänge	< 2 mm	2 - 50 mm	Bauteillänge
Faserorientierung im Bauteil			

Bild 4: Einteilung der Faserverstärkung anhand der resultierenden Faserlänge im Bauteil

Kurzfaserverstärkte Thermoplaste besitzen eine Faserlänge von unter 2 mm. Die Faserorientierung im Bauteil liegt in dreidimensionaler Form vor. Als Halbzeuge werden Granulate eingesetzt, die durch Spritzguss, Extrusion oder Blasformung verarbeitet werden können. Die Fasern in langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) hingegen sind im Bauteil meist zweidimensional orientiert und besitzen eine Länge zwischen 2 und 50 mm. Verarbeitet werden LFT-Halbzeuge und -Formmassen üblicherweise im Fließpressverfahren. Endlosfaserverstärkte Thermoplaste beinhalten Fasern, deren Länge näherungsweise der Bauteillänge entsprechen. Die Faserorientierung kann geringstenfalls schichtweise als unidirektional oder auch als eindimensional charakterisiert werden. [26]

2.1.2 Halbzeugherstellung

Bei der Herstellung vollständig imprägnierter und konsolidierter Halbzeuge aus Thermoplasten mit Endlosfaserverstärkung (sog. Organobleche) wird zwischen Schmelz- und Folienimprägnierung unterschieden [13]. Die anschließende Konsolidierung zum Organoblech kann durch

einen Autoklaven, eine statische Presse oder eine Doppelbandpresse erfolgen, die sich unter anderem hinsichtlich ihrer Fertigungszyklen, dem Investitionsaufwand und der Flexibilität unterscheiden [27].

Den geringsten Fertigungsaufwand bei gleichzeitig hoher Flexibilität bzgl. des Lagenaufbaus bietet die Konsolidierung mithilfe statischer Pressen. Die thermoplastische Matrix wird als Folie in alternierender Reihenfolge mit den Verstärkungsfasern gestapelt, um anschließend unter Temperatur und Druck verpresst zu werden. Nachteilig bei diesem Verfahren, das auch Filmstacking genannt wird ist, dass ein zusätzliches Aufschmelzen der Folie während der Halbzeugherstellung erforderlich ist. Dies kann sich negativ auf die thermo-oxidative Beständigkeit auswirken. Bei der Herstellung der Halbzeuge auf einer Doppelbandpresse werden die einzelnen Lagen bei gleichzeitiger Erwärmung miteinander verpresst, um so die Filamente zu benetzen. Anschließend wird das Laminat unter Druck abgekühlt. Verglichen mit einer Konsolidierung im Autoklaven oder in einer statischen Presse weist das Herstellungsverfahren den kürzesten Fertigungszyklus auf. Allerdings ist dies mit einer aufwendigen Anlagentechnik, also mit erhöhtem Investitionsbedarf verbunden. Das Autoklavverfahren kombiniert Halbzeugherstellung und Formgebungsprozess in einem Prozessschritt. Die Zuschnitte der textilen Halbzeuge werden alternierend mit den thermoplastischen Folien auf ein Metallwerkzeug abgelegt, das anschließend mit einer temperaturbeständigen Vakuumfolie umgeben und luftdicht verschlossen wird. Die folgende Imprägnierung der Fasern erfolgt im Autoklaven nach der Applizierung des Vakuums unter einem definierten Temperatur-Druckzyklus. Das Autoklavverfahren bietet eine hohe Flexibilität bzgl. der Bauteilgeometrie. Nachteilig sind neben den langen Zykluszeiten und den hohen Anlageninvestitionskosten, die kostenintensiven Hilfsstoffe Dichtmasse und Vakuumfolie, die wegen ihrer begrenzten Temperaturbeständigkeit bei Hochtemperaturanwendungen begrenzt einsetzbar sind. [13]

2.1.3 Marktbetrachtung und industrielle Anwendung

Erste Verwendung fanden Strukturbauteile aus Faserverbundkunststoffen in Hochtechnologie-sektoren, wie der Luft- und Raumfahrt sowie der Rüstungsindustrie [27]. Der Anteil an FVK in neuen Flugzeugtypen ist in der Vergangenheit ständig gestiegen und beträgt in den beiden neuen Flugzeuggenerationen Airbus A350-900 XWB und Boeing 787-8 über 50 % des Flugzeuggesamtgewichtes [28]. Dies ist auch auf den Einsatz thermoplastischer FVK zurückzuführen. Ein Beispiel dafür ist die sogenannte J-Nose, die feststehende Flügelvorderkante, die von der Fa. Stork/Fokker Special Products aus kontinuierlich kohlenstofffaserverstärktem Polyphenylensulfid (CF/PPS) hergestellt wird. Die Halbzeuge hierfür werden von der Fa. Tencate Advanced Composites geliefert, die neben duroplastischen Faserverbundstoffen auch thermoplastische Hochleistungslamine herstellt und unter dem Namen CETEX[®] vertreibt [29].

Im Automobilbau beschränkt sich das Einsatzgebiet für thermoplastische Faserverbundwerkstoffe bisher hauptsächlich auf glasfaserverstärkte Organobleche. Im neuen Audi A8 werden

bspw. Organobleche im Untergurt des Hybridfrontends eingesetzt [30]. Das U-Profil aus dem Leichtbauwerkstoff beweist, dass alle Anforderungen bzgl. Torsions- und Biegesteifigkeit erfüllt werden. Bei den Organoblechen handelt es sich um glasfaserverstärktes PA6 der Firma Bond Laminates. Im Fokus derzeitiger Forschungsaktivitäten steht die Entwicklung von Organoblechen mit Kohlenstofffaserverstärkung. Wissenschaftler der RWTH Aachen haben einen Technologiedemonstrator in Form einer PKW-Leichtbaubodengruppe mit lokalen Verstärkungen aus thermoplastischem CFK (CF/PA66) entwickelt [31]. Bei einer Gewichtseinsparung von 22 % gegenüber einer konventionellen Rohkarosserie des Golf VI erfüllt die Leichtbauvariante alle Anforderungen an das Strukturverhalten im Hinblick auf die geprüften Crash- und Steifigkeitsanforderungen.

Faserverstärkte Thermoplaste nehmen mittlerweile einen großen Anteil des Gesamtmarktes für GFK/CFK ein. Ein Großteil des Volumens entfällt auf kurzfaserverstärkte Spritzgussgranulate, während die Marktdurchdringung durch endlosfaserverstärkte Thermoplaste noch verhalten ist [32]. Die Entwicklung neuer, fortschrittlicher Materialien ist ein evolutionärer Prozess, der meist Jahre in Anspruch nimmt. Neuentwicklungen haben bis hin zum Serieneinsatz einige Hürden zu nehmen. Neben der Bereitstellung einer umfangreichen Datenbasis und der Verfügbarkeit von Testkörpern mit reproduzierbaren Materialeigenschaften, spielen auch mangelnde Erfahrung von Konstrukteuren und Produktentwicklern und damit verbundene Vorbehalte gegenüber neuen Materialien eine Rolle. Bei der Gestaltung von Bauteilen wird daher gerne auf vertraute, traditionelle Werkstoffe zurückgegriffen [33].

2.2 Fügen thermoplastischer Kunststoffe mit Laserstrahlung

2.2.1 Definition und Einordnung des Fertigungsverfahrens

Mit der Entwicklung des ersten Rubinlasers durch Maimann im Jahre 1960 [34] begann die rasante technologische Entwicklung des Lasers. Das Wort LASER ist ein Akronym das für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ steht und beschreibt vereinfacht formuliert den physikalischen Vorgang der Verstärkung von Licht durch erzwungene Aussendung von Strahlung, der sogenannten stimulierten Emission. Der Laser zeichnet sich gegenüber anderen Strahlquellen besonders durch seine hohe physikalische Strahlqualität aus. Der Begriff Laserstrahlung beschreibt monochromatische (eine bestimmte Wellenlänge), kohärente (eine bestimmte Phasenlänge) Strahlung mit geringer Divergenz (stark gebündelt) und hoher Intensität, die sich als elektromagnetische Welle ausbreitet [35]. Der Laser emittiert gerichtet und ist dadurch sehr gut fokussierbar. Die Strahlungsintensität des fokussierten Laserstrahls lässt sich sehr gezielt steuern, wodurch der Laser für verschiedene Bearbeitungsverfahren eingesetzt werden kann [36].

In Anlehnung an DIN 1910 [37] ist Schweißen „das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft“ und wird nach dieser Norm anhand der Art der in die Fügeebene eingebrachten Wärme unterteilt. Das Laserstrahlschweißen lässt sich nach DIN 8593-6 [38] in die Gruppe der Schmelzschweißverfahren mithilfe von Strahlung einordnen. Die Prozessenergie wird berührungslos über die elektromagnetische Laserstrahlung eingebracht, vom Werkstoff absorbiert und in thermische Energie zur Aufschmelzung der Fügepartner umgewandelt.

Gegenüber anderen Laserbearbeitungsverfahren erfordert das Fügen von Kunststoffen mittels Laserstrahlung zwar relativ geringe Strahlungsintensitäten, die Wechselwirkungszeiten sind hingegen mit unter einer Sekunde bis hin zu mehreren Sekunden vergleichsweise hoch.

2.2.2 Strahlungserwärmung von Kunststoffen

Die Bearbeitbarkeit polymerer Werkstoffe mit elektromagnetischer Strahlung hängt im Wesentlichen von deren strahlungsoptischen Eigenschaften ab. Trifft elektromagnetische Strahlung auf einen Werkstoff, wird diese, wie in Bild 5 dargestellt, aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes des Polymers und der Umgebungsluft teilweise an der Oberfläche reflektiert (R). Der verbleibende Strahlungsanteil tritt in das Material ein und wird durch Reflexion an Inhomogenitäten² (R^*) und Absorption (A) geschwächt. Der verbleibende Anteil wird transmittiert (T). [39]

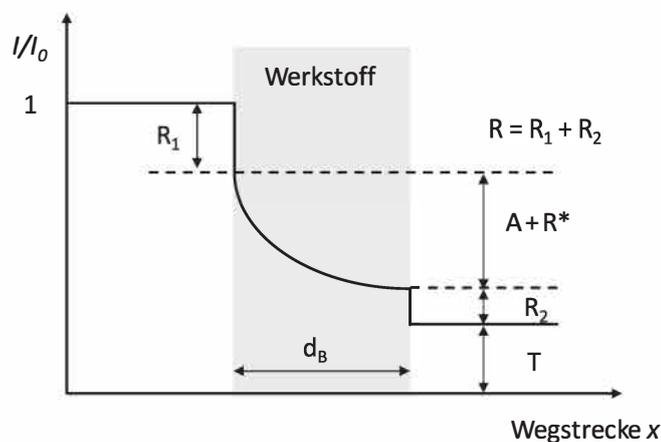


Bild 5: Schwächung der Strahlungsintensität durch Reflexion, Streuung und Absorption beim Durchgang durch Materie [39]

Nach dem Energieerhaltungssatz [40] gilt für die entsprechenden Anteile der Strahlungsintensität:

² Lunker-, Fehlstellen- und Füllstoff-Inhomogenitäten sowie unterschiedlich kristalline Strukturen im Bauteil zeichnen sich durch eine lokale Änderung des Brechungsindex aus [143, 144].

$$1 = (R + R^*) + A + T \quad (1)$$

Die Intensität I der Lichtwelle, Leistung pro Fläche, nimmt beim Durchgang durch ein absorbierendes Medium unter Vernachlässigung der inneren Reflexion R^* exponentiell mit dem Weg x ab. Die ortsabhängige Intensität kann mithilfe des Lambert-Beerschen Absorptionsgesetzes beschrieben werden [41]:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2)$$

Die Größe α ist eine materialabhängige Konstante und wird als Absorptionskoeffizient bezeichnet. Alternativ wird dafür die Eindringtiefe δ_{opt} der Strahlung angegeben, die mithilfe des Lambert-Beerschen Gesetzes aus α berechnet werden kann:

$$\delta_{opt} = \frac{1}{\alpha} = \frac{d_B}{\ln \frac{1 - (R + R^*)}{T}} \quad (3)$$

Die beschriebenen Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsanteile bestehen jeweils aus Anteilen der gerichteten, nicht gestreuten³ und gestreuten Strahlung. Die Streuung an der Oberfläche beim Ein- und Austritt in bzw. aus einer Kunststoffprobe wird als äußere Streuung bezeichnet [42]. Innere Streuung findet an den Molekülketten selbst, den in der amorphen Phase eingelagerten kristallinen Bereichen [43] sowie den in der Polymermatrix eingelagerten Fremdkörpern, wie Füll-, Faser- oder Farbstoffpartikeln statt [44]. Die Absorption im Inneren der Kunststoffe im Wellenlängenbereich der emittierten Diodenlaserstrahlung ist auf die Oberschwingungen von C-H, O-H und N-H Bindungen zurückzuführen [42]. Die zwischenatomaren Abstände sind in Festkörpern bzw. Polymeren etwa zehn Mal kleiner als in Gasen. Atome und Moleküle erfahren im Polymer also stärkere Wechselwirkungen mit der Strahlung, wodurch die für den Fügeprozess benötigte Wärme entsteht [45]. Zur ausführlichen Beschreibung der Wechselwirkungsvorgänge wird auf die Arbeiten von Klein [39] und Hänsch [42] verwiesen.

2.2.3 Haftungsmechanismen von Schweißverbindungen

Beim Schweißen von Kunststoffen führen unterschiedliche Mechanismen zur Ausbildung der Verbindungsfestigkeit zwischen zwei Fügepartnern. Meist treten diese überlagert auf. Je nach Kunststofftyp und Schweißbedingungen kann ein Mechanismus überwiegend auftreten. Die Verbindungsfestigkeiten beim Schweißvorgang sind auf intermolekulare Adhäsionskräfte zurückzuführen [46]. Zur Erklärung der Adhäsion sind bereits einige spezifische Modelle entwi-

³ Streuung ist definiert als nicht gerichtete Ablenkung von Strahlung ohne Intensitätsverlust [138, 82].

ckelt worden. Die Anzahl der Modelle die zur Interpretation der Adhäsion herangezogen werden, variiert in der Literatur zwischen zwei Hauptmodellen [47] und sechs untergeordneten Modellen [48]. Nach Kinloch [49] sind die vier wichtigsten zur Erklärung der Adhäsion bei Schweißverbindungen der mechanische Formschluss, die Elektronen-, Diffusions- und Adsorptionstheorie (Bild 6).

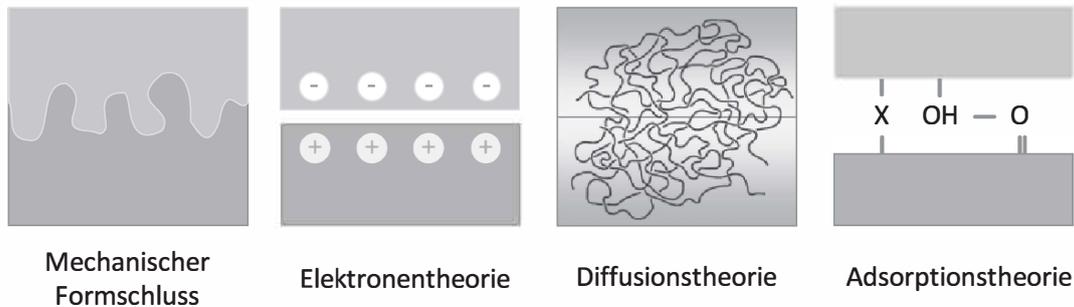


Bild 6: Schematische Darstellung der Adhäsionsmechanismen mechanischer Formschluss, Elektronen-, Diffusions-, und Adsorptionstheorie [50]

Mechanischer Formschluss

Einer der wichtigsten Mechanismen zur Erklärung der Haftung bei Schweißverbindungen ist der mechanische Formschluss des Fügepartners in den Unregelmäßigkeiten der Substratoberfläche des zweiten Fügepartners. Der Formschluss nutzt dazu nicht nur die Verkrallung in die unregelmäßige Topographie der Werkstückoberfläche, sondern profitiert auch von der damit verbundenen Vergrößerung der Anbindungsfläche [49]. Eine Anwendung, bei der der mechanische Formschluss signifikant zur Adhäsion von Polymeren beiträgt, ist das Fügen von Kunststoffen mit Metallen. Hier werden durch gezielte Oberflächenvorbehandlung Hinterschneidungen in die Fügefläche des Metalls eingebracht, die anschließend während des Fügevorgangs mit Thermoplastschmelze aufgefüllt werden [51].

Elektronentheorie

Die Elektronentheorie (auch bekannt als elektrostatische-, elektrische Doppelschicht- oder Parallelplatten-Kondensator-Theorie) geht davon aus, dass die Haftung zwischen zwei Festkörpern durch eine elektrische Doppelschicht erzeugt wird, die durch Elektronentransport zum Ausgleich der Fermi-Level entsteht [50]. Die elektrostatischen Kräfte resultieren aus der Kontakt- und Potenzialdifferenz und tragen signifikant zur Adhäsion bei.

Diffusionstheorie

Die Diffusionstheorie basiert auf der Annahme der wechselseitigen Diffusion von Molekülen innerhalb eines Polymers (Automation) oder zwei Polymeren (Heterohäsion) über die Grenzschicht hinweg. Dies erfordert eine hohe Beweglichkeit und Löslichkeit der Makromoleküle,

Kettensegmente und Polymerketten. Deshalb sollten die Polymere oberhalb der Glasübergangstemperatur vorliegen und keine starke Vernetzung aufweisen [49]. Mathematisch kann der Konzentrationsausgleich der Diffusion innerhalb eines Stoffes durch das Ficksche Gesetz (Formel 4) beschrieben werden. Die Geschwindigkeit des Diffusionsstroms wird mit dem dafür verantwortlichen Konzentrationsgradienten verknüpft.

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -D \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (4)$$

Das Gesetz beruht auf der Hypothese, dass der Massenfluss $\partial m/\partial t$ durch eine Einheitsfläche des Querschnitts direkt proportional zum Konzentrationsgradienten $\partial \vartheta/\partial x$ ist [46]. Der Diffusionskoeffizient D hängt von einigen Faktoren ab. Eine Steigerung des Anpressdrucks führt aufgrund des rheologischen Prozesses zu einer Vergrößerung der wirksamen Kontaktfläche. Optimaler Kontakt wird erzielt, wenn der Anpressdruck oberhalb des Sättigungsdruckes des jeweiligen Polymers liegt. Eine darüber hinausgehende Drucksteigerung führt nicht zu einer größeren Haftfestigkeit [49]. Ein niedriges Molekulargewicht begünstigt die Beweglichkeit der Molekülketten und verbessert damit die Diffusion. Durch höhere Temperaturen und längere Temperaturhaltezeiten kann die Diffusionsrate der Molekülsegmente über die Grenzfläche hinweg gesteigert werden [52]. Zusätzlich zu den zeitabhängigen Diffusionsvorgängen zeigen Kunststoffe eine zeitunabhängige spontane Haftfestigkeit bei Kontakt. Diese ist auf Van-der-Waals-Wechselwirkungen zwischen den Makromolekülen in den Kontaktflächen zurückzuführen [53].

Adsorptionstheorie

Die Adsorptionstheorie ist die am häufigsten angewandte Theorie zur Erklärung der Adhäsionsmechanismen. Verantwortlich für die Bindungsfestigkeit sind die interatomaren und intermolekularen Kräfte, die zwischen Atomen und Molekülen der Substratoberflächen wirken. Diese Kräfte oder auch Wechselwirkungen werden nach ihrer Bindungskraft in Primär- und Sekundärkräfte unterteilt [49].

2.2.4 Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen

2.2.4.1 Entwicklungsgeschichte und Beschreibung des Verfahrens

Die ersten Anwendungen eines Lasers zum Verschweißen von Kunststoffen erfolgen im Jahr 1972 durch Ruffler [54]. Hierbei wird eine CO₂-Laserstrahlquelle zum Stumpfschweißen von Polyethylen (PE) mit einer Werkstoffdicke von bis zu 0,2 mm verwendet. Bei einer optischen Laserleistung von 500 W wird eine maximale Bearbeitungsgeschwindigkeit von 500 mm/s erreicht. Die maximale Werkstoffdicke wird, wie bei Duley [55], durch die geringe optische Transmission der Kunststoffe für die Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung beschränkt.

Beim Laserstrahlstumpfschweißen wird die Fügezone während der Erwärmungsphase kontaktlos durch den Laserstrahl erwärmt. Dieser wird mithilfe von Scanner- und Umlenkspiegeln mit hoher Frequenz auf den Fügeflächen bewegt [56]. Nach Erreichen der gewünschten Schmelzschichtdicke beginnt die Umstellphase. Die Umlenkspiegel werden aus der Fügeebene entfernt. Die Fügephase tritt mit der gegenseitigen Berührung der Fügeflächen ein. Bei diesem Schweißverfahren können beide Fügepartner gleiche optische Eigenschaften besitzen [39]. Wegen der schwierigen Automatisierbarkeit und der geringen Reproduzierbarkeit bei zunehmender Werkstoffdicke [57] konnte sich das Verfahren des Laserstrahlstumpfschweißens jedoch industriell nicht durchsetzen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Darstellung verzichtet und auf weiterführende Literatur [39, 58, 59, 60] verwiesen.

Das Verfahren des Laserdurchstrahlschweißens (Bild 7) mittels kurzweelliger Infrarotstrahler wird 1975 erstmals erwähnt [61]. Erste Ergebnisse der erfolgreichen Anwendung dieses Prinzips an formstabilen Probekörpern aus PMMA und schwarzem PC werden erst deutlich später, 1994, von Grimm vorgestellt [62]. Im Gegensatz zum Stumpfschweißen handelt es sich um einen einstufigen Prozess, der die optischen Eigenschaften der Fügepartner gezielt ausnutzt.

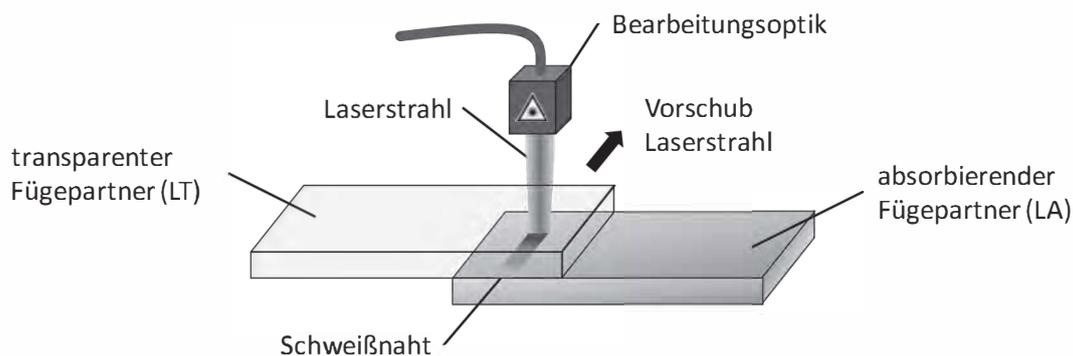


Bild 7: Schematische Darstellung des Laserdurchstrahlschweißens

Zu Beginn des Fügeprozesses tritt der Laserstrahl durch den transparenten Fügepartner (LT) hindurch, wird von einer dünnen, oberflächennahen Schicht des zweiten Fügepartners (LA) absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die Anpassung der optischen Eigenschaften des absorbierenden Fügepartners wird durch Farbstoffe bzw. Additive⁴ erreicht, die für die Wellenlängen der verwendeten Laserstrahlung absorbierend wirken. Die Absorption der Laserstrahlung während der Erwärmungsphase führt zur Aufschmelzung des Werkstoffes und zur gleichzeitigen Ausdehnung der Schmelze. Durch die Ausdehnung der Schmelze und Benetzung des lasertransparenten Fügepartners wird die Wärme auf diesen übertragen und dieser partiell aufgeschmolzen [63, 64, 65]. Die Wärmeleitung wird durch den formschlüssigen Kontakt der Fügepartner während des Prozesses begünstigt. Dies wird durch planparallele Oberflächen der Fügepartner

⁴ Additive, auch Hilfs- oder Zusatzstoffe genannt, sind Stoffe, die Produkten in geringen Mengen zugesetzt werden, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen oder zu verbessern.

und die Verwendung einer geeigneten Spannvorrichtung erreicht. Zeitgleich mit der Erwärmungsphase findet die Interdiffusionsphase, der eigentliche Fügeprozess, statt. Durch die Beweglichkeit der Molekülketten im schmelzflüssigen Zustand finden intensive Platzwechsellvorgänge über die Grenzflächen hinweg statt. Die Grenzflächen zwischen den Fügepartnern verschwinden (Abschnitt 2.2.3). Während der anschließenden Abkühl- bzw. Kristallisationsphase bilden sich Bereiche aus, die aus Polymerketten beider Fügepartner bestehen. Die Abkühlzeit der Schmelze bis unter die Glasübergangs- bzw. Kristallitschmelztemperatur liegt in den meisten Anwendungsfällen in der Größenordnung von einer Sekunde [42]. Wie bei allen Schweißverfahren muss auch beim Laserdurchstrahlschweißen der Fügedruck in der Abkühlphase aufrechterhalten bleiben, um der Volumenkontraktion der Kunststoffe entgegen zu wirken. Auf diese Weise können Fehlstellen in Form von Lunkern, die sich negativ auf die Schweißnahtqualität auswirken, deutlich reduziert werden [66, 58].

2.2.4.2 Verfahrensvarianten

In Abhängigkeit der spezifischen Anforderungen der zu fügenden Bauteile entwickelten sich unterschiedliche Verfahrensvarianten des Laserdurchstrahlschweißens von Kunststoffen. Nach der Art der Energieeinbringung und der Strahlformung lassen sich grundsätzlich die folgenden vier Verfahrensvarianten⁵ (Bild 8) unterscheiden:

- Konturschweißen
- Simultanschweißen
- Quasi-Simultanschweißen
- Maskenschweißen

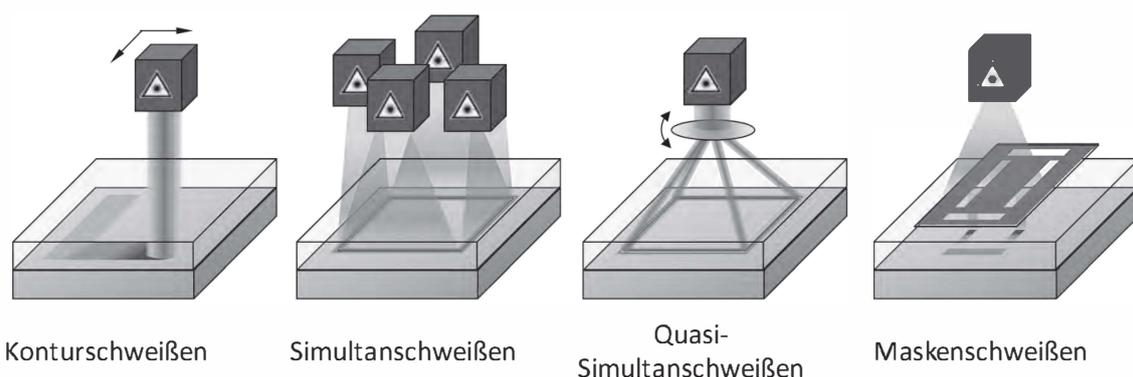


Bild 8: Verfahrensvarianten des Laserstrahlschweißens in Durchstrahltechnik

⁵ Ferner sind die Verfahrensvarianten Hybrid- [136], TWIST- [137], Radial- [73] und Globoschweißen [140] zu nennen, die auf den vier genannten Verfahren basieren, jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die derzeit weitest verbreitete Verfahrensvariante ist das Konturschweißen. Es können Schweißnähte nahezu beliebiger Geometrie erzeugt werden. Bei dieser Technik wird der Strahlfokus über die Materialoberfläche geführt und folgt der Schweißnahtgeometrie. Die Relativbewegung wird entweder über die Bewegung des Fügeteils oder des Lasers realisiert. Die Laserleistungen liegen typischerweise im Bereich von 10 bis 100 W mit Schweißgeschwindigkeiten von 30 bis 80 mm/s [67]. Für die Bahnführung eignet sich die Ablenkung der Laserstrahlung mithilfe von Scannerspiegeln ebenso, wie die Verwendung einer Linearführung oder eines Industrieroboters als Handhabungssystem. Für das Simultanschweißen wird meist ein Diodenlasersystem bestehend aus mehreren Diodenbarren verwendet. Die einzelnen Fokusse bilden in Summe die gesamte Geometrie der Fügenahtstruktur ab. Der Laser bestrahlt gleichzeitig (simultan) die gesamte Fügefläche und kann diese mit einem oder mehreren Laserpulsen erwärmen. Die Erwärmung erfolgt innerhalb weniger zehntel Sekunden [68]. Zwischen Bauteil und Laseranlage ist keine Relativbewegung erforderlich. Dadurch können im Vergleich zum Konturschweißen längere Interaktionszeiten bei gleichzeitig größerem Durchsatz realisiert werden. Die Anpassung der Anlage an die jeweilige Fügeaufgabe wirkt sich jedoch negativ auf deren Flexibilität aus. Änderungen der Nahtgeometrie sind mit hohem Aufwand verbunden. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Prozessfenster für den Simultanschweißprozess im Vergleich zum Konturschweißen deutlich größer sind, die Spaltüberbrückbarkeit steigt und höhere Festigkeiten erreicht werden können [69]. Das Quasi-Simultanschweißen bietet die gleichen Vorteile wie das Simultanschweißen, bei Verwendung eines einzigen Laserstrahls. Dieser wird mithilfe von Scannerspiegeln mit sehr hoher Geschwindigkeit (z. B. 10 m/s) [70] entlang der Nahtkontur geführt. Durch die hohe Geschwindigkeit kann die Fügefläche innerhalb kürzester Zeit mehrmals abgefahren werden. Dadurch wird die gesamte Fügefläche trotz punktförmiger Energiequelle fast zeitgleich (quasi-simultan) erwärmt und plastifiziert. Das Verfahren verbindet somit die Vorteile des Simultanschweißens mit der Flexibilität des Konturschweißens. Die maximale Größe der Füge Teile wird jedoch durch den Arbeitsbereich des Scanners eingeschränkt. Beim Maskenschweißen wird zwischen Laser und Bauteil eine Maske platziert [71]. Die Maske besitzt Aussparungen, die der Geometrie der Schweißnaht entsprechen. Der Fokus des Laserstrahls wird über die Maske bewegt. Nur die Schweißbereiche werden erreicht, an denen die Schweißnaht entstehen soll. So können sehr feine und dicht nebeneinander liegende ($< 100 \mu\text{m}$) Schweißnähte auf Bauteilen realisiert werden [68]. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit durch einfaches Austauschen der Masken vielfältige Schweißnahtgeometrien herzustellen. Einsatzgebiete sind bspw. die Mikrosystem- und Elektrotechnik sowie die Medizintechnik [68].

2.2.4.3 Verfahrenspotenziale

Das Verfahren des Laserdurchstrahlschweißens zeichnet sich im Vergleich zu anderen in der Serienfertigung eingesetzten Schweißverfahren durch eine Vielzahl an Vorteilen aus. In Anlehnung an Hügel [72] werden diese Vorteile in die vier Gruppen Flexibilität, Automatisierbarkeit, Geschwindigkeit und Fertigungsqualität eingeteilt (Bild 9).

Der Flexibilitätsvorteil des Laserdurchstrahlschweißens resultiert vorrangig aus der berührungslosen Energieeinbringung. Dadurch lassen sich, wie in Abschnitt 2.2.4.2 beschrieben, unterschiedliche Nahtgeometrien mit geringem Änderungsaufwand herstellen [73]. Die geringe mechanische Belastung in Kombination mit der lokal begrenzten Energieeinbringung führt nicht nur zu einer hohen Fertigungsqualität der Bauteile, sondern ermöglicht auch den Einsatz des Verfahrens für Anwendungen aus der Mikrotechnik mit filigranen Strukturen [66]. Ein weiterer Vorteil der guten Fokussierbarkeit der Laserstrahlung ist die Minimierung der thermischen Belastung der Fügepartner und der Wärmeeinflusszone (WEZ) [74]. Dadurch werden selbst auf den Sichtflächen dünnwandiger Schweißteile keinerlei Markierungen oder Einfallstellen sichtbar, sodass Class A-Oberflächen⁶ im Sichtbereich durch den Schweißprozess nicht beeinträchtigt werden [75, 11]. Neben der Möglichkeit gasdichte Schweißnähte zu erzeugen [67], weisen die erzeugten Schweißnähte eine sehr gute Festigkeit [76] auf. Durch den stabilen, reproduzierbaren und gut automatisierbaren Fügeprozess eignet sich das Laserstrahlschweißen im Durchstrahlverfahren hervorragend für den Einsatz zur Bauteilfertigung in der Serienproduktion [77]. Geringe Aushärtezeiten und der Entfall zusätzlicher Vorbehandlungsschritte wirken sich neben den hohen Prozessgeschwindigkeiten positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aus.

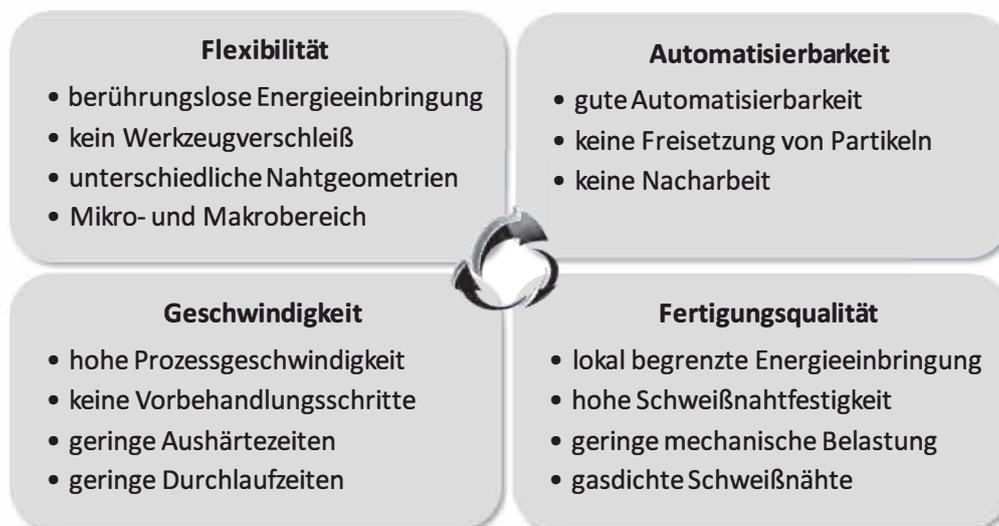


Bild 9: Vorteile der Bearbeitung von Kunststoffen mithilfe von Laserstrahlung (in Anlehnung an [72])

2.2.5 Laseranlagen für das Fügen von Kunststoffen

Nach DIN EN ISO 1145 [78] bestehen konventionelle Laseranlagen zur Materialbearbeitung aus einer Anordnung aus Laserstrahlquelle, Strahlführung und -formung, einem Handhabungs-

⁶ Alle stilistisch relevanten Oberflächen von Produkten werden als Class A-Flächen bezeichnet. Sie prägen das Erscheinungsbild und erfordern deshalb besondere Sorgfalt.

system zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl sowie zusätzlichen Mess- und Regeleinrichtungen. Laseranlagen für das Kunststofffügen unterscheiden sich vor allem durch spezielle Anforderungen an die Eigenschaften der Laserstrahlung, des Strahlformungs- und Positioniersystems, sowie den spezifischen Qualitätssicherungssystemen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

2.2.5.1 Laserstrahlquelle

Für die Laserbearbeitung von Kunststoffen findet eine Vielzahl an Lasersystemen Anwendung. Während der erste Rubinlaser von Maimann [34] noch Licht mit einer Wellenlänge von 694,3 nm emittierte, reichen die Wellenlängen moderner Lasersysteme von unter 0,1 μm bis hin zu einem mm [35]. Sie decken damit die Spektralgebiete der weichen Röntgenstrahlung, des ultravioletten, sichtbaren und infraroten Lichts sowie der Millimeterwellen ab.

Das Potenzial eines Werkstoffes, Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung aufzunehmen, hängt im Wesentlichen von der Frequenz bzw. der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung ab (Abschnitt 2.2.2). Aus diesem Grund spielt die Auswahl einer geeigneten Strahlquelle für die Laserbearbeitung von Kunststoffen eine wichtige Rolle. Die für das Laserdurchstrahlschweißen nötige hohe Transmission der Polymere für die verwendete Wellenlänge ist typischerweise bei Festkörper- und Diodenlasern gegeben. Wegen der geringen Baugröße, der hohen Zuverlässigkeit, der Effizienz und nicht zuletzt der vergleichsweise geringeren Kosten haben sich Hochleistungs-Diodenlaser in der Kunststoffbearbeitung bisher durchgesetzt [79, 80].

Der am häufigsten verwendete Festkörperlaser ist der Nd:YAG-Laser. Die maximal erreichbaren Leistungen betragen bis zu 6 kW [68]. Der Wirkungsgrad ist mit $< 3\%$ [81] verhältnismäßig gering. Anstelle von Lampen werden zunehmend Diodenlaser als Anregungsquellen verwendet, wodurch der Wirkungsgrad deutlich gesteigert wird. Die Strahlung des Nd:YAG-Lasers hat eine Wellenlänge von 1060 nm. Sie liegt im nahen Infrarotbereich (NIR), außerhalb des sichtbaren Lichtspektrums. In der Fertigung sind etwa ein Drittel aller eingesetzten Laser vom Typ Nd:YAG. Er findet Anwendung beim Bohren, Schneiden, Löten, Schweißen, Beschriften und zur Bearbeitung von Oberflächen. [81]

Bei Hochleistungsdiodenlasern (HDL) wird je nach verwendetem Halbleiter Strahlung von ultravioletten (600 nm) bis zum infraroten Bereich (1600 nm) emittiert, wobei die Wellenlängen 808 und 940 nm am häufigsten verwendet werden [82]. Da einzelne Laserdioden nur Leistungen von bis zu einigen Watt emittieren können, werden bei Diodenlasern höherer Leistung viele einzelne Dioden zu Diodenbarren und diese wiederum zu sogenannten Stapeln⁷ zusammenge-

⁷ Häufig wird dafür der englische Begriff Stack verwendet.

fasst. Zur weiteren Leistungssteigerung wird die lineare Polarisation der verschiedenen Wellenlängen mehrerer Stapel ausgenutzt. Bild 10 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Diodenlaserbarrens. Durch die Bauart ergibt sich eine typische Intensitätsverteilung des Laserstrahls. Senkrecht zur Barrenebene ist die Intensitätsverteilung wie die des Einzelemitters in guter Näherung gaußförmig (entsprechend einer Gaußschen Normalverteilung). Durch Überlagern der Einzelstrahlen der Emitter ergibt sich in Richtung der Barrenebene ein nahezu blockförmiges Intensitätsprofil.

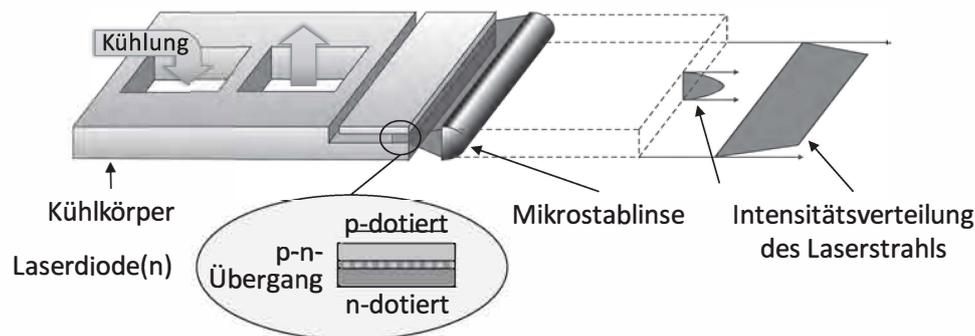


Bild 10: Anordnung einzelner Laserdioden zu einem Laserdiodenbarren [66]

Die geringere Strahlqualität der HDL gegenüber den Festkörperlaser ist für die Bearbeitung von Kunststoffen aufgrund der großen Fokusabmessungen ausreichend. Eine kompakte Bauweise, hohe Standzeiten und vor allem gute Wirkungsgrade von 30 - 50 % sind die großen Vorteile der Strahlquellen [83].

2.2.5.2 Strahlführung und -formung

Die Strahlformung übernimmt eine Bearbeitungsoptik, die entweder über eine Lichtleitfaser (LLK⁸) oder direkt mit der Strahlquelle verbunden ist. Die erzeugte Laserstrahlung wird nahezu verlustfrei durch die Faser zur Bearbeitungsoptik transportiert. Mithilfe optischer Elemente im Strahlengang der Bearbeitungsoptik wird der aus dem LLK austretende, divergente und üblicherweise rotationssymmetrische Strahl geformt. Die für die Materialbearbeitung notwendigen Strahleigenschaften, wie Strahlabmessungen, -geometrie und Leistungsdichteverteilung werden so eingestellt. Die Intensität I der Laserstrahlung auf der Bauteiloberfläche ist direkt proportional zur Laserleistung P_L . Auf eine ausführliche Betrachtung der optischen Zusammenhänge sowie der Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung wird an dieser Stelle verzichtet und auf gängige Fachliteratur verwiesen [40, 84].

⁸ Lichtleitfasern werden in der Anwendung meist als Lichtleitkabel (LLK) bezeichnet.

2.2.5.3 Qualitätssicherung beim Laserdurchstrahlfügen

Die Schmelztemperaturbereiche von Polymeren sind stark lokal begrenzt. Erwärmungen der Kunststoffe über die Zersetzungstemperatur hinaus führen zu Bauteilschäden. Eine der wichtigsten Regelgrößen beim Fügen von Kunststoffen ist folglich die Temperatur in der Fügezone.

Geeignete Messtechnik ermöglicht die auftretende Temperatur während des Fügeprozesses simultan zu erfassen und die Laserleistung entsprechend zu regeln. Mittels Pyrometrie wird, wie in Bild 11 dargestellt, mithilfe zuvor bestimmter temperaturabhängiger Emissionsgrade durch Detektion der emittierten Wärmestrahlung die Temperatur berührungslos gemessen [85]. Die detektierte Temperatur wird in ein elektrisches Signal umgewandelt und kann zur Online-Regelung der Laserleistung in Echtzeit verwendet werden. Ein geschlossener Regelkreis ermöglicht die schnelle Anpassung der Laserleistung. Die Schweißtemperatur kann so annähernd konstant gehalten werden [86]. Dies gewährleistet eine gute Nahtqualität und geringe Ausschussraten [87].

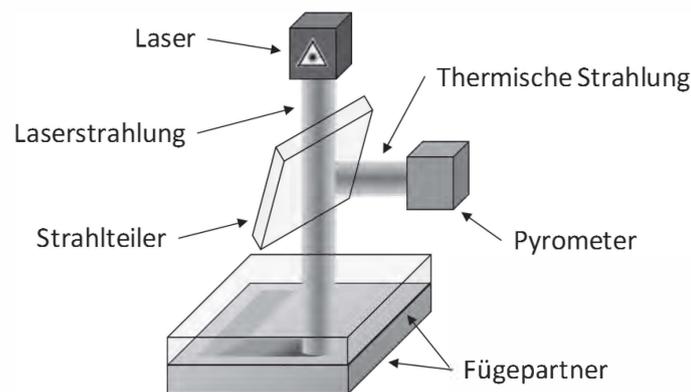


Bild 11: Aufbau der Pyrometerregelung beim Laserdurchstrahlverschweißen [86]

Neben der Prozessregelung wird die Forderung nach der Rückverfolgbarkeit prozessrelevanter Daten im Rahmen des Qualitätsmanagements, also der Prozessüberwachung, immer wichtiger. Nach Ahmeti [88] können zur Qualitätssicherung beim Kunststofflaserstrahlverschweißen die Schmelzwegänderung, die Wärmeabstrahlung, die Spannkraftänderung sowie die Reflexionsänderung überwacht werden. Die Auswahl des optimalen Überwachungskonzepts ist von mehreren Faktoren bspw. dem Bestrahlungsverfahren, der Bauteilgeometrie und dem verwendeten Werkstofftyp abhängig [69]. Die klassische Form der Online-Qualitätsüberwachung ist die Weg-/Zeitüberwachung. Dazu wird der Fügeweg gemessen, der aus der Abschmelzung resultiert [77]. Um die Laserleistung über den gesamten Produktionszeitraum konstant zu halten, werden Leistungsmessgeräte in die Anlagen integriert. So kann eine Verringerung der Laserleistung frühzeitig erkannt werden. Ein anderer Weg der Prozessüberwachung ist die optische Inspektion mittels CCD-Kameras. Diese Methode wird zur Detektion von Verbrennungen, Partikeleinschlüssen und Nahtunterbrechungen eingesetzt. [88]

2.2.6 Einflussgrößen auf den Schweißprozess

Auf den Fertigungsprozess und das Bearbeitungsresultat des Laserdurchstrahlschweißens von Thermoplasten wirkt eine Vielzahl unterschiedlich beeinflussender Größen. Ein gängiges Werkzeug zur Analyse eines Prozesses hinsichtlich seiner Einflussgrößen ist das Ishikawa-Diagramm⁹ (Bild 12). Der Hauptstrahl des Diagramms entspricht dem Prozess des Laserdurchstrahlschweißens, dessen Ziel das Erreichen der geforderten Fügenahtqualität ist.

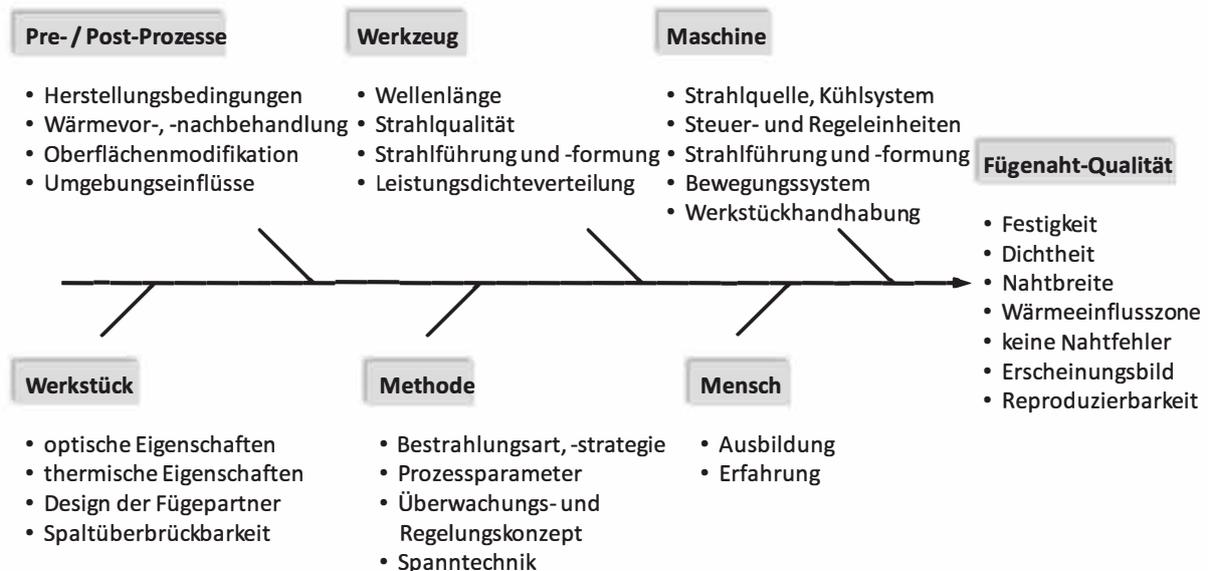


Bild 12: Strukturierte Einflussgrößen auf den Prozess des Laserdurchstrahlschweißens von Thermoplasten (in Anlehnung an [89])

Nach Russek [89] wird der Fertigungsprozess und dessen Resultat durch Aspekte beeinflusst, die sich unter den Oberbegriffen Pre-/Post-Prozesse, Werkzeug, Maschine, Werkstück, Methode und Mensch einordnen lassen. Im Folgenden werden die wichtigsten Einfluss- und Einstellgrößen näher beschrieben und ihre Wechselwirkungen dargestellt.

2.2.6.1 Energieeintrag

Die von der Methode abhängigen Prozessparameter Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit sowie die vom Werkzeug abhängige Fokusgeometrie können unter dem Überbegriff des Energieeintrags zusammengefasst werden. Bei einer fest vorgegebenen Fokusgeometrie kann als prozessbeschreibende Größe folglich die in das Bauteil eingebrachte Streckenenergie E_s herangezogen werden.

⁹ Ein Ishikawa-Diagramm (Fehlerbaum-, Fischgrätendiagramm) ist eine graphische Darstellungstechnik mit deren Hilfe problemrelevante Faktoren von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen systematisch und übersichtlich dargestellt werden [139].

$$E_s = \frac{P_L}{v_s} \quad (5)$$

Zur Beurteilung der drei in Wechselwirkung zueinander stehenden Einflussgrößen ist die Verwendung der Streckenenergie gebräuchlich. Die Darstellung der Nahtfestigkeit σ_A über der Streckenenergie (Bild 13) bei konstanter Laserleistung P_L und variabler Schweißgeschwindigkeit v_s zeigt einen charakteristischen Kurvenverlauf.

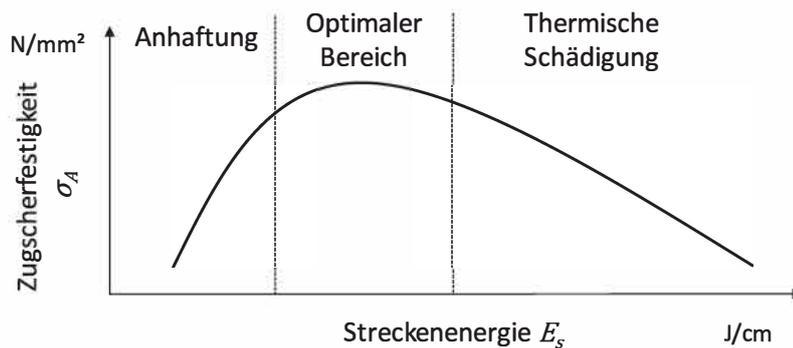


Bild 13: Typischer Verlauf der Schweißnahtfestigkeit über der Streckenenergie beim Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen [90]

Bei zu geringem Energieeintrag ist lediglich ein leichtes Anhaften des Werkstoffs zu beobachten. Dies geht mit einer sehr geringen Festigkeit der Verbindung einher. Mit steigender Streckenenergie wird mehr Schmelze gebildet, wodurch der Werkstoff in der Fügezone besser plastifiziert wird. Die Schweißnahtfestigkeit nimmt zu. Bei optimal eingestellten Parametern zeigt sich ein ausgeprägtes Maximum der Verbindungsfestigkeit. Bei zu hohem Energieeintrag nimmt die Festigkeit wieder ab. Der Werkstoff wird durch die entstehenden hohen Temperaturen geschädigt und thermisch zersetzt. Die Streckenenergie ist jedoch keine unabhängige bzw. globale, prozessbeschreibende Größe, da aus unterschiedlichen Kombinationen der Laserstrahlleistung P_L und Schweißgeschwindigkeit v_s unterschiedliche Fügeergebnisse resultieren können. Neben den beiden Prozessgrößen nimmt vor allem die Wechselwirkungszeit t_{ww} der Laserstrahlung mit den beiden Fügepartnern Einfluss auf die erzielte Nahtqualität. Dies liegt an der Zeitabhängigkeit der Wärmeleitungsprozesse. Der Werkstoff kann bei längerer Bestrahlung tiefer aufgeschmolzen werden. Dennoch kann die Streckenenergie E_s als Orientierungshilfe für die industrielle Nutzung dienen, da der Anwender bei festgelegten Material- und Laserstrahleigenschaften lediglich über die oben genannten Prozessparameter Einfluss auf den Prozess nehmen kann. [90]

2.2.6.2 Fügedruck

Anders als bei zahlreichen konventionellen Fügeverfahren sind beim Laserdurchstrahlschweißen Energieeinbringung und Spanntechnik voneinander unabhängig. Dies liefert einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Der prozesstechnisch notwendige Fügedruck wird mittels einer der Nahtgeometrie angepassten Spannvorrichtung erzeugt. Diese gewährleistet das reproduzierbare Positionieren der Fügepartner. Der Fügedruck optimiert den thermischen Kontakt und unterstützt die Diffusion und Verkettung der Makromoleküle (Abschnitt 2.2.3) ohne mechanische Spannungen im Fügebereich zu induzieren. Bild 14 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Fügedruck p und erzielter Zugscherfestigkeit der Fügeverbindung σ_A .

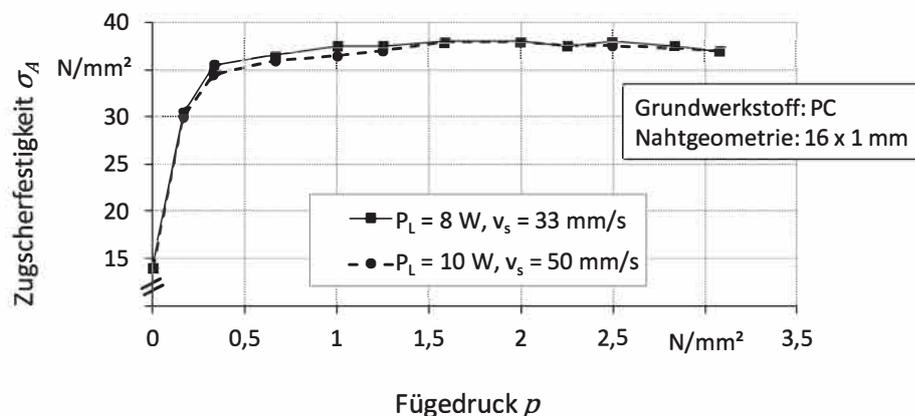


Bild 14: Zugscherfestigkeit konturgeschweißter Polycarbonat-Flachproben in Abhängigkeit des Fügedrucks [89]

Die von Russek [89] durchgeführten Untersuchungen an konturgeschweißten Polycarbonat-Flachproben zeigen, dass bei Verwendung restspaltfreier Flachproben bereits bei geringen Kräften eine hochwertige Naht mit hoher Festigkeit erreicht wird. Mit zunehmendem Fügedruck p steigt die erzielbare Nahtfestigkeit σ_A und strebt gegen einen konstanten Grenzwert. Als Mindestfügedruck wird der Wert definiert, ab dem 90 % des Grenzwertes erreicht werden und keine Nahtfehler (Poren, etc.) auftreten. Je nach Werkstoffkombination liegt der Mindestfügedruck im Fügebereich typischerweise zwischen 0,05 und 0,2 N/mm² [89]. Der Fügedruck ist jedoch nicht beliebig steigerbar, da eine Drucksteigerung zur Verringerung des Restspaltes führen kann. Dadurch können, abhängig von den mechanischen Kennwerten der Fügepartner, Verformungen und induzierte Spannungen auftreten.

2.2.6.3 Optische Materialeigenschaften

Die optischen Eigenschaften der Thermoplaste bestimmen deren Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Strahlung und damit die räumliche und zeitliche Energieeinbringung und -umwandlung (Abschnitt 2.2.2). Sie sind material-, herstellungs-, wellenlängen- und temperaturabhängig [42, 59, 89]. Die optischen Eigenschaften unpigmentierter Thermoplaste werden von dem kettenförmigen Aufbau der Makromoleküle und deren Morphologie bestimmt.

Sie werden durch die Herstellungsbedingungen sowie Additive, wie bspw. Glasfasern oder Farbstoffe, beeinflusst [59].

Nach dem molekularen Aufbau werden amorphe und teilkristalline Thermoplaste unterschieden (siehe Abschnitt 2.1.1). Das Laserdurchstrahlenschweißen von teilkristallinen Polymeren ist nur eingeschränkt möglich, da die Streuung an den Kristalliten die Transmission verringert und zu einer Aufweitung des Strahldurchmessers führt [63]. Bei den amorphen Kunststoffen fehlen die kristallinen Bereiche, weshalb beim Durchstrahlen keine Streuung auftritt [91].

Additive werden in der Polymerindustrie eingesetzt, um die mechanischen, thermischen und optischen Eigenschaften gezielt zu beeinflussen. Häufigster Vertreter ist industriell erzeugter Ruß, durch den die Thermoplaste ihre dunkle Farbe erhalten. Pigmentruß zeigt gegenüber elektromagnetischer Strahlung ein ausgeprägtes Absorptionsverhalten in einem breiten Wellenlängenbereich [92]. Aufgrund des hohen Absorptionsvermögens wird Ruß ausschließlich als absorbierender Fügepartner beim Laserdurchstrahlenschweißen eingesetzt. Bild 15 zeigt den von Hänisch [42] untersuchten Zusammenhang zwischen der Rußkonzentration ω und den optischen Eigenschaften der Transmission T und Eindringtiefe δ_{opt} in 2 mm dickes Polypropylen (PP) bei einer Wellenlänge von 808 nm. Während unpigmentiertes Polycarbonat mit einer Dicke von $d_B = 2,0$ mm über 90 % der auftreffenden Strahlung transmittiert, nehmen der transmittierte Anteil und damit die optische Eindringtiefe bereits bei geringer Zunahme der Rußkonzentration ω deutlich ab. Bis zu einer Rußkonzentration von etwa 0,1 Gew.-% ist eine deutliche Reduzierung der Eindringtiefe und der Transmission zu beobachten. Steigerungen der Konzentration darüber hinaus führen zu unwesentlich geringen Änderungen der Absorptionseigenschaften. Rußkonzentrationen über 1 Gew.-% führen während des Fügeprozesses schnell zur thermischen Schädigung der Polymere in der Fügezone, da diese durch das ausgeprägte Absorptionsverhalten in oberflächennahen Schichten leicht über die Zersetzungstemperatur T_z hinaus erhitzt werden. Die zur Erreichung maximaler Festigkeit nötige Streckenenergie E_s steigt mit abnehmender Rußkonzentration deutlich an. Höhere Festigkeiten erreicht [42].

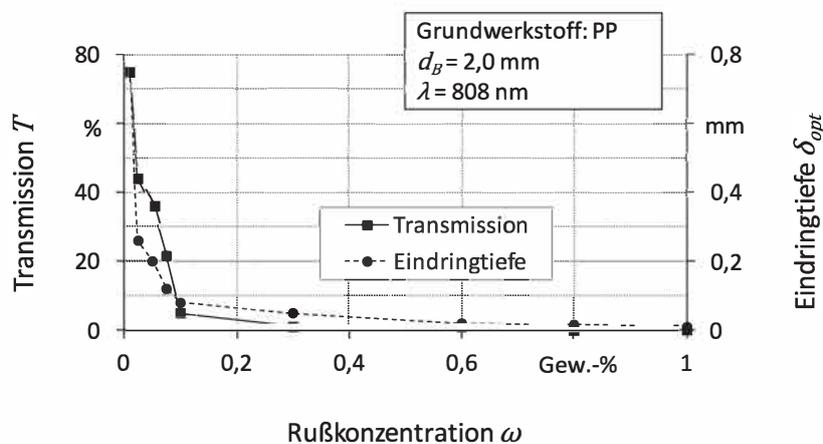


Bild 15: Änderung der Transmission und der Eindringtiefe mit zunehmender Rußkonzentration [42]

Neben der Additivierung bzw. Schwarzfärbung der Polymere mithilfe von Pigmentruß wird vor allem im Consumerbereich eine freie Farbgestaltung der beiden Fügepartner gefordert. Mit absorbierenden Rußpartikeln ist dies nicht realisierbar. Es sind spezielle farbgebende Additive notwendig, die für den Wellenlängenbereich der Laserstrahlung transparent bzw. absorbierend sind. Neben der Kombination unterschiedlich eingefärbter Bauteile mit speziellen farbgebenden Additiven [68] ist das Fügen zweier für das Auge transparent erscheinender Fügepartner eine weitaus größere Herausforderung. Eine Möglichkeit bietet die Verwendung einer laserabsorbierenden Zwischenschicht aus sog. Clearweld®-Material. Es handelt sich um spezielle, für das Auge transparent erscheinende Additive, die die Laserstrahlung der jeweiligen Wellenlänge absorbieren [93, 94]. Eine andere Möglichkeit bietet die Verwendung von infraroter Laserstrahlung. Für deren Absorption benötigen die meisten Thermoplaste keine besonderen Absorber oder Additive. Hier ist es notwendig die Fokussierung und die Strahlqualität genau auf den Prozess abzustimmen. Voraussetzung dafür ist die Verwendung von Optiken mit geringen Brennweiten ($f \leq 50$ mm) und großen Aperturen ($d_A \geq 30$ mm) sowie eine konvektive Luftkühlung des oberen Fügepartners [95, 96].

Zur gezielten Steigerung der mechanischen Eigenschaften werden Kunststoffe oft mit Verstärkungsfasern (Abschnitt 2.1.1) kombiniert. Die optischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe begrenzen die Einsatzmöglichkeit des Laserdurchstrahlschweißens [97]. Kohlenstofffasern beeinflussen die optischen Eigenschaften in ähnlicher Weise, wie die Zugabe von Rußpartikeln und führen dazu, dass ab sehr geringen Faseranteilen die Eindringtiefe deutlich reduziert wird. Die am häufigsten verwendeten Verstärkungsfasern sind Glas- und Kohlenstofffasern. Im Gegensatz zu Kohlenstofffasern besitzen Glasfasern kein ausgeprägtes Absorptionsverhalten, die elektromagnetische Strahlung wird jedoch wegen der Änderung der materialabhängigen Phasengeschwindigkeiten der beiden Medien bei allen Phasenübergängen zwischen Fasern und Matrix reflektiert und gestreut. Die Dicke der Fügepartner, die mit dem Laserdurchstrahlverfahren gefügt werden können, bzw. der maximale Anteil an Verstärkungsfasern wird so begrenzt [97, 98, 99].

2.2.6.4 Thermische Materialeigenschaften

Neben den optischen Materialeigenschaften haben die thermischen Materialeigenschaften der Thermoplaste einen großen Einfluss auf den Prozessverlauf während des Laserstrahlschweißprozesses. Die thermischen Eigenschaften der Kunststoffe wie Schmelz- T_S und Zersetzungstemperatur T_Z , Wärmeleitfähigkeit κ , -kapazität c und -übergang α_w sowie die spezifische Schmelzenthalpie h werden durch ihren strukturellen Aufbau, die Vernetzungsdichte und die chemische Zusammensetzung bestimmt [100].

Schmelzenthalpie, Wärmekapazität, -leitfähigkeit und -übergang sind maßgeblich verantwortlich für die Umwandlungsenergie und den Energietransport innerhalb des Thermoplasts. Wie

in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, steigt die Fähigkeit der Makromoleküle sich über die Grenzflächen zwischen den beiden Fügepartnern zu verketteten mit steigender Temperatur und Diffusionszeit. Je höher die Temperatur und je länger die Diffusionszeit sind, desto ausgeprägter ist das Verkettungsverhalten. Die geringe Temperaturleitfähigkeit der Kunststoffe bedingt, dass auf oder in ihnen platzierte Wärme lange erhalten bleibt. Da Kunststoffe niedrige Zersetzungs-, Oxidations- und Brenntemperaturen besitzen, bedarf es langer Erwärmungsphasen, um Kunststoffe in die Tiefe zu erwärmen. Aufgrund der geringen Wärmeleitung der Kunststoffe kann es bei großen Absorptionskoeffizienten zu Wärmestau (Zersetzung) im Fugebereich kommen. Die Ausbildung, Abmessung und Form der WEZ kann dadurch beeinflusst werden. [89]

Auf die thermischen Eigenschaften kann durch die Zugabe von Additiven in bestimmten Grenzen gezielt Einfluss genommen werden. Bspw. erhöht der vielfach als Absorber verwendete Pigmentruß sowohl die thermische, als auch die elektrische Leitfähigkeit.

2.2.7 Fügenahtqualität

Nach DIN 55350 [101] ist Qualität definiert als „die Gesamtheit der Eigenschaften und Merkmale eines Produktes oder einer Tätigkeit, die sich auf die Eignung zur Erfüllung gegebener Erfordernisse bezieht“. Der Begriff Schweißnahtqualität umfasst die Eigenschaften der Schweißnaht hinsichtlich statischer bzw. dynamischer Belastung sowie den Gefügestand im Schweißgut und in der durch die Wärmeeinwirkung beeinflussten Zone des Grundwerkstoffes, der sogenannten Wärmeeinflusszone. Eine gute Reproduzierbarkeit ist eine Grundvoraussetzung für eine hohe Schweißnahtqualität (Bild 16).

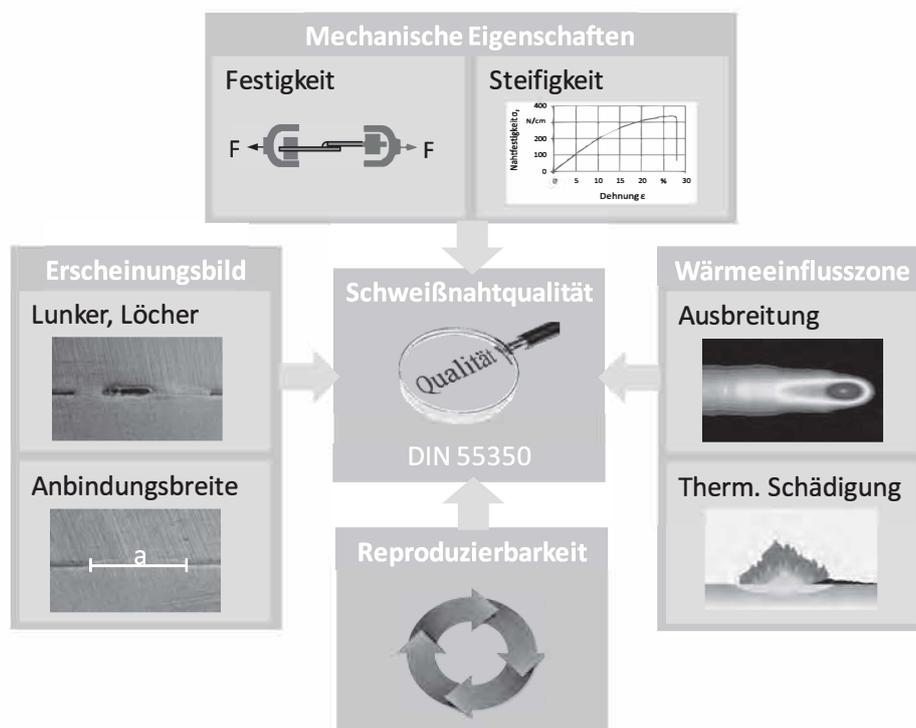


Bild 16: Kriterien zur Beurteilung der Fügenahtqualität von Kunststoffschweißnähten

Als Qualitätskriterium für die Verbindungsqualität eignet sich der einheitslose Kurzzeit-Schweißfaktor s [102]. Er gibt das Verhältnis der ermittelten Verbindungsfestigkeit unter Zug-scherbeanspruchung, bezogen auf die Festigkeit des Grundwerkstoffes unter reiner Zugbeanspruchung an und ist definiert als:

$$s = \frac{\sigma_{A, Probe}}{\sigma_{A, Grundmaterial}} \quad (6)$$

Das Versagen der Schweißnaht wird, wie beim polymeren Grundwerkstoff durch das langsame Risswachstum maßgeblich bestimmt. Für die Dimensionierung ist damit der Langzeit-Schweißfaktor zu verwenden, der mithilfe des Zeitstandzugversuchs ermittelt wird [103]. Eine Extrapolation von Kurzzeitversuchen auf die Langzeitfaktoren ist nicht möglich [104]. Wie allgemein bei Thermoplasten zu beobachten ist, ist auch bei geschweißten Verbindungen die Standzeit bei hohen Temperaturen deutlich verkürzt. Bei Langzeitversuchen erfolgt das Versagen an Schweißnahtdefekten, wie Bindefehlern oder Kerben. Diese Defekte befinden sich in der Schweißnaht und an der Schweißnahtoberfläche. Thermoplaste überstehen zwar teilweise Dehnungen von über 100 % ohne Bruch, das ursprünglich transparente Material wird jedoch bereits bei kleinen Dehnungen von unter 5 % opak. Dieses Verhalten bei auf Zug beanspruchten Kunststoffen wird als *Crazing* bezeichnet und stellt eine irreversible Schädigung des Werkstoffs dar [105]. An Fehlstellen, Inhomogenitäten und Phasengrenzflächen entstehen durch die Spannungskonzentration Mikrorisse. Da diese im Laufe der Beanspruchungszeit wachsen und sich zu Makrorissen vereinigen, ist die *Crazebildung* Ursprung globaler Schädigung. [106]

2.2.8 Industrielle Anwendungen

Das Laserdurchstrahlverfahren hat sich nach der Vorstellung im Jahr 1994 durch Grimm [62] sehr rasch entwickelt. Aufgrund seiner verfahrensspezifischen Vorteile setzt es sich in immer mehr Industriezweigen durch. Die Anwendungsbereiche sind vielseitig. Im Consumerbereich wird das Laserdurchstrahlverfahren für exakte Schweißnähte verwendet, die das Erscheinungsbild der Produkte prägen. Eine makellose Schweißnaht, wie z.B. beim Fügen von Handyschalen [87] sind Randbedingungen, die ohne weiteres erfüllt werden können. In der Mikrotechnik wird das Verfahren meist dort eingesetzt, wo ein Maximum an Funktionalität in ein Minimum an Raum integriert werden muss. Eine Anwendung ist das Verschweißen von Mikropumpen mit einer Abmessung von 12 x 12 x 3,5 mm [107]. In der Medizintechnik werden mittels Laserstrahlung Brillengläser aus PMMA und PC an die Bügel gefügt [67] oder auch Produkte aus unterschiedlich zusammengesetzten Materialien hergestellt. Um Kontaminationen zu vermeiden, werden die metallischen Teile für Injektionsnadeln mit thermoplastischen Schraubverschlüssen verbunden [83]. Hierfür wird die Nadel restspaltlos in den thermoplastischen Verschluss eingesetzt und anschließend kurzzeitig durch den transparenten Thermoplasten hindurch mit Laserstrahlung bestrahlt. Die Strahlung wird von der Nadel absorbiert und in Wärme

umgewandelt. Über Wärmeleitungseffekte wird der Kunststoff erwärmt und umfließt die Nadel, wodurch eine formschlüssige Verbindung entsteht. In der Bauindustrie werden für Kunststofffenster zwei transparente Scheiben aus ABS auf den laserabsorbierenden Fensterrahmen aus PMMA auf einer Länge von 180 cm mit einem 100 W-Linienlaser verschweißt [67]. Die Vorschubgeschwindigkeiten erreichen bis zu 20 m/min. Für die Automobilindustrie werden bspw. Benzinfiltergehäuse aus PA 6 mit einer Taktzeit von nur etwa zwei Sekunden umlaufend im Durchstrahlverfahren gefertigt [67] oder mithilfe des Globoschweißverfahrens wasserdichte Nähte für Heckleuchten erzeugt [73]. Eine weitere Anwendung aus der Automobilindustrie bei der spezielle lasertransparente Additive eingesetzt werden, ist die Herstellung eines konturgeschweißten Luftsammlers des BMW M3 [108], der im Motorraum in einem System aus Polyamidbauteilen für die Luftführung eingesetzt wird. Hier wird ein lasertransparentes „Schwarzpigment“ für den oberen Fügepartner eingesetzt, um die für viele Kunststoffbauteile aus dem Motorraum typische Schwarzfärbung zu gewährleisten. Mit der Fertigung der Heckklappe des Renault Clio im Laserdurchstrahlverfahren [109] findet das Fertigungsverfahren erstmals Einzug in den automobilen Karosseriebau. Die faserverstärkte Türstruktur aus 3 mm dickem Polypropylen (PP) und einem Glasfaseranteil von 40 Vol.-% wird mit dem Türinnenblech verbunden. Neben der verbesserten Optik der Fügeverbindung kann durch den gezielten Einsatz neuer Werkstoffe das Gewicht der Heckklappe und damit des gesamten Fahrzeuges um etwa 2 kg gesenkt werden.

2.3 Einsatz des Lasers zur Bearbeitung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe

Entlang der Prozesskette gibt es eine Vielzahl von Anwendungsbereichen, bei denen Laserstrahlung im Zusammenhang mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen eingesetzt wird. Während des sog. Thermoplast-Tapelegeprozess werden thermoplastisch vorimprägnierte, formstabile, endlosfaserverstärkte Bänder zu Bauteilen verarbeitet [110]. Die Zykluszeiten zur Herstellung hochleistungsfähiger Leichtbaustrukturen werden dadurch deutlich reduziert. Neben der Bauteilherstellung wird Laserstrahlung zur Materialtrennung verwendet [111]. Die hohe Transmission der thermoplastischen Matrix führt zur partiellen Absorption der Energie ausschließlich an den Fasern. Örtlich können so hohe Temperaturen entstehen, die zum Abplatzen der Matrix um die Fasern führen. Zu einer deutlichen Steigerung der Schnittkantenqualität führt die Optimierung der Absorption an der Oberfläche durch Pigmentierung mit Ruß (Abschnitt 2.2.6.3). Im Bereich der Fügechnik beschränkt sich die Anwendbarkeit der Laserstrahlung bisher auf das Laserdurchstrahlfügen kohlenstofffaserverstärkter Bauteile (LA) mit lasertransparenten Bauteilen (LT). Limitierender Faktor ist hier der Einfluss der Fasern auf die optischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe [97]. Katsiropoulos [112] stellt in seiner Arbeit eine industrielle Anwendung vor, bei der unverstärkte Verstärkungsrippen auf Verbundmaterial (CF/PPS) gefügt werden. Die Fertigung zielt erfolgreich darauf ab, bei gleicher Festigkeit wirt-

schaftlicher zu sein, als das Nietverfahren. Das Durchstrahlverfahren findet vorrangig bei Polymeren wie PPS oder PEEK Einsatz, bei denen das Kleben aufgrund chemischer Resistenzen und dem damit einhergehenden Aufwand zur Oberflächenvorbehandlung nicht in Frage kommt. Diese Anwendungen unterscheiden sich durch das inhomogene Absorptions- und Wärmeleitungsverhalten der Verbundwerkstoffe [113]. Neben dem Verschweißen zweier Thermoplaste ist es ebenfalls möglich einen transparenten oberen Thermoplasten (PA66/GF30) auf einen kohlenstofffaserverstärkten Duroplasten im Durchstrahlverfahren mit Festigkeiten von bis zu $12,5 \text{ N/mm}^2$ zu fügen [114]. Wegen der fehlenden Aufschmelzung des duroplastischen Fügepartners wird von laserbasiertem Schmelzkleben gesprochen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

3.1 Ableitung des Handlungsbedarfs und Zielsetzung

Der Einsatz von Kohlenstofffaserverstärkung für thermoplastische Faserverbundkunststoffe ist, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, aus einigen Anwendungsbereichen, speziell der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie nicht mehr wegzudenken. Vielfältige Verfahrensvorteile sowie fortwährende Erweiterungen der Kenntnis fundamentaler Wirkprinzipien haben dazu geführt, dass sich das Laserstrahlschweißen im Durchstrahlverfahren als Fügeverfahren für unverstärkte und kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste industriell etablieren konnte. Auch die Anwendung des Verfahrens in Verbindung mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen als laserabsorbierendem Fügepartner wurde bereits untersucht und erste Anwendungsbeispiele vorgestellt. Daraus resultiert, dass eine zwingende Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung des Laserdurchstrahlschweißverfahrens die Verwendung mindestens eines lasertransparenten Fügepartners ist. Denn wie in Abschnitt 2.2 ausgeführt, ist die Kombination zweier kohlenstofffaserverstärkter Thermoplaste demzufolge unter Anwendung der Lasertechnologie bisher nicht möglich.

Um die verfahrensspezifischen Vorteile des Laserdurchstrahlschweißens auch der Fügechnik für CFRTP zugänglich zu machen, ist eine Erweiterung der in Abschnitt 2.2.4.2 beschriebenen Verfahrensvarianten erforderlich. Ziel der Arbeit ist daher die Entwicklung einer prozesstechnischen Lösung zum Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe, die Identifikation der Haupt- und Nebeneinflussgrößen sowie die experimentelle Untersuchung und Bewertung hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Schweißnahtqualität.

3.2 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Um die neuentwickelte Verfahrensvariante einer produktionstauglichen, wirtschaftlichen Nutzung zugänglich zu machen, ist neben der reinen Entwicklung, die Generierung eines grundlegenden Prozessverständnisses erforderlich. Wie in Bild 17 dargestellt, gliedert sich die vorliegende Arbeit hierzu inklusive Einleitung und Zusammenfassung in sieben Kapitel.

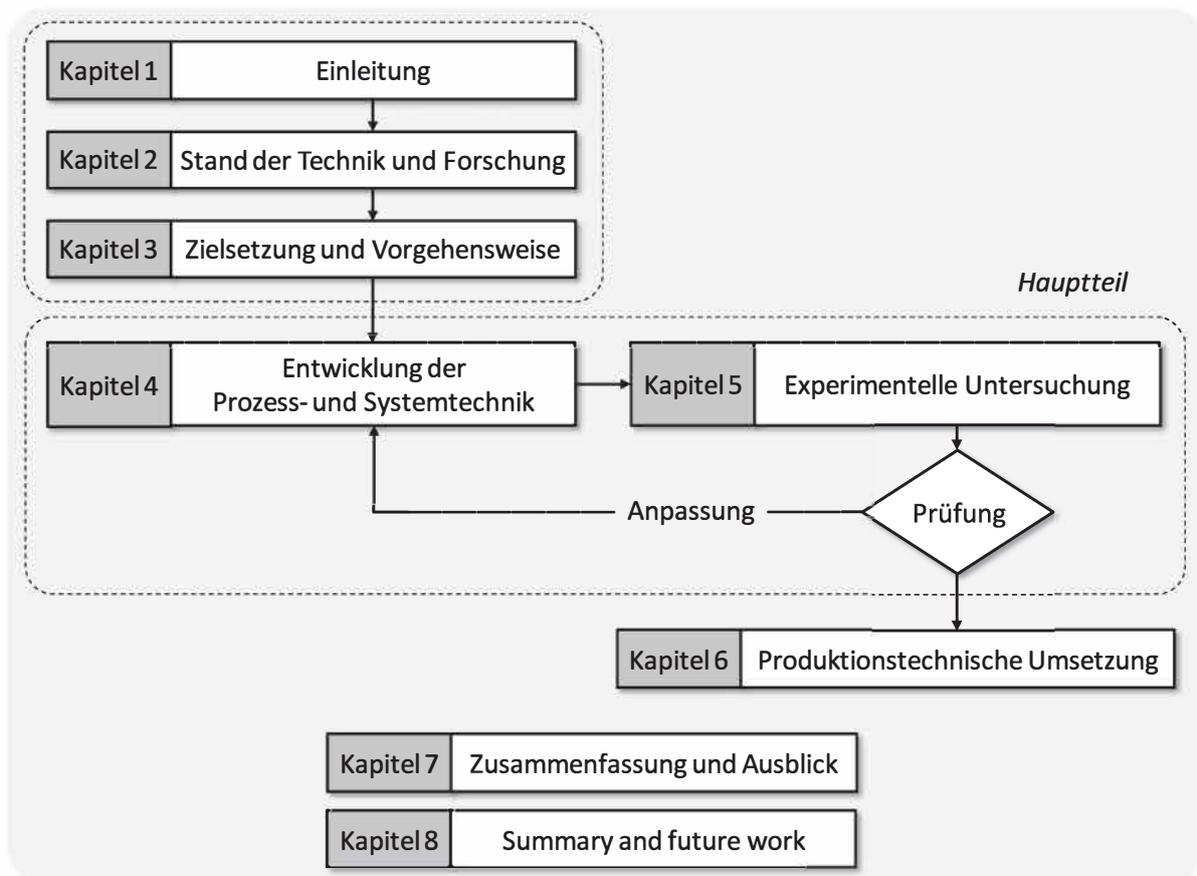


Bild 17: Gliederung der vorliegenden Arbeit

Nach der Einleitung in Kapitel 1 beschreibt Kapitel 2 den Stand der Forschung und Technik sowie die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen und Definition des Laserstrahlschweißens von Kunststoffen. Daraus wird in Kapitel 3 der Handlungsbedarf und die Zielsetzung abgeleitet sowie die Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit beschrieben.

Zur Entwicklung der Prozess- und Systemtechnik sowie der Generierung des grundlegenden Prozessverständnisses wird für den in Bild 17 dargestellten Hauptteil der Arbeit ein Lösungskonzept entwickelt, das in Bild 18 dargestellt ist.

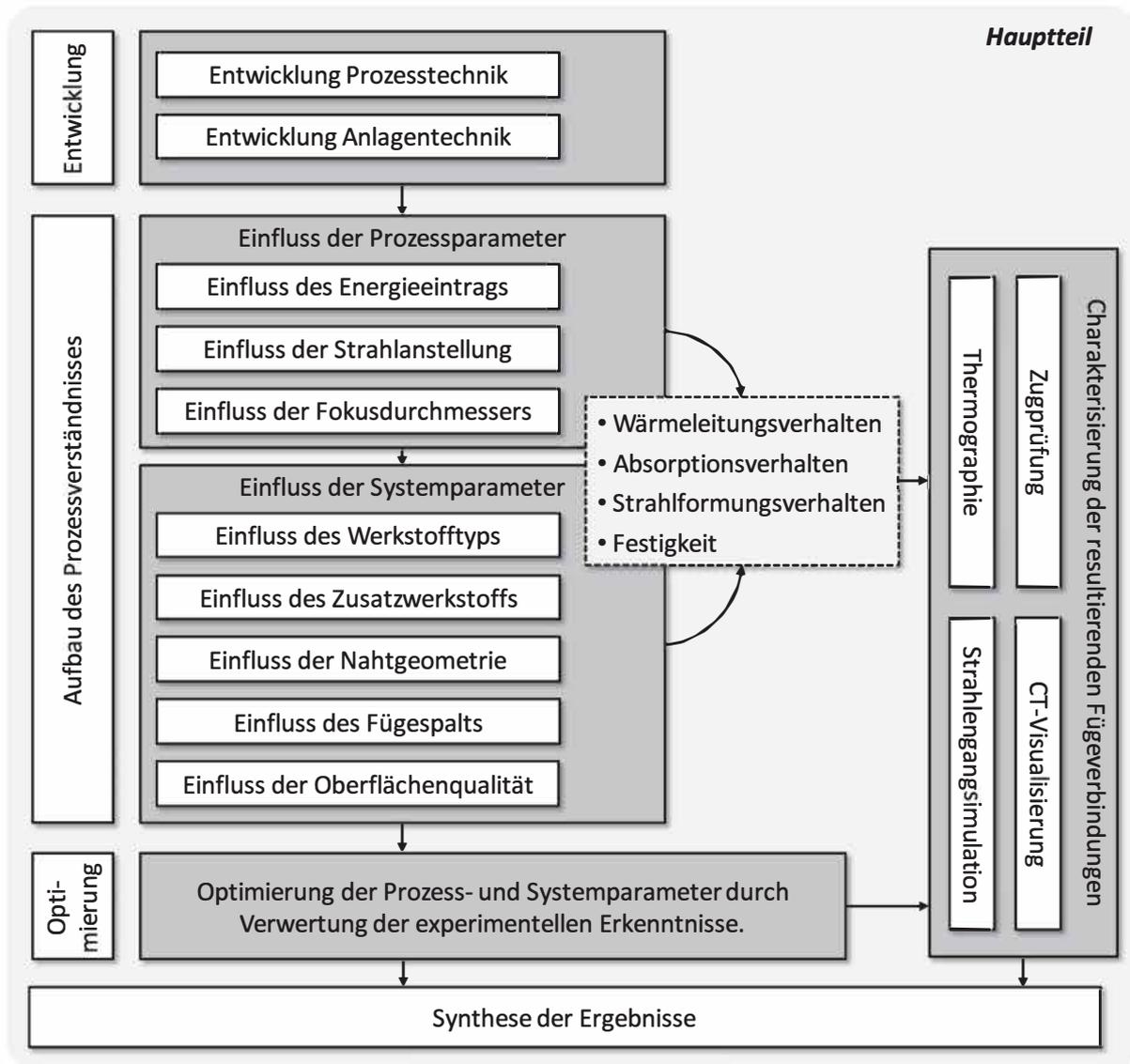


Bild 18: Schematische Darstellung des Lösungskonzeptes zur Entwicklung der Prozess- und Systemtechnik sowie des Aufbaus eines grundlegenden Prozessverständnisses

Das Lösungskonzept zur Erreichung der in Abschnitt 3.1 postulierten Zielsetzung ist in drei Abschnitte unterteilt. Abschnitt 1 (Kapitel 4) entwickelt eine prozesstechnische Lösung für das Laserstrahlschweißen kohlenstofffaserverstärkter Thermoplaste. Prozesstechnik und zugehörige Systemtechnik werden in Abschnitt 4.2 beschrieben. Die Einfluss- und Störgrößen werden abgeleitet und eine Auswahl getroffen, welche im Folgenden näher untersucht werden. Abschließend werden die verwendeten Versuchswerkstoffe und Auswertungsverfahren beschrieben. Abschnitt 2 (Kapitel 5) dient dem Aufbau des grundlegenden Prozessverständnisses. Nach der thermischen, optischen und mechanischen Charakterisierung der Versuchswerkstoffe wird der Einfluss der in Kapitel 4.2.3 vorausgewählten Einflussgrößen (Prozess- und Systemparameter) auf den Fügeprozess und die daraus resultierende Nahtqualität untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf dem Verhalten des kohlenstofffaserverstärkten Thermoplasten in Verbindung mit dem Zusatzwerkstoff, das vor allem über die drei physikalischen Effekte des Absorptions-,

Strahlformungs- und Wärmeleitungsverhalten sowie der daraus resultierenden, mechanischen Festigkeit charakterisiert wird. Die generierten Verbindungen werden visuell durch Vermessung der resultierenden Anbindungsfläche untersucht. Darüber hinaus kommen statische Festigkeitsprüfungen zum Einsatz. Die Charakterisierung des Fügeprozesses erfolgt vor allem durch die Detektion zugehöriger Temperaturfelder mittels thermographischer Methoden. Diese gestattet eine quantitative Auswertung der sich, infolge von Strahlungsabsorption und Wärmeleitung einstellenden Oberflächentemperaturen. Das Strahlformungsverhalten wird mittels einer Raytracingsimulation berechnet und mithilfe von Blindschweißungen validiert und verifiziert. Wie in Bild 17 angedeutet, bildet die experimentelle Untersuchung durch Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse zusammen mit der Entwicklung der Prozess- und Systemtechnik einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess, der in mehreren Iterationsschleifen durchlaufen wird. Als letzter Schritt werden die in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse in einer Synthese zusammengefasst.

In Kapitel 6 werden Bauteil- und Prozessgestaltungsrichtlinien für die Verfahrensvariante des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff aus den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 5 abgeleitet. Die Relevanz der im Rahmen der Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse für die Praxis wird abschließend anhand technologischer und wirtschaftlicher Betrachtungen bewertet.

Den Abschluss der Arbeit bilden die Kapitel 7 und 8 mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und dem Ausblick auf künftige Handlungsfelder.

4 Verfahrensentwicklung und Versuchsdurchführung

4.1 Verfahrensentwicklung

Als Grundlage einer zielorientierten, schnellen „Problemlösung“ wird für die Verfahrensentwicklung der in Bild 19 abgebildete Problemlösezyklus nach Ehrlenspiel [115] verwendet. Die drei Hauptschritte des Prozesses lauten:

- Ziel bzw. Problem klären
- Lösungsalternativen generieren
- Entscheidung herbeiführen

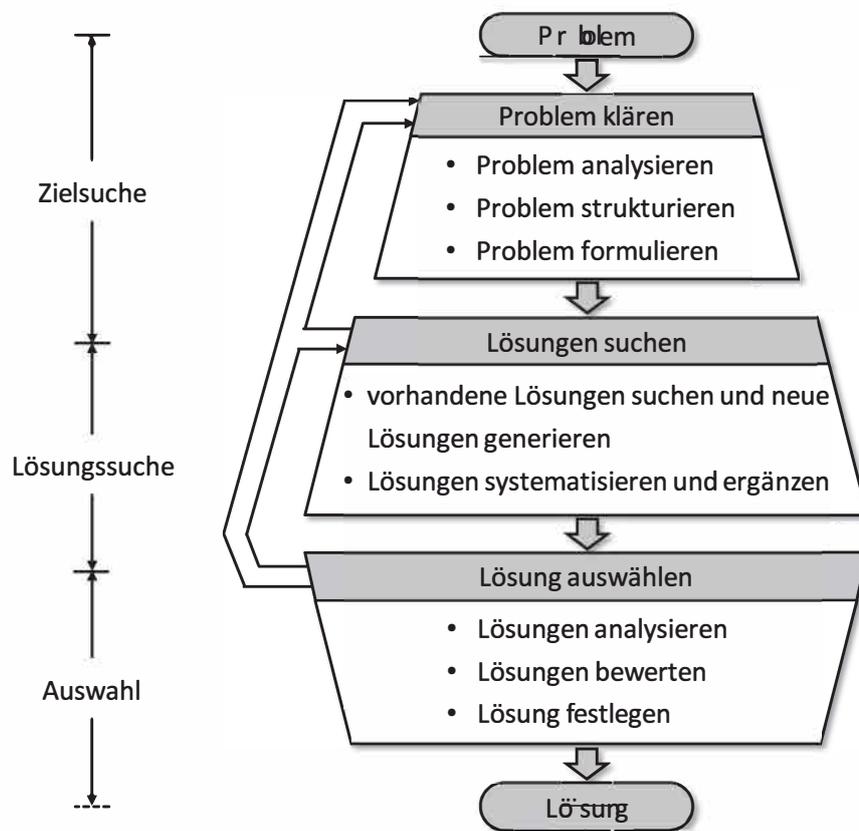


Bild 19: Problemlösezyklus nach Ehrlenspiel [115]

Der erste Schritt wurde in Abschnitt 3.1 im Rahmen der Zielsetzung definiert und umfasst die Entwicklung einer prozesstechnischen Lösung zum Fügen thermoplastischer Kohlenstofffaser-verbundwerkstoffe unter Nutzung der verfahrensspezifischen Vorteile der Lasertechnologie (Abschnitt 2.2.4.3). Die Generierung der Lösungsalternativen erfolgt auf Basis des Stands der Technik aus Kapitel 2. Die vorgestellten Verfahren zum Fügen thermoplastischer Polymere mit Laserstrahlung bieten eine Vielzahl gut automatisierbarer Verfahrensvarianten. Alle diese Va-

rianten haben jedoch eines gemeinsam: sie sind nur unter der Voraussetzung eines hohen Transmissionsgrads der zu verbindenden Werkstoffe anwendbar. Ein möglicher Lösungsansatz ist die lokale Begrenzung der Verstärkungsfasern. Die Fügezonen wären frei von absorbierenden Kohlenstofffasern. Im Hinblick auf eine spätere Serienanwendung des Verfahrens führt diese Forderung jedoch zu einer aufwändigen und kostenintensiven Bauteilherstellung. Ein weiterer Lösungsansatz wird aus dem Bereich des Heißgasschweißens abgeleitet. Dieses Verfahren benötigt kaum Vorbereitungen der Fügepartner, ist dafür mit einem hohen Wärmeeintrag in das Werkstück verbunden und nur bedingt automatisierbar. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine weitere Verfahrensvariante des Laserstrahlschweißens von Kunststoffen entwickelt, die das Verfahrensprinzip des Heißgasschweißens mit den verfahrensspezifischen Vorteilen der Lasertechnologie verbindet: das Laserstrahlschweißen mit spezifischem Zusatzwerkstoff. Es wird in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

4.2 Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff

4.2.1 Prozessbeschreibung

Wie der Name des Verfahrens bereits suggeriert, wird für das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff neben den beiden Fügepartnern ein Zusatzwerkstoff verwendet. Die beiden Fügepartner werden im Überlapp mit einer Kehlnaht verbunden. Der Zusatzwerkstoff dient als Haftvermittler und wird in Form eines endlosen Monofilaments zugeführt (Bild 20). Er wird benötigt, um den Anbindungsquerschnitt der beiden kohlenstofffaserverstärkten Thermoplaste mit sehr hohen Faservolumengehalten von bis zu 50 Vol.-% zu gewährleisten. Der Zusatzwerkstoff wird gemeinsam mit den beiden Fügepartnern aufgeschmolzen und bildet so eine stoffschlüssige Verbindung¹⁰.

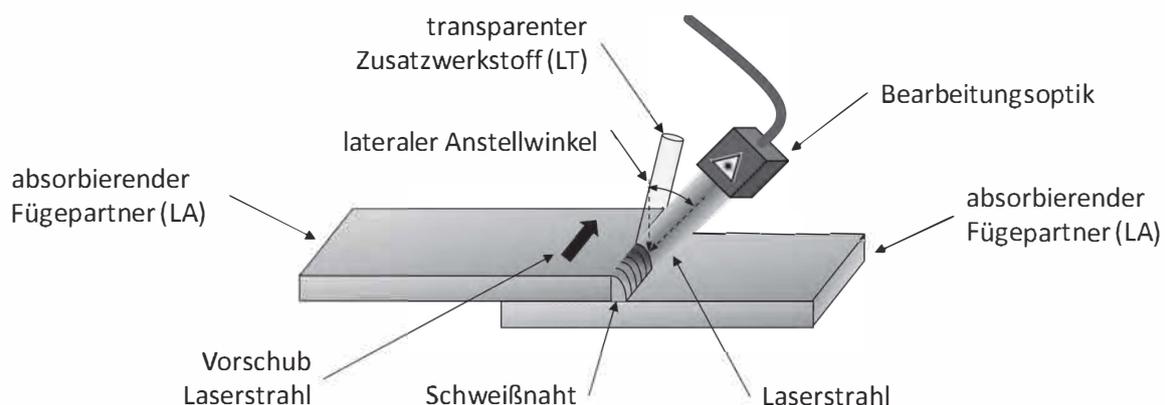


Bild 20: Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff

¹⁰ Da alle drei beteiligten Fügepartner während des Fügeprozesses aufgeschmolzen werden und eine stoffschlüssige Verbindung eingehen, handelt es sich bei dem beschriebenen Verfahren per Definition um Schweißen (Abschnitt 2.2.1).

Hauptunterscheidungsmerkmal der vorgestellten Verfahrensvariante zum konventionellen Laserdurchstrahlschweißen (Abschnitt 2.2.3) ist die Verwendung des thermoplastischen Zusatzwerkstoffs. Die entstehende Verbindungsqualität wird maßgeblich durch das Aufschmelzverhalten der drei beteiligten Fügepartner beeinflusst. Die auftreffende Laserstrahlleistung P_L wird vorrangig von den beiden laserabsorbierenden Organoblechen (LA) absorbiert. Der lasertransparente Zusatzwerkstoff (LT) wird anschließend über Wärmetransportmechanismen erwärmt und aufgeschmolzen.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung des Fügeverfahrens ist die Transmission der auftreffenden Laserstrahlung durch den lasertransparenten Zusatzwerkstoff. Aus diesem Grund spielen die optischen Werkstoffeigenschaften neben den thermischen eine wichtige Rolle.

4.2.2 Systemtechnik

Wie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben, bestehen konventionelle Laseranlagen für das Laserdurchstrahlfügen im Konturverfahren aus einer Anordnung aus Laserstrahlquelle, einem Handhabungssystem, einer Spanntechnik sowie einem Bearbeitungskopf zur Strahlformung und Fokussierung der Laserstrahlung auf das Werkstück. Im Falle der vorgestellten Verfahrensvariante wird darüber hinaus eine Fördereinrichtung für den verwendeten Zusatzwerkstoff benötigt, welche die Bereitstellung übernimmt.

4.2.2.1 Laserstrahlquelle und Strahlführung

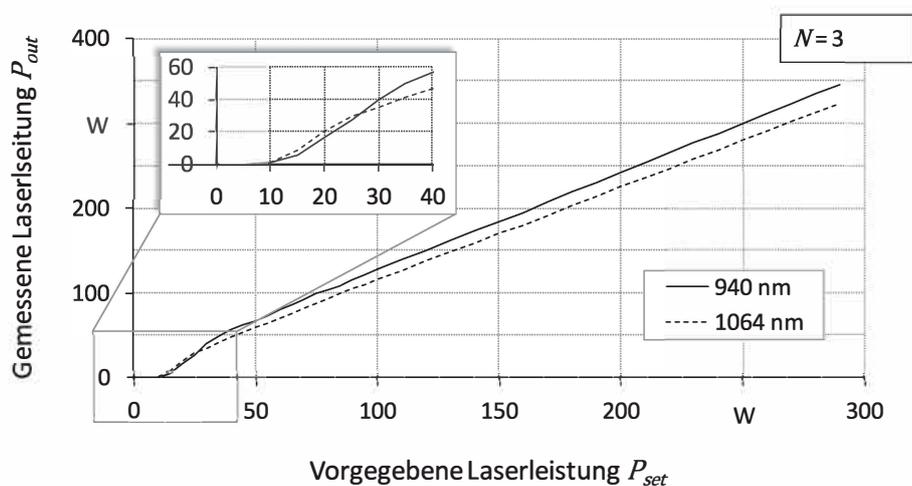
Als Laserstrahlquelle wird ein Hochleistungsdiodenlaser des Typs LDF 4000-30 der Firma Laserline GmbH mit einer maximalen Ausgangsleistung von 4 kW im Dauerstrichbetrieb (continuous wave) eingesetzt. Die Leistung setzt sich aus acht Diodenstapeln¹¹ mit vier unterschiedlichen Wellenlängen zusammen. Die Diodenstapel können jeweils einzeln zu- bzw. abgeschaltet werden, sodass geringe Laserleistungen bei nur einer spezifischen Wellenlänge emittiert werden können. Weitere technische Daten der verwendeten Laserstrahlquelle sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

¹¹ Die Funktionsweise und Entstehung von Diodenlaserstrahlung wurde in Abschnitt 2.2.5 bereits erläutert.

Table 1: Technische Daten des verwendeten Diodenlasers

Kennwerte	LDF 4000-30
Maximale Ausgangsleistung	4000 W
Betriebsart	cw, gepulst
Wellenlängen	940, 978, 1025, 1064 nm
Maximale Leistung pro Wellenlänge	1000 W
Strahlqualität	33 mm mrad

Die Strahlführung zur Bearbeitungsoptik erfolgt über zwei unterschiedliche Lichtwellenleiter mit den Kerndurchmessern $d_{k,1} = 1000 \mu\text{m}$ bzw. $d_{k,2} = 2000 \mu\text{m}$. Durch eine 10 m lange Faser kann die Laserstrahlung flexibel zur eingesetzten Bearbeitungsoptik geführt werden. Am Faserende entsteht ein top-hat-förmiges¹² Intensitätsprofil, das eine hohe Flankensteilheit und eine relativ gleichförmige Ebenheit über dem Strahlquerschnitt besitzt. Um reproduzierbare Versuche zu gewährleisten, wird die emittierte Laserleistung der Strahlquelle mit allen im Strahlengang befindlichen optischen Elementen (LLK, Optik) vermessen. Das verwendete Leistungsmessgerät des Typs Fieldmaster GS/LM-200 der Firma Coherent GmbH besitzt eine Messabweichung von maximal 5 %.

**Bild 21:** Nach der Bearbeitungsoptik gemessene Laserleistung bezogen auf die Vorgabe an der Strahlquelle

Die Messergebnisse in Bild 21 zeigen einen deutlich nichtlinearen Verlauf, der am Werkstück gemessenen mittleren Laserleistung (P_{out}) bezogen auf die vorgegebene Leistung (P_{set}) im unteren Leistungsbereich ($P_{set} < 40 \text{ W}$). Dies resultiert aus der Auslegung der Strahlquelle für

¹² Engl. Bezeichnung für ein radial homogenes, zylinderförmiges Strahlungsintensitätsprofil mit steilen Flanken [142].

hohe Leistungsbereiche. Die gemessene Wiederholgenauigkeit der emittierten Laserleistung liegt deutlich über 99 %.

4.2.2.2 Bearbeitungsoptik

Im Rahmen dieser Arbeit wird für sämtliche Schweißversuche die Laserstrahlschweißoptik des Typs PDT der Firma HIGHYAG verwendet. Es handelt sich um eine taktile Laserbearbeitungsoptik mit integrierter taktile Nahtführung (Bild 22). Die Nahtführung übernimmt das Anfahren und Auffinden der Bearbeitungsstelle und führt den Laserfokus während des Fügeprozesses über das Werkstück. Dadurch können Bauteiltoleranzen und Schwankungen der Führungsmaschine durch laterale und horizontale Ausgleichsbewegungen des Teleskoparms ausgeglichen werden. Beim sogenannten Führfinger handelt es sich um eine Wolframkarbidspitze die am Teleskoparm befestigt ist. Um eine sichere Führung der Sensorspitze in der Fügezone zu gewährleisten, wird eine Anpresskraft vorgegeben. Die Kraft ist nach Richtung und Größe frei wählbar und kann während des Bearbeitungsvorgangs entsprechend der Bauteilgeometrie beliebig angepasst werden. Die Optik vereint somit Strahlformung und Nahtführung in einem Gerät. Der Fokuspunkt des Laserstrahls ist fest mit der Bewegung des Teleskoparms gekoppelt und wird durch das Autofokusmodul automatisch nachgeregelt.

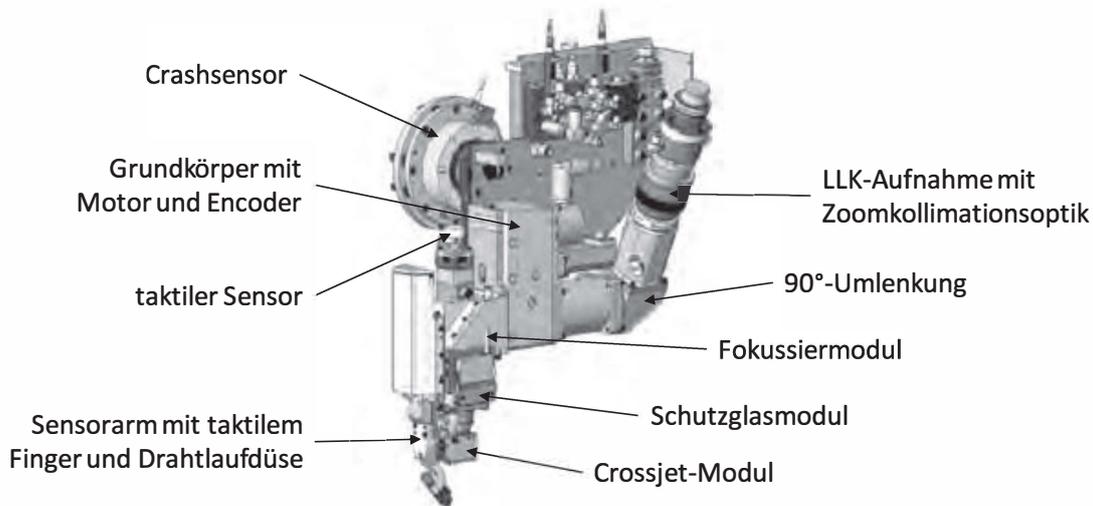


Bild 22: Aufbau der taktile Bearbeitungsoptik [116]

Die Optik verfügt neben den optischen Komponenten zur Strahlfokussierung ($M_{Fok} = 1$) und Strahlumlenkung über eine Zoomkollimation (M_{Koll}), die es ermöglicht das Abbildungsverhältnis zwischen einfallendem und austretendem Strahl zwischen 1,1 und 1,7 zu variieren.

$$d_f = M_{Fok} \cdot M_{Koll} \cdot d_k \quad (7)$$

Der resultierende Fokusdurchmesser d_f des Laserstrahls auf dem Werkstück kann mithilfe der Formel 7 aus dem Abbildungsfaktor der Kollimation M_{Koll} , der Fokussierung M_{Fok} sowie dem

Faserkerndurchmesser d_k berechnet werden. Mit den beiden unterschiedlichen Lichtleitfasern ($d_{k,1}$ und $d_{k,2}$) ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten, möglichen Arbeitsbereiche des Laserfokus.

Tabelle 2: Verfügbare Konfigurationen und daraus resultierende Fokusdurchmesser

Kennwerte		$d_{k,1}$	$d_{k,2}$
Faserkerndurchmesser	d_k	1000 μm	2000 μm
Abbildungsfaktor der Fokussierung	M_{Fok}	1,0	1,0
Abbildungsfaktor der Kollimation	M_{Koll}	1,1 - 1,7	1,1 - 1,7
Laserstrahldurchmesser im Fokus	d_f	1,1 - 1,7 mm	2,2 - 3,4 mm

Um genaue Kenntnisse über die Intensitätsverteilung der verwendeten Laserstrahlung zu erhalten, wird die Strahlkaustik nach der Bearbeitungsoptik mithilfe eines Strahl diagnosesystems (Focus Monitor FM) der Fa. Primes vermessen. Neben der Intensitätsverteilung der Strahlung in einzelnen Ebenen können Strahlkaustik, Fokusdurchmesser und -position der Laserstrahlung ermittelt werden. Die vom Diagnosegerät ermittelte Strahlkaustik sowie die top-hat-förmige Intensitätsverteilung im Fokus nach der Bearbeitungsoptik ist in Bild 23 dargestellt.

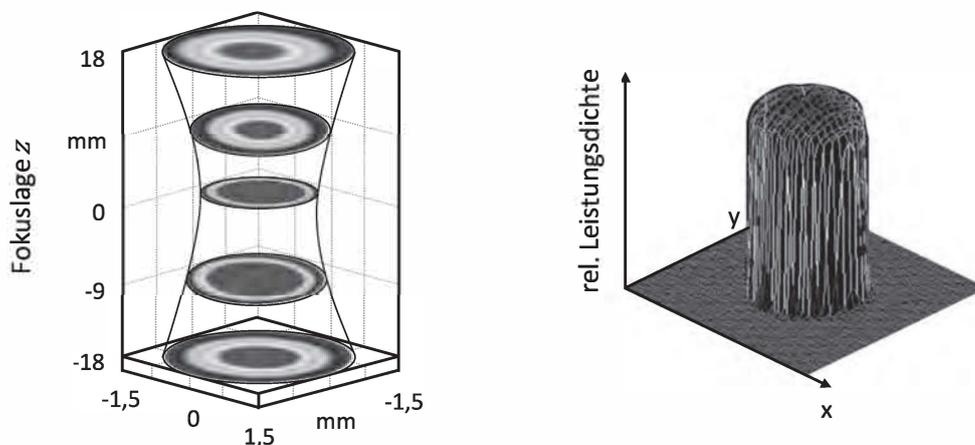


Bild 23: Strahlkaustik (links) und Intensitätsverteilung im Fokus (rechts) bei $P_L = 50 \text{ W}$, $d_f = 1,6 \text{ mm}$ und $\lambda = 940 \text{ nm}$

Um die optischen Komponenten vor Verschmutzungen zu schützen, verfügt die Optik über ein integriertes Cross-Jet-Modul, wodurch Spritzer und Schweißrauch über einen gebündelten Druckluftstrom abgelenkt werden. Auf diese Weise wird die Beeinflussung der Strahlkaustik durch Verschmutzungen des Schutzglases weitestgehend vermieden.

4.2.2.3 Fördereinrichtung für den Zusatzwerkstoff

Die Zuführung des Zusatzwerkstoffs in die Fügezone während des Bearbeitungsprozesses übernimmt eine spezielle Fördereinrichtung des Typs DIX der Firma DINSE GmbH. Sie verfügt über ein Push-Push-Antriebskonzept mittels zweier, regelungstechnisch voneinander entkoppelter Antriebseinheiten. Dem drehzahlgeregelten Antrieb (DIX LK 60) obliegt die Prozessverantwortung und der momentgeregelte Antrieb (DIX WDS 300) limitiert die Vorschubkraft. Somit wird ein konstanter Vorlauf unabhängig von Torsion und Biegung der Garnitur sichergestellt. Mithilfe des Vorlaufensors (DIX DLS 200) wird die Geschwindigkeit des Zusatzwerkstoffs gemessen und überwacht. Die Anpress-/Förderrollen sind dabei speziell auf die Anforderungen zur Förderung des monofilen, polymeren Zusatzwerkstoffs angepasst.

4.2.2.4 Handhabungs- und Spanntechnik

Die Positionierung und die Realisierung der Vorschubbewegung der Bearbeitungsoptik wird in den durchgeführten Versuchen mithilfe eines Sechs-Achs-Knickarm-Roboters des Typs IRB 6640 130/3.2 der Fa. ABB umgesetzt (Bild 24). Die Traglast des Roboters beträgt 130 kg bei einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,07$ mm.

Die Fügeproben werden auf dem Bearbeitungstisch mit manuellen Kniehebelspannern fixiert. Um unerwünschte Unebenheiten der beiden Fügepartner auszugleichen und einen spaltfreien Kontakt der beiden Fügeflächen sicherzustellen, werden die Spannbacken möglichst nahe an der Fügezone positioniert.

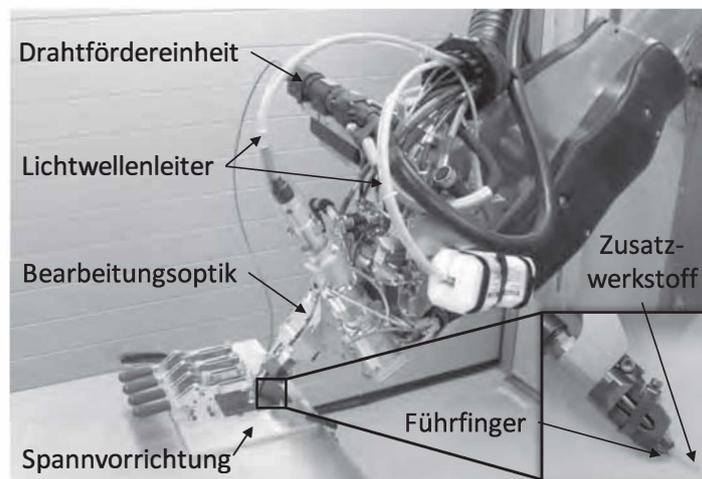


Bild 24: Versuchsaufbau mit Spannvorrichtung, Bearbeitungsoptik und Handhabungseinheit sowie die taktile Nahtführeinheit mit Führfinger und Zusatzwerkstoff im Detail

4.2.3 Ableitung und Auswahl der zu untersuchenden Einfluss- und Störgrößen

Die Einfluss- und Störgrößen auf den Laserstrahlprozess wurden im Stand der Technik in Abschnitt 2.2.6 bereits beschrieben. Aus der beschriebenen Prozess- und Systemtechnik des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff ergibt sich eine Reihe prozessspezifischer Einflussgrößen, die ein komplexes Feld an zueinander in Wechselwirkung stehenden Parametern aufzeigen. Die Ermittlung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Einfluss- und Störgrößen auf das Bearbeitungsergebnis erfordert eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen. Die gezielte Vernachlässigung bestimmter, das Ergebnis nicht beeinflussender Faktoren und ihrer Wechselwirkungen ermöglicht eine erhebliche Reduzierung des Versuchsaufwandes. Die Vorauswahl der zu betrachtenden Faktoren beeinflusst entscheidend die Ergebnisqualität. Sie erfordert somit ein hohes Maß an Expertenwissen und vollfaktorieller Voruntersuchungen zur Abschätzung tendenzieller Wirkzusammenhänge.

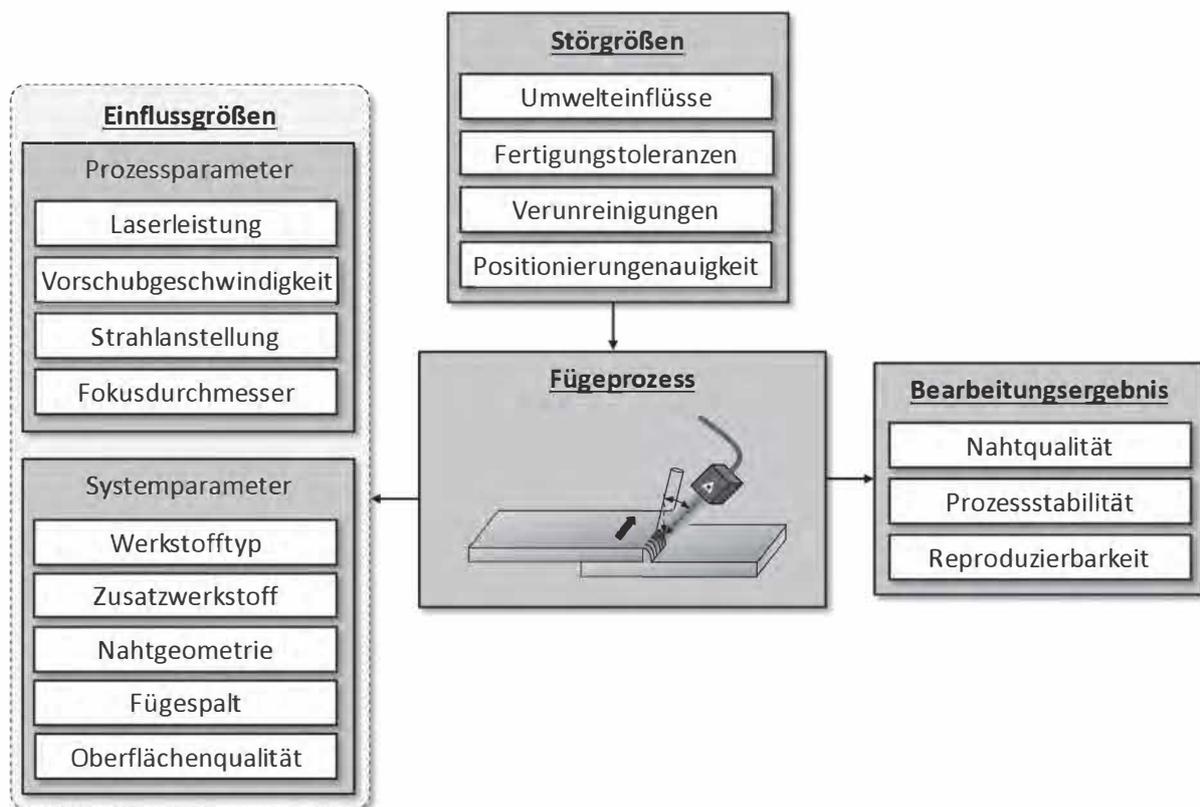


Bild 25: Die wichtigsten Einfluss- und Störgrößen auf den Prozess des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff (in Anlehnung an [117])

Die zu untersuchenden Einfluss- und Störgrößen werden anschließend anhand eines Wirkungsdiagramms sowie einer daraus abgeleiteten, gewichteten Einflussgrößenmatrix bewertet und ausgewählt. Die ausgewählten Einfluss- und Störgrößen werden in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an Oefele [117] um die Unterscheidung zwischen System- und Prozessparameter erweitert (Bild 25). Systemparameter werden bei der Auslegung der Bearbeitungsaufgabe festgelegt. Sie sind während der Bearbeitung nicht veränderbar. Prozessparameter hingegen, wie

z.B. Laserstrahlleistung, Bearbeitungsgeschwindigkeit oder Strahlanstellung, können während des Schweißprozesses verändert und durch den Bediener direkt an die Erfordernisse der Bearbeitungsaufgabe angepasst werden. Aus diesem Grund sind dies die wesentlichen Stellgrößen zur Beeinflussung des Schweißprozesses.

Die Identifizierung und Minimierung der Störgrößen ist für die erfolgreiche Versuchsplanung und -durchführung von entscheidender Bedeutung. Die Allgemeingültigkeit und die Übertragbarkeit der ermittelten Zusammenhänge werden dadurch sichergestellt.

4.3 Versuchsplanung und -durchführung

4.3.1 Versuchswerkstoffe

Die Auswahl der Versuchswerkstoffe erfolgt auf Basis der in Bild 3 vorgestellten Polymerpyramide unter Beachtung der technisch-materialspezifischen Eignung für das zu untersuchende Laserbearbeitungsverfahren sowie der wirtschaftlichen Bedeutung für potenzielle Anwendungsbereiche aus dem Automobilbau. Die wichtigsten Anforderungskriterien in diesem Zusammenhang sind:

- Temperaturbeständigkeit (Dauereinsatztemperatur über 80 °C)
- Rohstoffkosten (unter 3 €/kg)
- Niedrige Delaminationsneigung (hohe Bruchdehnung)
- Medienbeständigkeit gegenüber Kraftstoffe und Öle
- Hohe Transparenz gegenüber Laserstrahlung
- Herstellbarkeit endlosfaserverstärkter Halbzeuge (niedrige Schmelzviskosität)

Auf Basis der Anforderungsliste wird das teilkristalline Polyamid 6 (PA 6) ausgewählt, das im Rahmen dieser Arbeit als Versuchswerkstoff eingesetzt wird. PA 6 ist der Gruppe der Technischen Kunststoffe zuzuordnen (Abschnitt 2.1.1.1). Es zeichnet sich durch seine guten mechanischen Eigenschaften sowie Beständigkeit gegenüber Lösemittel, Kraftstoffe und Schmiermittel bei vergleichsweise geringem Preis aus [118].

Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff ist die Sicherstellung der Absorption der Laserstrahlung durch die beiden Fügepartner (LA). Das Matrixpolymer mit dem Handelsnamen Ultramid B3S der Fa. BASF kann sowohl unverstärkt mit Pigmentruß als Absorber, wie auch kohlenstofffaserverstärkt zum Einsatz kommen. Der Rußgehalt der pigmentierten Versuchswerkstoffe beträgt etwa 1 Gew.-%. Der quasiisotrope Aufbau (0°, 90°, ±45°) der Versuchswerkstoffe setzt sich aus unidirektional verstärkten Tapes zusammen, die im Doppelbandpressverfahren (Abschnitt 2.1.2) konsolidiert werden. Als Verstärkung kommen Kohlenstofffasern des Typs TRH50 60k der Fa. Grafil zum Einsatz. Bezugsquelle der verwendeten Versuchswerkstoffe ist die Fa. Thermoplast Composites. Tabelle

3 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten, thermoplastischen Polymere.

Tabelle 3: Übersicht der eingesetzten Versuchswerkstoffe

Nomenklatur	Dicke [mm]	Fasergehalt [Vol.-%]	Rußgehalt [Gew.-%]
PA 6 natur	2,0	0	0
PA 6 c.b.	2,0	0	1
PA 6 CF 30	2,0	30	0
PA 6 CF 42	1,0/2,0/3,0	42	0
PA 6 CF 42 c.b.	2,0	42	1

Neben den beschriebenen, laserabsorbierenden Werkstoffen wird für das untersuchte Verfahren ein lasertransparenter Zusatzwerkstoff in Form eines endlosen, monofilen Kunststoffstranges benötigt. Bei der Auswahl des Polymers ist auf die Überlappung der Schmelztemperaturbereiche sowie auf die Verträglichkeit der Schmelzen zu achten. Polymere, die sich ohne bzw. nur mithilfe von Zusatzadditiven mit PA 6 verschweißen lassen, zeigt der Auszug aus der Schweißmatrix in Tabelle 4.

Tabelle 4: Auszug aus der Schweißmatrix zum Verschweißen von PA 6 [119]

	PS	PP	PA 612	PA 6	PA 66	PBT	PES	PEEK
PA 6	o	o	o	+	+	-	-	-

- keine Verbindung o schlechte Verbindung + gute Verbindung

Als Basis für den verwendeten Zusatzwerkstoff dient folglich ebenfalls das vorgestellte PA 6 (Ultramid B3S). Variiert werden einerseits die Form des Zusatzwerkstoffs, andererseits der Gehalt der Rußpigmentierung. Tabelle 5 gibt einen Überblick der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Zusatzwerkstoffe. Sofern der Zusatzwerkstoff im Folgenden nicht näher spezifiziert wird, handelt es sich um den kreisrunden, unpigmentierten Zusatz mit dem Durchmesser $d_z = 1,6$ mm.

Table 5: Übersicht der eingesetzten Zusatzwerkstoffe

Rußgehalt [Gew.-%]	Durchmesser [mm]	Form
0	1,6 / 2,0 / 3,0	●
0	2,0	▲
0,01	1,6	●
0,02	1,6	●
0,05	1,6	●

4.3.2 Versuchsauswertung

Die Beurteilung der Fügenahtqualität (Abschnitt 2.2.7) der im Rahmen dieser Arbeit gefügten Proben erfolgt anhand mehrerer Bewertungskriterien (Zielgrößen) und spezifischer Prüfverfahren. In Bild 26 werden diese Prüfverfahren in zerstörungsfreie, morphologische und Festigkeitsprüfung unterteilt.

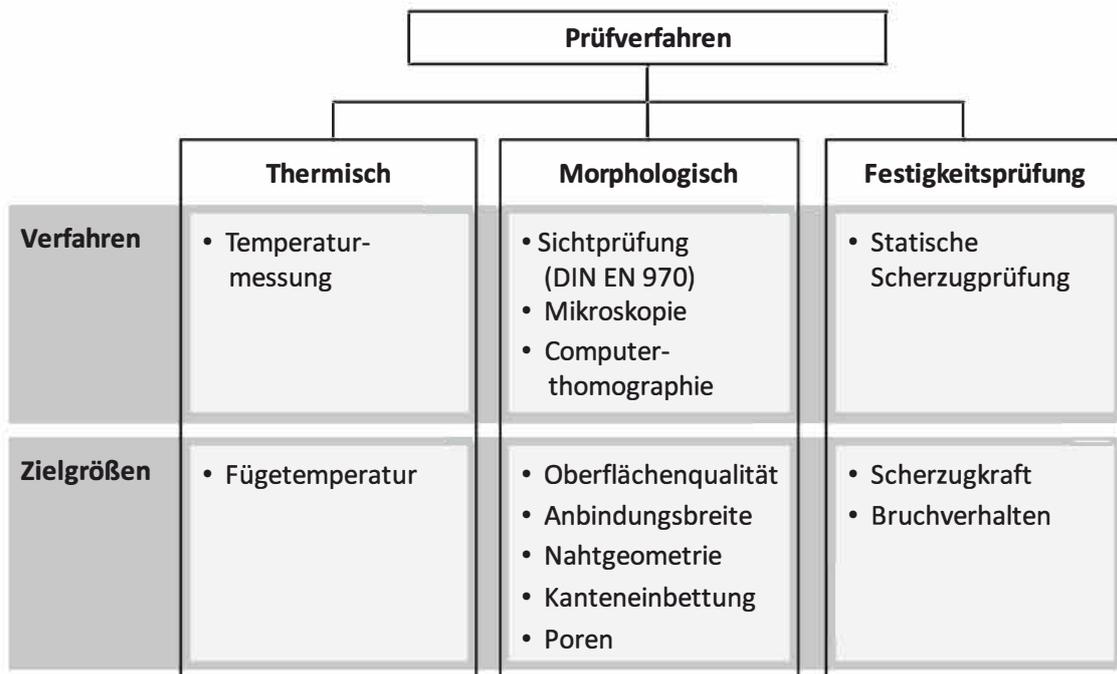


Bild 26: Verwendete Prüfverfahren und zugehörige Zielgrößen zur Beurteilung der Schweißnahtqualität

Um bei der Bewertung und Dokumentation der Versuchsergebnisse ein effizientes Vorgehen sicherzustellen, wird die in Bild 27 (links) dargestellte Vorgehensmethodik in Anlehnung an Oefele [117] angewendet. Nach einer optischen Überprüfung der Schweißnähte im Hinblick auf fehlende Anbindung (1) und Oberflächenqualität (2) werden die Schweißnähte mithilfe

morphologischer (3), thermischer (4) und zerstörender (5) Prüfverfahren analysiert und die Ergebnisse in einer Versuchsdatenbank abgelegt (6).

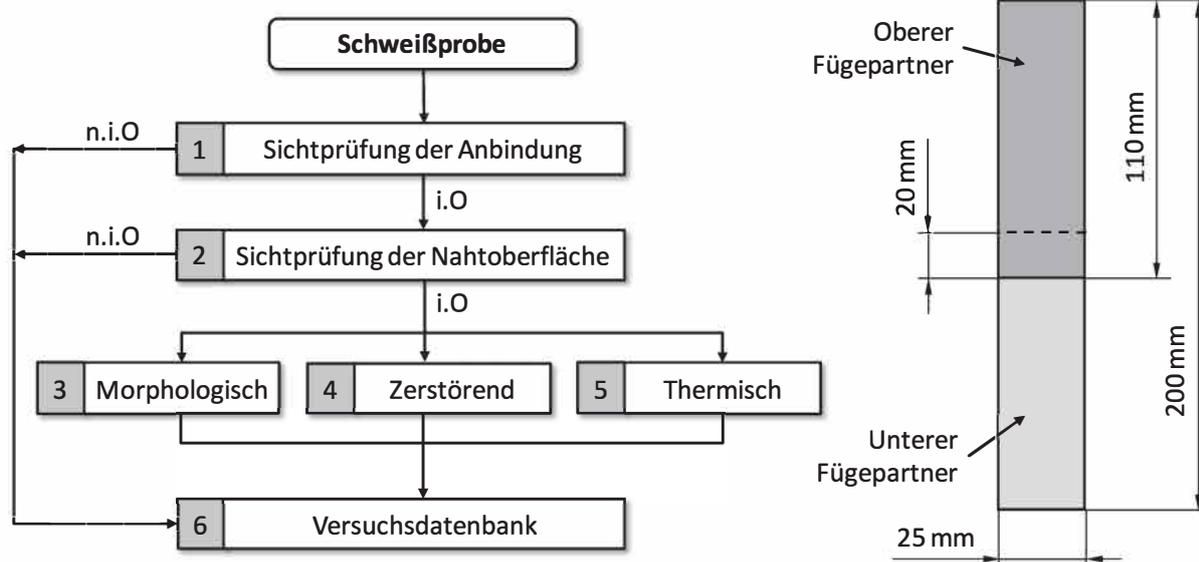


Bild 27: Vorgehensmethodik zur Bewertung der Versuchsergebnisse (links) sowie Geometrie der Zugscherproben (rechts)

Die zerstörende Prüfung zur Bestimmung der Nahtfestigkeit und zur Analyse des Bruchverhaltens wird mithilfe von Zug-Scher-Versuchen durchgeführt. Die Prüfung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 [120] mit einer Zugprüfmaschine des Typs „Inspekt Table 10 kN“ der Fa. Hegewald und Peschke anhand der in Bild 27 (rechts) dargestellten Probengeometrie im Überlapp. Die Orientierung der obersten 0°-Lage der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen quasiisotropen Endlosfaserverstärkung im Prüfkörper ist stets parallel zur Zugrichtung angeordnet. Senkrecht dazu werden die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs durch die geringe Probengeometrie deutlich geschwächt. Die Prüfkraft wird mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min kontinuierlich bis zum Versagen des Probekörpers erhöht. Die maximal über die Schweißverbindung übertragbaren Schubspannungen werden durch Aufnahme zugehöriger Zugscherfestigkeiten charakterisiert. Die Zugscherfestigkeit σ_A ist definiert als

$$\sigma_A = \frac{F_{max}}{A_L} \quad (8)$$

F_{max} steht in diesem Zusammenhang für die, aus dem Kraft-Weg-Diagramm ermittelte, maximale Prüfkraft und A_L für die Anbindungs- bzw. die Querschnittsfläche der Schweißnaht. Der Einfluss der anisotropen Absorptions- und Wärmeleitungsbedingungen, hervorgerufen durch die Kohlenstofffaserverstärkung innerhalb des laserabsorbierenden Fügepartners bewirkt ein ungleichmäßiges Aufschmelzen der Oberfläche. Dadurch kann der jeweiligen Schweißnaht keine konstante Anbindungsfläche zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit σ_A zugeordnet wer-

den. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird aus diesem Grund vornehmlich die längenbezogene Bruchkraft der Schweißverbindung σ_l als charakteristische Größe verwendet. Sie beschreibt die Bruckkraft, bezogen auf die Schweißnahtlänge l_s und wird im weiteren Verlauf der Arbeit vereinfacht als Bruchkraft bezeichnet.

$$\sigma_l = \frac{F_{max}}{l_s} \quad (9)$$

Als Qualitätskriterium für die Verbindungsqualität kann aus den ermittelten Kennwerten der in Abschnitt 2.2.7 bereits vorgestellte, einheitslose Kurzzeit-Schweißfaktor s (Formel 6) ermittelt werden.

Bestimmung der auftretenden Temperaturen während des Fügeprozesses und bei Blindschweißungen wird die Temperaturmessung mithilfe von Thermoelementen und thermographischen Verfahren gemessen. Der Aufbau zur experimentellen Untersuchung der auftretenden Füge-temperaturen ist in Bild 28 dargestellt. Die technischen Spezifikationen der im mittleren Infrarotbereich arbeitenden Thermokamera sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

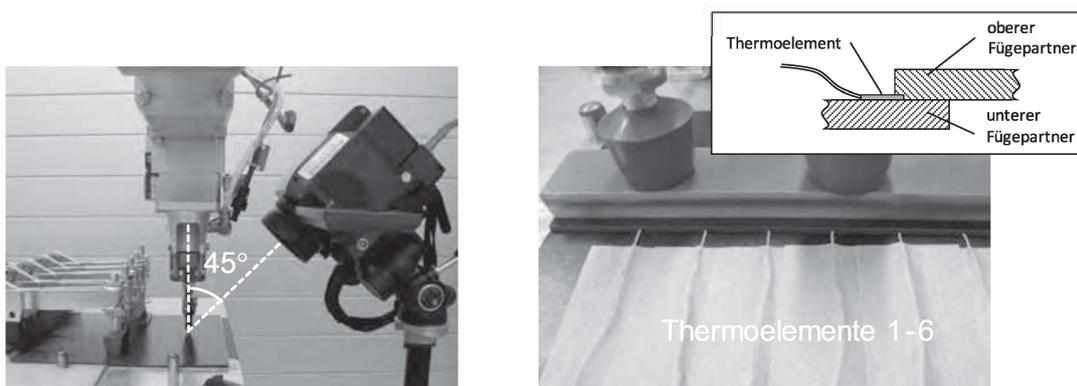


Bild 28: Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der auftretenden Füge-temperaturen mittels Thermokamera (links) und Thermoelementen (rechts)

Die Aufzeichnung der Temperaturfelder zur Beurteilung der Temperaturverteilung erfolgt im Wesentlichen bei Blindschweißungen mithilfe der thermographischen Analyse. Im verwendeten Versuchsaufbau bildet die Detektionsrichtung der Thermokamera mit dem Laserstrahl einen Winkel von 45° (Bild 28 links). Anhand trigonometrischer Beziehungen werden im Anschluss an die experimentellen Untersuchungen die tatsächlichen Geometrien berechnet. Zur Bestimmung konkreter Temperaturwerte aus der detektierten Strahlungsleistung der Thermokamera ist die Kenntnis des thermischen Emissionskoeffizienten ε_{th} zwingend erforderlich. Da ε_{th} selbst temperaturabhängig ist und vom jeweiligen Aggregatzustand abhängt, dürfen die gemessenen Temperaturen nicht direkt mit realen Temperaturwerten gleichgesetzt werden. Die Qualifizierung des Messverfahrens erfolgt zu diesem Zweck durch Kalibrierung der Temperaturwerte bei bestimmten temperierten Proben sowie durch Validierung mit Thermoelementen. Der

dabei ermittelte Emissionskoeffizient beträgt $\varepsilon_{th} = 0,92$. Er wird für die folgenden Untersuchungen verwendet und wird für alle verwendeten laserabsorbierenden Werkstoffe als konstant betrachtet.

Tabelle 6: Technische Spezifikationen der verwendeten Thermokamera [121]

Thermokamera	
Hersteller	Fa. InfraTec
Modell	VarioCam hr research 600
Detektor	ungekühltes Mikrobolometer Focal Plane Array
Auflösung	640 x 480 IR-Pixel
Aufnahmefrequenz	50 Hz
Messbereich	-40 - 1200 °C
Spektralbereich	7,5 - 14 μm
Genauigkeit	$\pm 1 \%$

Neben den vorgestellten Prüfverfahren zur Beurteilung der Fügenahtqualität werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit geeignete Messverfahren zur Charakterisierung der optischen, thermischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften angewendet.

Die Bestimmung der optischen Eigenschaften erfolgt mithilfe des Ulbrichtkugel-Messaufbaus in Bild 29. Die Messkugeln, die auf ihrer Innenfläche eine hochreflektierende Goldbeschichtung besitzen, reflektieren die einfallende Strahlung vielfach, bis sie gleichmäßig über der Kugelinnenfläche verteilt ist. Eine Photodiode an der Kugelinnenfläche dient als Detektor für die einfallende Strahlung. Durch die Anordnung der Hohlkugeln oberhalb und unterhalb der zu messenden Probe wird die gesamte, in den jeweiligen Halbraum reflektierte bzw. transmittierte Leistung integral erfasst. Die Absorption wird als Differenz zwischen der eingestrahelten Leistung und der Summe der beiden aufgezeichneten Werte berechnet. [122]

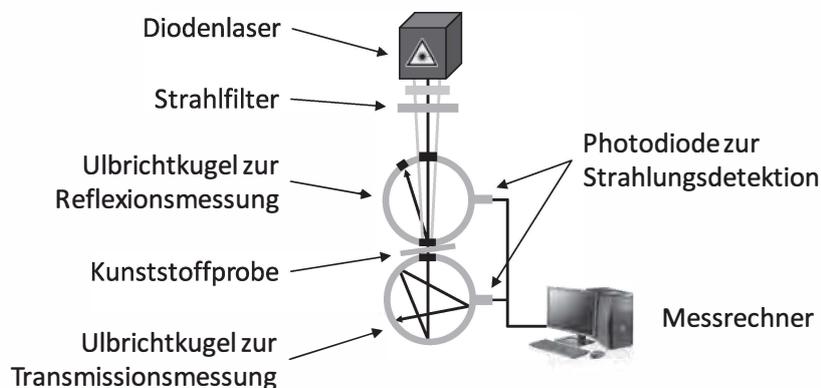


Bild 29: Messaufbau zur Bestimmung des Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrads einer Polymerprobe [122]

Die thermischen Eigenschaften werden mithilfe der DSC¹³-Analyse ermittelt. Im Verlauf der DSC-Analyse wird eine geringe Menge der zu untersuchenden Materialprobe über die Schmelztemperatur und gegebenenfalls in einer zweiten Messung über die Zersetzungstemperatur hinaus erwärmt und anschließend kontrolliert abgekühlt. Die Menge der zu- bzw. abgeführten Energie (Wärme), die nötig ist, um eine gleichmäßige Erwärmung oder Abkühlung pro Zeiteinheit sicherzustellen, wird gemessen. Das eingesetzte Wärmestrom-Differenzkalorimeter DSC 822^e der Fa. Mettler Toledo ermöglicht Messungen bis zu einer Maximaltemperatur von 500°C bei programmierbaren Heizraten von 0,01 bis 20 K/min. Der DSC-Sensor detektiert Wärmeströme bis 350 mW bei einer Auflösung kleiner 0,04 μW. Die Fehlergrenzen dieses Messgerätes liegen bzgl. der Temperaturbestimmung bei 0,2°C und bzgl. der Ermittlung des Wärmestroms bei 0,6 J/g. [123]

Mithilfe der DSC-Messungen wird die spezifische Wärmekapazität der Versuchswerkstoffe bestimmt. Die spezifische Wärmekapazität c_p ist direkt proportional zum Wärmestrom, der durch die DSC-Analyse bestimmt wird [124].

$$c_p = \frac{dQ}{dT} \cdot \frac{1}{m} \quad (10)$$

¹³ engl. DSC (Differential Scanning Calorimetry), dt. DDK (Dynamische Differenzkalorimetrie)

5 Experimentelle Untersuchung

5.1 Werkstoffcharakterisierung

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Versuchswerkstoffe wurden in Abschnitt 4.3.1 bereits vorgestellt. Bei dem verwendeten Polyamid 6, das sowohl als Matrixwerkstoff, wie auch als Zusatzwerkstoff verwendet wird, handelt es sich um ein thermoplastisches Polykondensat mit der Summenformel $(C_6H_{11}ON)_n$. Die Zahl 6 im Namen gibt die Anzahl der Kohlenstoffatome des Monomers ϵ -Caprolactam an. PA6 ist ein teilkristalliner Werkstoff, der aus amorphen und kristallinen Bereichen aufgebaut ist. Der Kristallisationsgrad ist abhängig von den Abkühlbedingungen der jeweiligen Thermoplastschmelze. Die polyamidtypische Wasseraufnahme nimmt mit steigendem Kristallisationsgrad ab, wohingegen Festigkeit und Steifigkeit zunehmen. Der Werkstoff neigt damit zur Versprödung. Neben den mechanischen Eigenschaften werden durch den Kristallisationsgrad auch die thermischen und optischen Eigenschaften beeinflusst. [125]

In den folgenden Abschnitten 5.1.1 bis 5.1.3 werden die verwendeten Versuchswerkstoffe charakterisiert und die, für das Laserstrahlschweißen relevanten optischen, thermischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften bestimmt.

5.1.1 Optische Eigenschaften

Wie in Abschnitt 2.1 und 4.2.1 beschrieben, ist die Kenntnis des Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsverhaltens der eingesetzten Kunststoffe wesentliche Voraussetzung für die Beschreibung der Energieeinbringung in die Kunststoffe während des Schweißprozesses. Die Bestimmung der optischen Eigenschaften der eingesetzten Versuchswerkstoffe erfolgt mithilfe des in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Ulbrichtkugel-Messaufbaus.

Die Messergebnisse der ermittelten optischen Eigenschaften an ebenen Platten des unverstärkten PA6 mit einer Dicke von 2,0 mm sind in Bild 30 in Abhängigkeit der Wellenlänge dargestellt. Der untersuchte Werkstoff weist einen thermoplastischen spektralen Verlauf mit hohem Absorptionsvermögen im UV-Bereich und steigender Transmission im sichtbaren sowie im nahen Infrarotbereich auf. Für die Emissionswellenlänge des eingesetzten Diodenlaser von $\lambda = 940$ nm beträgt die Transmission T etwa 73 %. Die reflektierten und absorbierten Anteile der Strahlung liegen bei $R = 9$ % und $A = 18$ %. PA6 eignet sich dadurch als lasertransparenter Fügepartner für das Laserstrahlverfahren.

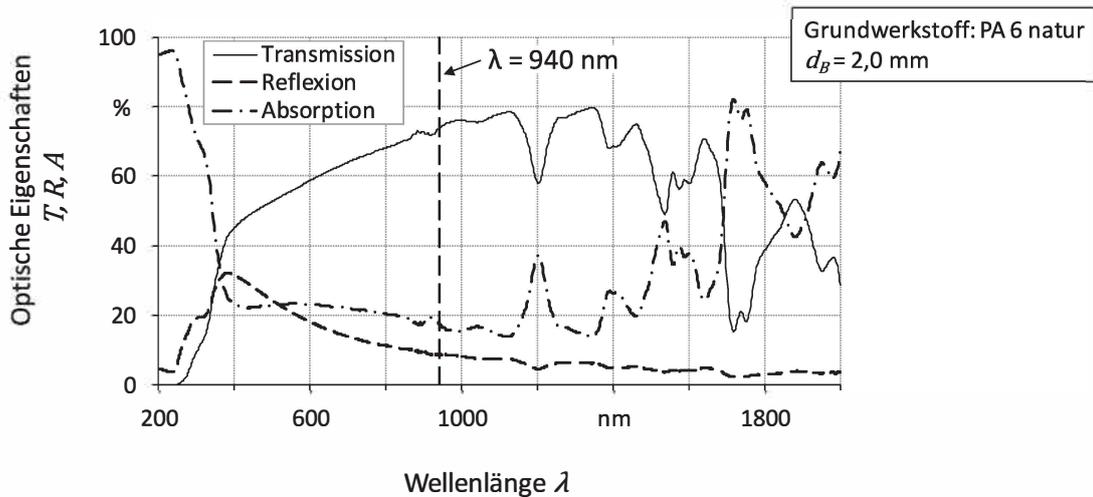


Bild 30: Transmittierter-, reflektierter- und absorbiertes Anteil der Laserstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge bei Verwendung des unverstärkten Matrixpolymers PA6

Neben der Wellenlängenabhängigkeit zeigt der teilkristalline PA6 eine deutliche Abhängigkeit der optischen Eigenschaften von der Werkstoffdicke. Dies ist vorrangig auf die Wechselwirkung der Strahlung mit Überstrukturen im Werkstoffinneren zurückzuführen. Durch die unterschiedlichen optischen Dichten amorpher und teilkristalliner Bereiche im Werkstoff kommt es in Abhängigkeit der Größenordnung der Strukturelemente im Polymer zusätzlich zur Streuung der Laserstrahlung an den Sphärolith-Lamellen (Abschnitt 2.1.1.1), bzw. zur Brechung und Reflexion an deren Grenzflächen [42]. Durch die Vielzahl der Grenzflächen und Streuzentren im Polymer wird die Strahlung beim Durchgang durch das Polymer mehrfach gestreut. Im Fall des verwendeten PA6 natur sinkt die Transmission bei Raumtemperatur aufgrund der beschriebenen physikalischen Vorgänge von $T = 81\%$ bei $d_B = 1,0\text{ mm}$ auf $T = 70\%$ bei $d_B = 3,0\text{ mm}$. Die Standardabweichung liegt dabei deutlich unter 2% und wird aus diesem Grund nicht abgebildet (Bild 31). Die Veränderungen sind primär auf die vergrößerte Absorption durch die beschriebene Wechselwirkung im Werkstoffinneren zurückzuführen, da die Reflexion R sowohl bei einer Werkstoffdicke von $d_B = 2,0\text{ mm}$, als auch bei $d_B = 3,0\text{ mm}$ etwa 9% beträgt. Aufgrund der zusätzlichen Vielfachreflexion nimmt der reflektierte Anteil zwischen $d_B = 1,0\text{ mm}$ und $d_B = 2,0\text{ mm}$ ebenfalls zu. Neben der Werkstoffdickenabhängigkeit zeigt der Reflexionsgrad eine Winkelabhängigkeit. Ist der Einfallswinkel größer 45° steigt die Reflexion stark an. Ein geringerer Anteil der Strahlung dringt in das Werkstück ein. Zur Untersuchung des winkelabhängigen Verlaufes des Reflexions- und Transmissionsgrads wird auf die Arbeit von Polster [91] verwiesen.

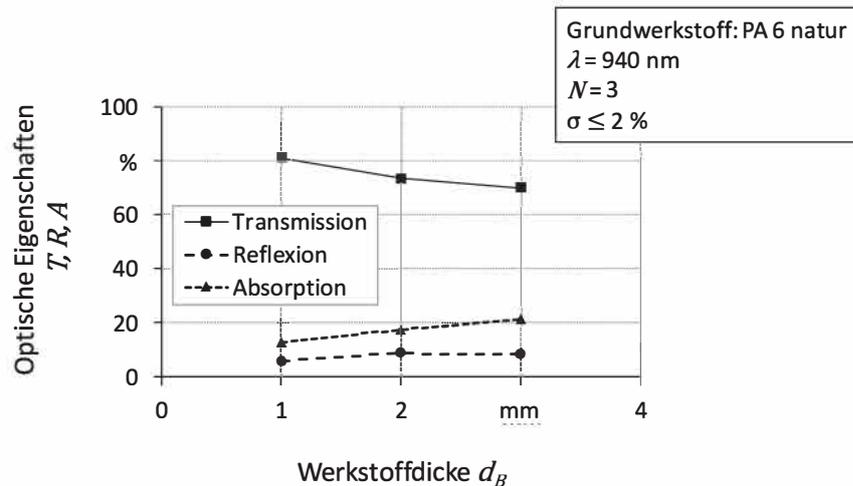


Bild 31: Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad des verwendeten PA 6 natur in Abhängigkeit der Werkstoffdicke

Pigmentruß zeigt gegenüber elektromagnetischer Strahlung ein ausgeprägtes Absorptionsverhalten in einem breiten Wellenlängenbereich. Der Wellenlängenbereich umfasst das gesamte Spektrum der sichtbaren, der ultravioletten und der infraroten Strahlung [92]. Aufgrund der Aggregate und Agglomerate, die von Ruß gebildet werden, kann die Streuung der Laserstrahlung an den Rußpigmenten beim Laserstrahlschweißen vernachlässigt werden. Durch Variation der prozentualen Gewichts zugabe können die optischen Eigenschaften der Kunststoffe für den Schweißprozess gezielt beeinflusst werden. Die Transmission T wird an unterschiedlich dicken Polyamidproben gemessen. Die Ergebnisse in Abhängigkeit des Rußgehaltes ω sind in Bild 35 dargestellt. Bereits sehr geringe Massenanteile Pigmentruß führen zu einer deutlichen Reduzierung der transmittierten Laserstrahlung. Abhängig von der untersuchten Probendicke führen Massenanteile zwischen 0,01 und 0,03 Gew.-% Pigmentruß zur totalen Absorption der Laserstrahlung.

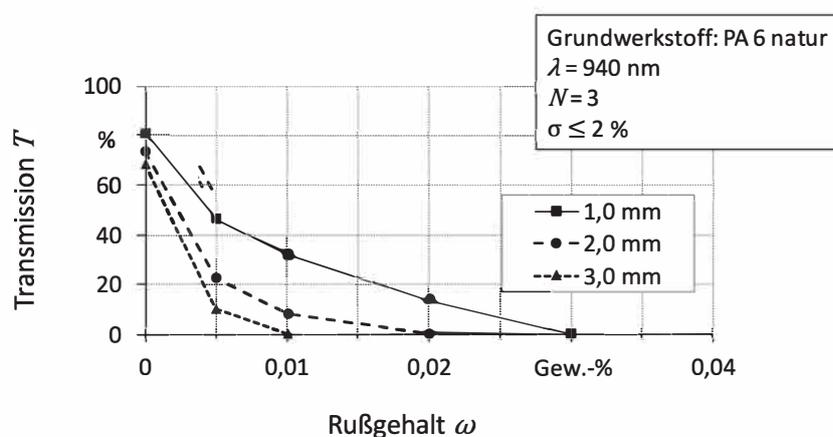


Bild 32: Einfluss des Rußgehaltes auf den Transmissionsgrad des verwendeten Polyamids 6

5.1.2 Thermische Eigenschaften

Neben den optischen Eigenschaften sind die thermischen Eigenschaften der Kunststoffe für das Laserstrahlschweißen von großer Bedeutung. So wird bspw. das Prozessfenster für das Fügen der Kunststoffe maßgeblich von der Schmelz- und Zersetzungstemperatur beeinflusst.

Bild 33 zeigt den Verlauf der spezifischen Wärmekapazität der verwendeten Versuchswerkstoffe. Die Wärmekapazität der untersuchten Werkstoffe steigt mit zunehmender Temperatur an. Während der Phasenumwandlung ist eine mehr oder weniger deutliche Abweichung von diesem Verlauf festzustellen. Bei teilkristallinen Thermoplasten führt die, bei der Kristallisation freiwerdende Kristallisationswärme zu einem deutlich ausgeprägten Maximum im Wärmefluss und folglich im Verlauf der spezifischen Wärmekapazität. Der Wärmefluss und damit die Wärmekapazität der faserverstärkten Proben sind deutlich geringer als bei unverstärkten Polymeren. Grund dafür ist die deutlich geringere Wärmekapazität der beinhalteten Kohlenstofffasern ($c_{p,25^\circ} = 0,7 \text{ J/gK}$) im Vergleich zu der umgebenden Matrix ($c_{p,25^\circ} = 1,7 \text{ J/gK}$) [126]. Durch den hohen Faseranteil stehen aber auch weniger kristalline Bereiche zur Ausprägung des Schmelzpeaks der Phasenumwandlung zur Verfügung.

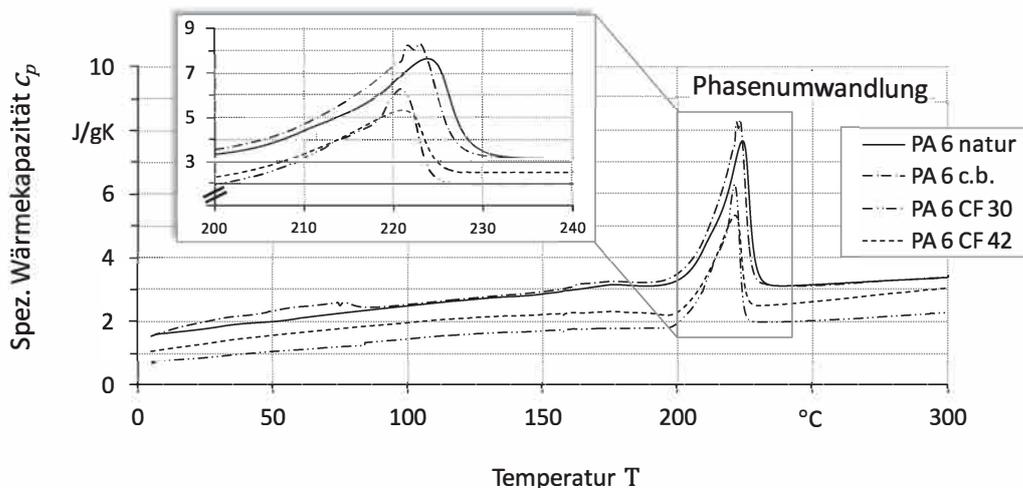


Bild 33: Temperaturabhängiger Verlauf der spezifischen Wärmekapazität der verwendeten Werkstoffe

Als weiteres Ergebnis zeigt die DSC-Analyse die Schmelz- und Zersetzungstemperaturbereiche der verwendeten Versuchswerkstoffe. Die Ergebnisse des zweiten Aufheizvorgangs entsprechen den werkstoffüblichen Temperaturen des verwendeten Ultramid B3S von $T_s = 205\text{-}225^\circ\text{C}$ [127]. Ausschlaggebend für die Verarbeitung im Laserstrahlschweißprozess ist jedoch der erste Aufheizvorgang. Dieser repräsentiert zusätzlich Informationen über die thermische Vorgeschichte der Werkstoffe während des Herstellungsprozesses [128] und zeigt die unterschiedlichen Schmelztemperaturbereiche (Bild 34). Bei Temperaturen oberhalb der Schmelzbereiche beginnt die thermische Zersetzung der Polymere.

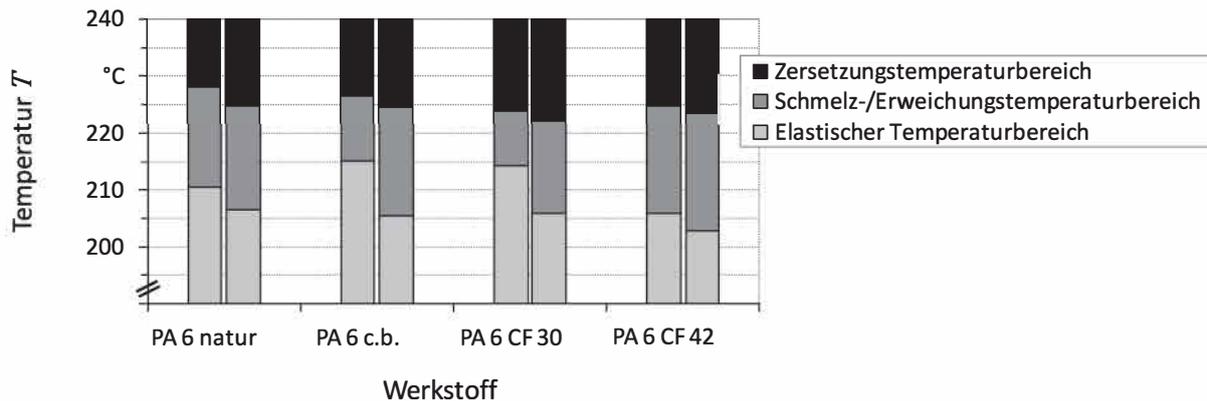


Bild 34: Schmelz- bzw. Erweichungs- und Zersetzungstemperaturbereiche der verwendeten Versuchswerkstoffe

5.1.3 Mechanische Eigenschaften

Die genaue Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe ist eine wichtige Voraussetzung für die qualitative Beurteilung der Schweißnaht. Bild 35 zeigt die, mithilfe der in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Zugschergprüfung und Probengeometrie ermittelten Zugfestigkeiten σ_A der unterschiedlichen Polyamide. Für das unverstärkte Polyamid PA 6 natur ergibt sich eine Zugfestigkeit $\sigma_A = 62 \text{ N/mm}^2$ bei gleichzeitig geringer Streuung der Ergebnisse. Bei Verwendung der in Bild 27 dargestellten Probengeometrie resultiert aus einer Werkstoffdicke von $d_B = 2,0 \text{ mm}$ die maximale Bruchkraft $F_{max} = 3095 \text{ N}$. Die Zugfestigkeiten der quasiisotrop, unidirektional verstärkten Polymere liegen abhängig von der Additivierung und dem Faservolumengehalt zwischen 243 und 294 N/mm^2 .

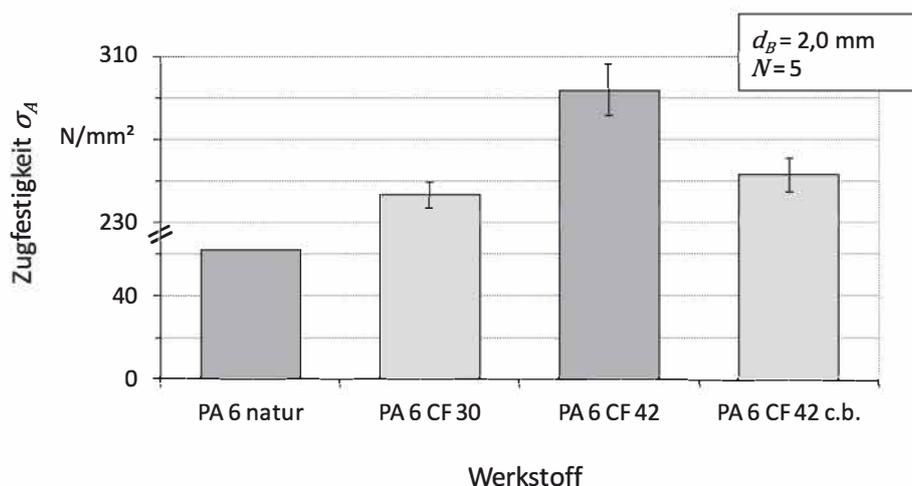


Bild 35: Zugfestigkeiten der verwendeten Ausgangswerkstoffe

Im Hinblick auf einen späteren Serieneinsatz des Fügeverfahrens und der untersuchten Werkstoffe spielen neben den statischen Festigkeitskennwerten bei Raumtemperatur vor allem die Eigenschaften unter Temperatur- und Medieneinflüssen eine wichtige Rolle. Polyamide sind

im Vergleich zu anderen Kunststoffen je nach PA-Sorte sehr wasseraufnahmefähig. Polyamid 6 ist in der Lage bis zu 9,5 % Wassermoleküle in den amorphen Bereichen seiner teilkristallinen Struktur einzulagern [118]. In Folge dessen verändert es seine mechanischen Eigenschaften in den meisten Fällen negativ für die Anwendung [118]. Dies ist bei der Konstruktion eines Polyamidbauteils zu berücksichtigen. Des Weiteren spielt das Verformungsverhalten und die Wärmealterung unter Temperatureinfluss eine wichtige Rolle für den Einsatz der Thermoplaste. PA6 besitzt mit 60°C eine sehr geringe Glasübergangstemperatur. Folglich findet bereits im Einsatztemperaturbereich der Kunststoffe bei erhöhten Temperaturen eine deutliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften statt [127]. Auf genaue Untersuchungen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die werkstoffspezifischen Datenblätter der Kunststofflieferanten bzw. gängige Fachliteratur verwiesen [21, 118].

5.2 Einfluss der Prozessparameter

Ein bedeutender Schritt auf dem Weg zur Qualifizierung des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff besteht darin, ein grundlegendes Prozessverständnis hinsichtlich entscheidender Einflussfaktoren auf die Schweißnahtqualität bereitzustellen. Bei der experimentellen Untersuchung der Einfluss- und Störgrößen wird, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, zwischen Prozess- und Systemparametern unterschieden. Zur Referenzierung der beim Laserstrahlschweißen gewonnenen Erkenntnisse wird fortwährend der Vergleich zu unverstärkten, mit Ruß pigmentierten Fügepartnern gesucht.

5.2.1 Einfluss des Energieeintrages

Die Untersuchungen zeigen, dass die Laserleistung P_L , die Zuführgeschwindigkeit des Zusatzwerkstoffs v_z und die Vorschubgeschwindigkeit der Handlingseinheit v_r den größten Einfluss auf den Fügeprozess haben und damit zu den wichtigsten Prozessparametern zählen. Die Versuche zeigen auch, dass es prozessbedingt nicht möglich ist, den Vorschubgeschwindigkeiten des Zusatzwerkstoffs bzw. der Handlingseinheit unterschiedliche Werte zuzuordnen. Bedingt durch die hohe Transmissivität des lasertransparenten Zusatzwerkstoffs wird dieser lediglich in den Randbereichen über Wärmeleitungseffekte plastifiziert. Im Inneren bleibt eine feste Phase (Bild 36). Aus diesem Grund werden die beiden Geschwindigkeiten nicht mehr getrennt voneinander betrachtet und im Rahmen der folgenden Untersuchungen nur als Schweißgeschwindigkeit v_s bezeichnet.

$$v_r = v_z = v_s \quad (11)$$

Wie in Abschnitt 2.2.6.1 beschrieben, werden die beiden verbleibenden Größen P_L und v_s auch als Energieeintrag bezeichnet. Sie können aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkungen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Eine wichtige Kenngröße ist hier die schweißnahtlängenbezogene Streckenenergie E_s (Formel 5).

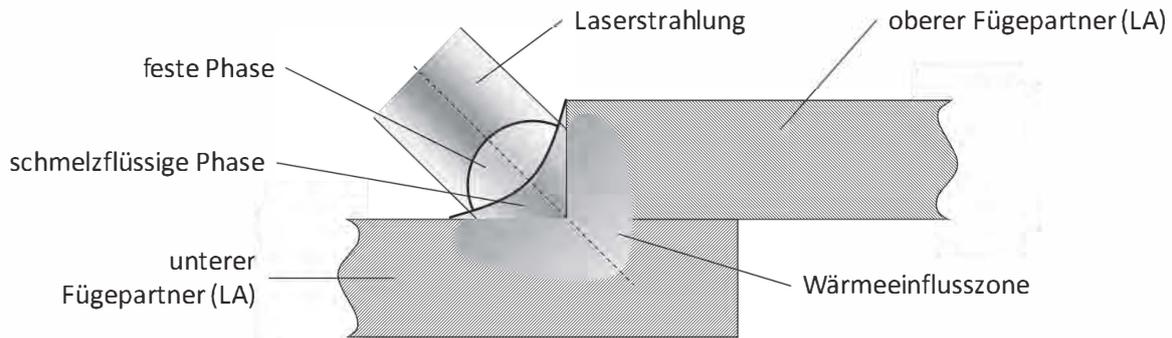


Bild 36: Skizze des Fügeprozesses mit fester und schmelzflüssiger Phase des Zusatzwerkstoffes

Detailliertere Informationen über den Einfluss des Energieeintrages und dessen Zeitabhängigkeit liefert die Untersuchung der erreichbaren Bruchkraft in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Laserleistungen. Die Ergebnisse sind in Bild 37 dargestellt. Unabhängig von der verwendeten Laserleistung weisen sämtliche Kurven einen für das Laserstrahlschweißen von Kunststoffen typischen Verlauf auf. Mit steigender Schweißgeschwindigkeit v_s und abnehmender Streckenenergie E_s , steigt die Bruchkraft σ_l an. Nach Erreichen eines ausgeprägten Maximums der Bruchkraft bei optimaler Energiezufuhr unterhalb der Zersetzungstemperatur T_z nimmt σ_l bei weiterer Steigerung der Geschwindigkeit ab.

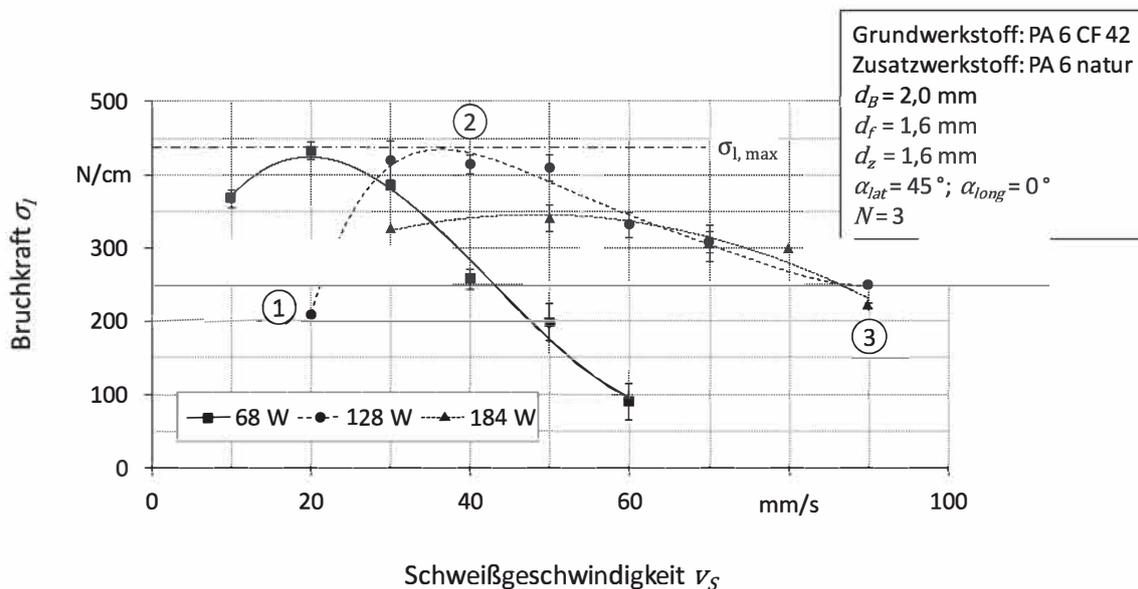


Bild 37: Längenbezogene Bruchkraft der Schweißnaht als Funktion der Schweißgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Laserleistungen

An den Bruchbildern (Bild 38) der im Diagramm markierten Bereiche (1-3) des PA 6 CF42 ist zu erkennen, dass die Größe der mittleren Schweißnahtbreite bei steigender Vorschubge-

schwindigkeit v_s abnimmt. Diese Entwicklung entspricht dem Verhalten unverstärkter Thermoplaste. Bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten und hohen Streckenenergien (1) können aus der Oberfläche des Organoblechs herausgelöste Kohlenstofffasersegmente identifiziert werden, die an der Unterseite des lasertransparenten Zusatzwerkstoffs haften. Durch die Plastifizierung oberflächennaher Schichten des Organoblechs wird eine Durchmischung des lasertransparenten Zusatzwerkstoffs mit dem Matrixwerkstoff erreicht. Während der Zugscherprüfung werden zusätzlich zur Scherbeanspruchung Zugkräfte senkrecht zur Oberfläche des Organoblechs induziert. Diese Normalkräfte bewirken das Ausreißen einzelner, oberflächennaher Fasersegmente. Werden bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten hohe Streckenenergien eingebracht, verstärkt sich dieser Effekt durch eine zusätzliche Schwächung des Faser-Matrix-Verbundes. Im Bereich der optimalen Energiezufuhr (2) ist eine hohe Anbindungsqualität nachzuweisen. Damit erklärt sich das Mischbruchverhalten aus adhäsivem Bruch der Fügeverbindung und kohäsivem Versagen des Zusatzwerkstoffs. Bei zu hohen Vorschubgeschwindigkeiten und geringer Streckenenergie (3) sind einzelne Kunststoffrückstände in der Fügezone zu beobachten. Dies lässt auf einen geringen Anteil kohäsiven Versagens schließen. Die Bruchkraft ist aufgrund kaum vorhandener Plastifizierung der Fügepartner jedoch sehr gering.

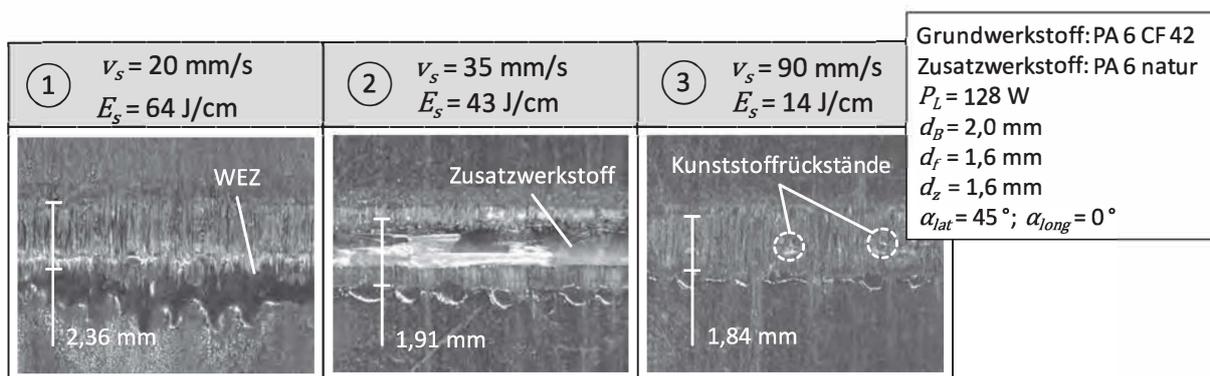


Bild 38: Bilder der Bruchflächen gefügter Proben bei Variation der Schweißgeschwindigkeit bzw. der Streckenenergie und konstanter Laserleistung

Der Vergleich der Bruchkraftverläufe bei unterschiedlichen Laserleistungen (Bild 37) zeigt einen mit zunehmender Leistung deutlich flacher werdenden Verlauf. Unabhängig von der Streckenenergie sinkt die maximal erreichbare Bruchkraft. Grund dafür ist die verringerte Wechselwirkungszeit t_{ww} zwischen der Laserstrahlung und den Fügepartnern sowie das damit verbundene, geringere, plastifizierte Schmelzvolumen. Diesen Zusammenhang bestätigen die Thermographieaufnahmen bei Blindschweißungen an der Oberfläche des PA 6 CF 42 (Bild 39), die zur Beurteilung der Temperaturverteilung bei unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten v_s und konstanter Streckenenergie E_s durchgeführt werden.

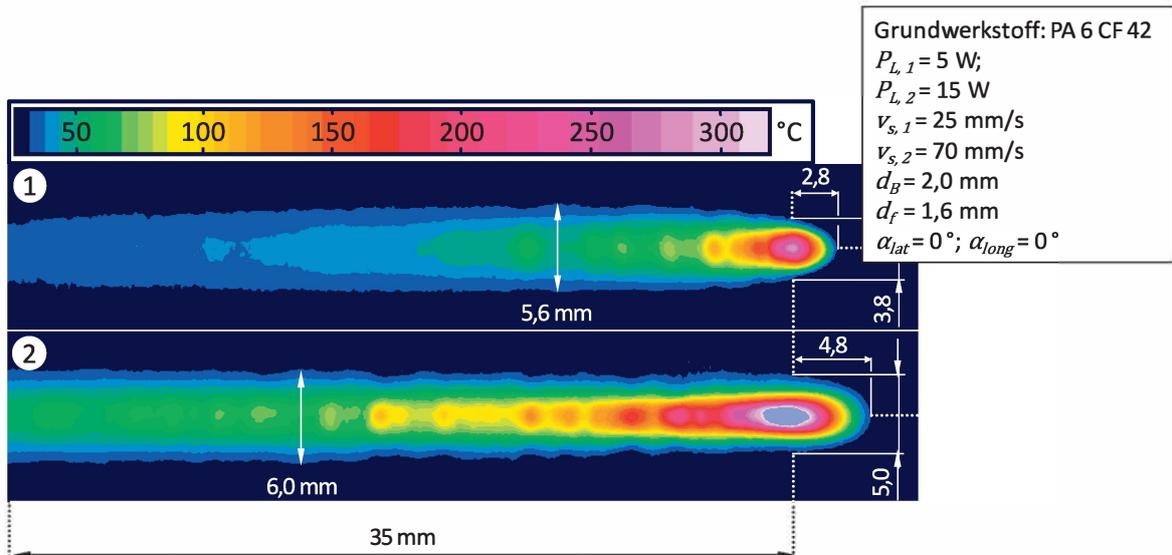


Bild 39: Thermographiaufnahmen der Oberflächen von PA6 CF42 bei Blindschweißungen mit unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten ($E_s = \text{const.}$)

Durch die reduzierte Wechselwirkungszeit t_{ww} werden bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_{s,2} = 70 \text{ mm/s}$ und einer Leistung $P_{L,2} = 15 \text{ W}$ (2) deutlich höhere Temperaturen an der Oberfläche detektiert als bei $v_{s,1} = 25 \text{ mm/s}$ und einer Leistung $P_{L,1} = 5 \text{ W}$ (1). Die Streckenenergien $E_{s,1}$ und $E_{s,2}$ liegen auf gleichem Niveau, bei etwa 2 J/cm . Die Maximaltemperaturen in der Fügezone überschreiten deutlich die Zersetzungstemperatur $T_z = 330^\circ\text{C}$ des Matrixpolymers PA6. Die Ausdehnung der WEZ in der Fügezone an der Oberfläche ist bei langsamer Schweißgeschwindigkeit (1) trotz gleicher Streckenenergie deutlich geringer als bei der Vergleichsschweißung mit höherer Schweißgeschwindigkeit (2). Grund dafür ist die zeitabhängige Wärmeleitung in das Polymervolumen und die verbundene dreidimensionale Ausbreitung der WEZ ins Innere des Organoblechs. Im Gegensatz zum Verhalten bei hohen Schweißgeschwindigkeiten nimmt die Größe der WEZ durch Wärmeleitungseffekte bei langsamen Geschwindigkeiten mit der Zeit noch deutlich zu.

Wie bereits beschrieben, sinkt die maximal erreichbare Bruchkraft $\sigma_{l,max}$ aufgrund verringerter Wechselwirkungszeit t_{ww} mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit v_s . Bild 40 zeigt die maximal erreichbare Bruchkraft beim Fügen von PA6 CF42 in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit, sowie die dafür nötige Streckenenergie E_s . Wie erwähnt, wird das absolute Maximum der Bruchkraft $\sigma_{l,max} = 432 \text{ N/cm}$ bereits bei der geringsten untersuchten Schweißgeschwindigkeit $v_s = 5 \text{ mm/s}$ und einer zugehörigen Laserleistung $P_L = 28 \text{ W}$ erreicht. Bei einer Schweißgeschwindigkeit von $v_s = 60 \text{ mm/s}$ werden nur 315 N/cm erreicht. Die benötigte Laserleistung beträgt $P_L = 156 \text{ W}$. Dies entspricht einer durchschnittlichen Abnahme der Bruchkraft um etwa 5% je Steigerung der Geschwindigkeit um 10 mm/s . Wegen der bereits beschriebenen Wärmeleitungseffekte sinkt die zum Verschweißen notwendige Streckenenergie E_s in-

direkt proportional zur Schweißgeschwindigkeit v_s . Der beschriebene Einfluss des Energieeintrages trifft mit geringen Abweichungen gleichermaßen auf die untersuchten unverstärkten und verstärkten Polyamide zu. Der Einfluss des Werkstofftyps wird im späteren Verlauf der Arbeit nochmals gesondert untersucht.

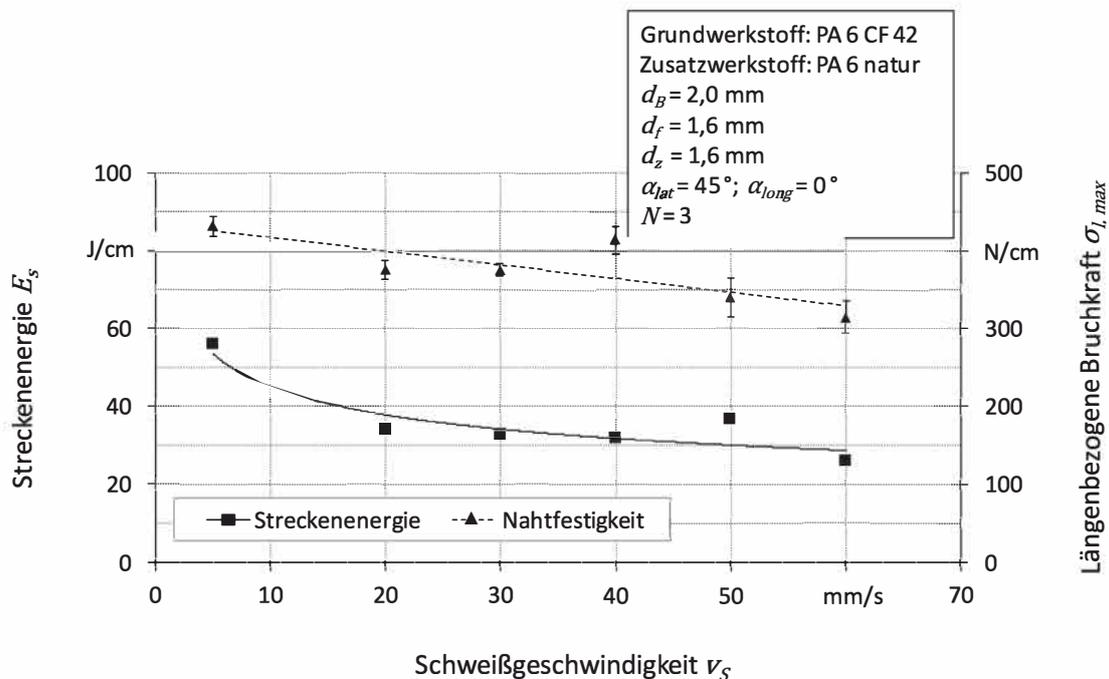


Bild 40: Maximal erreichbare Bruchkraft in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit sowie die dafür nötige Streckenenergie

Um ein Gefühl für den Einfluss des Energieeintrages, die daraus resultierende Verbindungsqualität und damit den Fügeprozess zu bekommen, werden Sensitivitätsuntersuchungen zur Eingrenzung des Parameterraums durchgeführt. In Bild 41 ist das Prozessfenster¹⁴ aus Laserleistung P_L und Schweißgeschwindigkeit v_s für den Werkstoff PA6 CF42 dargestellt. Als Prozessfenster wird für diese Arbeit der Bereich definiert, indem die längenbezogene Bruchkraft der Verbindung σ_l mindestens 75 % ihres Maximums beträgt. Wie bereits beschrieben, liegt das Maximum bei dieser Werkstoffkombination bei $\sigma_{l,max} = 432$ N/cm. Es wird bei einer Laserleistung von $P_L = 28$ W und der geringsten untersuchten Schweißgeschwindigkeit $v_s = 5$ mm/s erreicht. Die auf das Werkstück wirkende Streckenenergie E_s beträgt 56 J/cm. Die Bedingung für das Prozessfenster lautet folglich $\sigma_l \geq 324$ N/cm. In Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit v_s werden diese Werte bei Laserleistungen P_L erreicht, die etwa $\pm 35\%$ symmetrisch um den Mittelwert der Leistung $\overline{P_M}$ variieren (grau hinterlegter Bereich im Diagramm). Die Bedingung für einen stabilen Schweißprozess lautet damit für die vorliegende Werkstoffkombination:

¹⁴ Als Prozessfenster wird derjenige Bereich bezeichnet, indem die Einflussgrößen bzw. die Prozessparameter verändert werden können, ohne dass der Sollbereich der Zielgröße (Bearbeitungsergebnis) verlassen wird [141].

$$P_{L,Prozessfenster} = (1 \pm 0,35) \cdot \left(2464 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot v_s + 23 \text{ W} \right) \quad (12)$$

Die aus den experimentellen Versuchsergebnissen (Bild 41) bestimmte Geradengleichung des Mittelwerts der Laserleistung zur Beschreibung des Prozessfensters $\overline{P_M}$ besitzt eine Steigung von 2464 kgm/s^2 und den y-Achsenabschnitt 23 W . Diese beiden Größen sowie die dazugehörige Abweichungstoleranz von $\pm 35 \%$ sind abhängig von der verwendeten Werkstoffkombination und können bei sonst festen Prozess- und Systemparametern ermittelt werden. Die daraus resultierende Streckenergie bewegt sich im Bereich zwischen 15 und 35 J/cm . Aufgrund der verlängerten Wechselwirkungszeiten t_{ww} zwischen der Laserstrahlung und den Fügepartnern und dem damit verbundenen, verbesserten Wärmetransport kann sie bei langsamer Schweißgeschwindigkeit auf bis zu 60 J/cm ansteigen. Das Prozessfenster wird hin zu hohen Laserleistungen durch den Beginn der thermischen Zersetzung des Polyamides begrenzt. Wird die untere Grenze (zu geringe Leistung) unterschritten, reicht die eingebrachte Energie nicht für eine ausreichende Aufschmelzung.

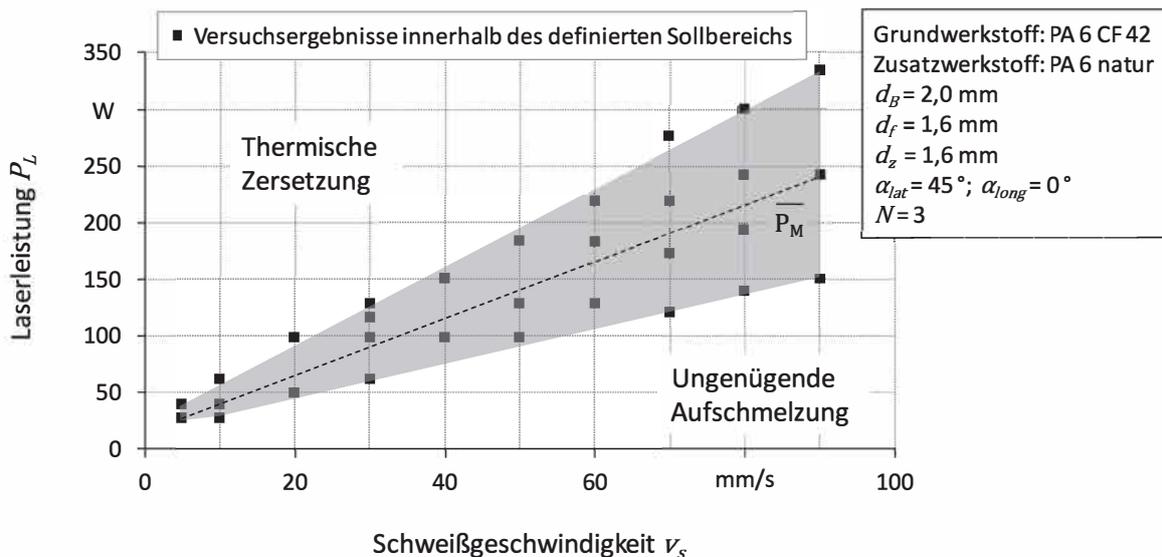


Bild 41: Prozessfenster aus Leistung und Schweißgeschwindigkeit zum Fügen von Kunststoffen mit Zusatzwerkstoff

5.2.2 Einfluss der Strahlanstellung

Die Möglichkeit beim taktilen Laserstrahlschweißen den Laserstrahl in mehrere Raumrichtungen anzustellen (Bild 42), erfordert eine detaillierte Betrachtung des Einflusses unterschiedlicher Einstrahlwinkel auf den Fügeprozess, die daraus resultierenden Prozessergebnisse und die Schweißnahtqualität. Die Strahlungsintensität, die sich durch die Strahlanstellung auf der Bauteiloberfläche verändert stellt eine wichtige Einflussgröße dar.

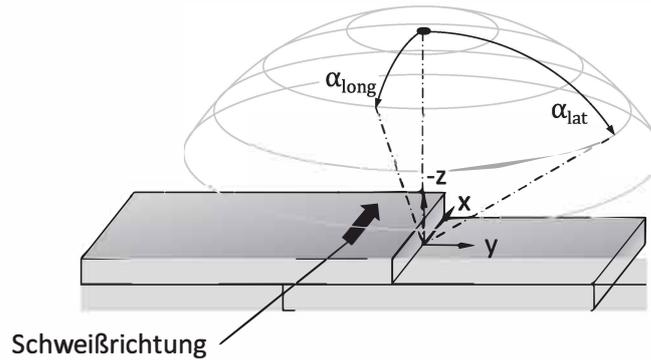


Bild 42: Longitudinaler (α_{long}) und lateraler (α_{lat}) Anstellwinkel beim taktilen Laserstrahlschweißen im x-y-z-Koordinatensystem

5.2.2.1 Geometrische Betrachtung

Zur quantitativen Betrachtung der durch den Laser bestrahlten Werkstückoberfläche muss diese mathematisch beschrieben werden. Dazu wird ein trigonometrischer Ansatz gewählt und unter Vernachlässigung der gemessenen Strahlkaustik (Bild 23) die Annahme einer parallelisierten Laserstrahlung ohne Einfluss des Zusatzwerkstoffs getroffen. Dies ist möglich, da der Einfluss der Strahlkaustik auf die Änderung der bestrahlten Werkstückoberfläche im untersuchten Bereich der Anstellwinkel um ein Vielfaches geringer ist, als der trigonometrische Einfluss.

Aufgrund der geometrischen Zusammenhänge wird bei sehr kleinen Anstellwinkeln bzw. zu großen Fokaldurchmessern nicht nur die Stirnseite des oberen Fügepartners, sondern zusätzlich dessen Oberfläche bestrahlt (Bild 43 links). Aus diesem Grund muss für die Berechnung der bestrahlten Werkstückoberfläche eine Fallunterscheidung durchgeführt werden. Anwendungsorientiert wird nur der Fall betrachtet, bei dem lediglich die beiden zueinander senkrechten Flächen bestrahlt werden. Dies ist der Fall, wenn die Bedingung in Formel 13 erfüllt ist.

$$d_B > x_0 = \frac{d_f}{2 \cdot \sin \alpha_{\text{lat}}} \quad (13)$$

Für die Standardversuchskonfiguration mit einer Organoblechdicke $d_B = 2,0 \text{ mm}$ und dem Fokaldurchmesser $d_f = 1,6 \text{ mm}$ ist diese Bedingung für laterale Anstellwinkel $\alpha_{\text{lat}} \geq 25^\circ$ erfüllt.

Aus den trigonometrischen Beziehungen ergeben sich die beiden Halbachsen der elliptisch bestrahlten Werkstückoberflächen des oberen und unteren Fügepartners, x_0 und x_U (Bild 43 links) zu:

$$x_0 = \frac{d_f}{2 \cdot \sin \alpha_{\text{lat}}} \quad x_U = \frac{d_f}{2 \cdot \cos \alpha_{\text{lat}}} \quad (14, 15)$$

Aus dem Sinussatz folgt die longitudinale Ausdehnung der elliptisch bestrahlten Werkstückoberfläche y :

$$y = \frac{d_f}{\cos \alpha_{long}} \quad (16)$$

Mithilfe der beiden trigonometrischen Zusammenhänge aus den Formeln 14, 15 und 16 folgt für die beiden bestrahlten Werkstückoberflächen des oberen und unteren Fügepartners A_O und A_U :

$$A_O = \frac{\pi \cdot d_f^2}{8 \cdot \cos \alpha_{long} \cdot \sin \alpha_{lat}} \quad A_U = \frac{\pi \cdot d_f^2}{8 \cdot \cos \alpha_{long} \cdot \cos \alpha_{lat}} \quad (17, 18)$$

Ausgehend von den Formeln 17 und 18 ist in Bild 43 rechts exemplarisch die bestrahlte Werkstückoberfläche auf dem oberen Fügepartner A_O in Abhängigkeit der Strahlanstellungen α_{lat} und α_{long} , bezogen auf den Flächeninhalt bei Einstrahlung mit $\alpha_{lat} = 45^\circ$ und $\alpha_{long} = 0^\circ$ aufgetragen. Die bestrahlte Fläche auf dem unteren Werkstück verhält sich entgegengesetzt und wächst bei zunehmendem lateralem Anstellwinkel α_{lat} .

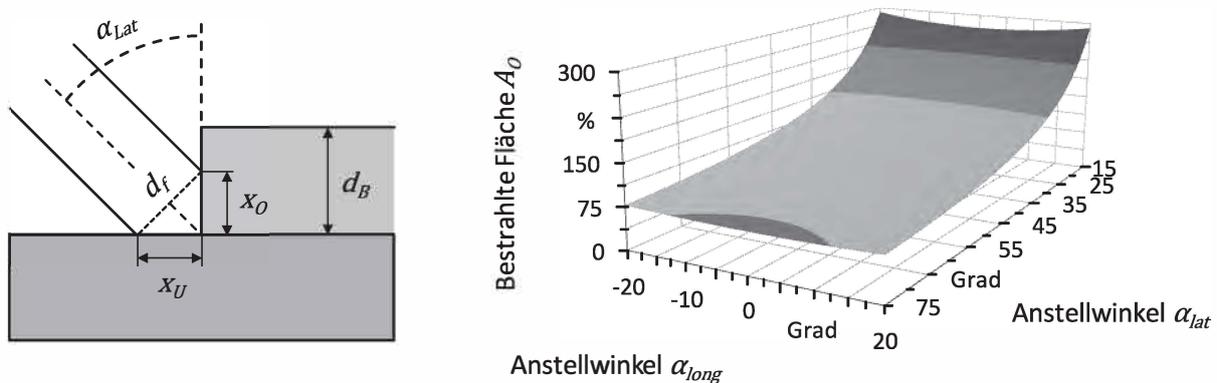


Bild 43: Geometrischer Zusammenhang zwischen lateralem Anstellwinkel und der Schnittfläche zwischen dem Laserstrahl und den Werkstückoberflächen (links) sowie die Größe der bestrahlten Werkstückoberfläche auf dem oberen Fügepartner bezogen auf den Flächeninhalt bei symmetrischer ($\alpha_{lat} = 45^\circ$; $\alpha_{long} = 0^\circ$) Strahlanstellung (rechts)

5.2.2.2 Laterale Strahlanstellung

Die laterale Anstellung des Laserstrahls quer zur Schweißrichtung hat einen deutlichen Einfluss auf die erzielbare Nahtqualität. In Bild 44 ist der Zusammenhang zwischen lateralem Anstellwinkel α_{lat} und der erreichbaren BRuchkraft σ_l bei Verwendung der drei Versuchswerkstoffe PA 6 c.b., PA 6 CF30 und PA 6 CF42 dargestellt. Laserleistung P_L sowie Schweißgeschwindigkeit v_s werden für jeden Werkstoff individuell ausgewählt, bleiben aber im Rahmen der Untersuchung konstant.

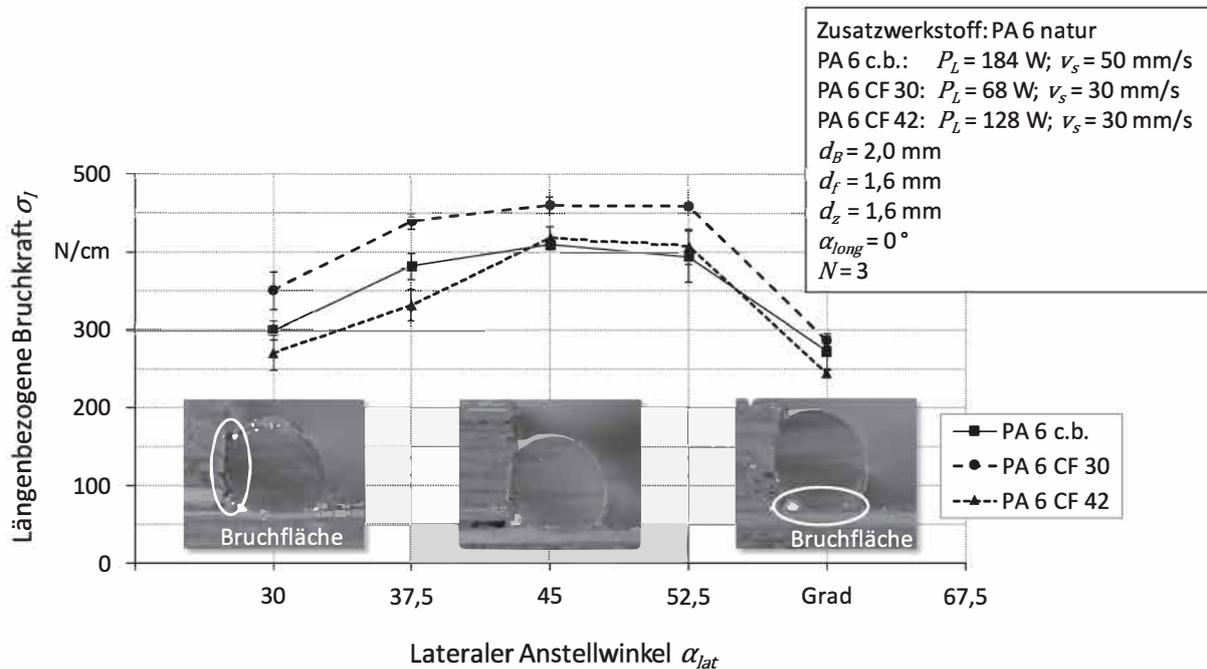


Bild 44: Einfluss der lateralen Strahlanstellung auf die Bruchkraft der Verbindung

Die Verläufe der längsbezogenen Bruchkraft σ_1 zeigen, dass ein werkstoffübergreifendes Optimum der resultierenden Bruchkraft bei einer lateralen Anstellung des Laserstrahls $\alpha_{lat} = 45^\circ$ vorliegt. Bei Abweichungen aus dieser symmetrischen Mittellage nimmt die Verbindungsfestigkeit in beide Richtungen ab. Grund dafür ist die in Bild 43 mathematisch hergeleitete Veränderung der bestrahlten Werkstückoberfläche in Abhängigkeit des Anstellwinkels. Bereits eine Ablenkung um $+7,5^\circ$ aus der Mittelposition ($\alpha_{lat} = 52,5^\circ$) bei $\alpha_{long} = 0^\circ$ hat eine Vergrößerung der bestrahlten Werkstückoberfläche um ca. 3 % zur Folge. Die resultierende Strahlungsintensität auf der Werkstückoberfläche reduziert sich ebenfalls um 3 %. Noch deutlicher wird dies bei Betrachtung des freigeschnittenen oberen und unteren Fügepartners. Bei der gleichen Änderung des lateralen Anstellwinkels steigt die Intensität auf dem unteren Fügepartner um 16 %, während die Intensität auf dem oberen um 11 % abnimmt. Diese Ungleichverteilung nimmt mit steigendem Anstellwinkel weiter zu. Aus der asymmetrischen Verteilung der Strahlungsintensität resultiert ein ungleichmäßiges Aufschmelzverhalten und damit eine schlechtere Anbindungsqualität. Die Schlibbilder im Diagramm (Bild 44 unten) zeigen die Querschnitte der Schweißnaht des PA 6 CF42 für die zugehörige Strahlanstellung. Aus kleinen lateralen Anstellwinkeln folgt eine deutlich geringere Strahlungsintensität auf der Oberfläche des oberen Fügepartners. Daraus resultiert eine ungenügende Anbindung des Zusatzwerkstoffs. Bei großen lateralen Anstellwinkeln tritt dieses Phänomen am unteren Fügepartner auf.

Der Verlauf des Diagramms ist jedoch nicht ganz symmetrisch. Der Bereich $45^\circ \leq \alpha_{lat} \leq 52,5^\circ$ bildet ein Plateau mit hoher Anbindungsqualität. Grund dafür sind die errechneten Veränderungen der Strahlungsintensitäten in Kombination mit dem anisotropen Wärmeleitungsverhalten der kohlenstofffaserverstärkten Thermoplaste. Die Wärmeleitfähigkeit κ der Kohlenstofffasern

ist deutlich höher als die, der sie umgebenden Polymermatrix. Für die verwendeten Verstärkungsfasern ergibt sich ein Wert von $\kappa^{\parallel} = 17 \text{ W/mK}$ parallel zur Ausrichtung der Fasern. In radialer Richtung beträgt die Wärmeleitung hingegen $\kappa^{\perp} \leq 2 \text{ W/mK}$ [129]. Die Wärmeleitfähigkeit der zum Einsatz kommenden PA6-Matrix wird in der Literatur mit $\kappa = 0,29 \text{ W/mK}$ angegeben [118]. Laserstrahlung, die auf die Schnittkante des oberen Fügepartners auftrifft, kann durch die unidirektionale Faserverstärkung folglich deutlich besser entlang der Faserrichtung in das Innere des Polymervolumens transportiert werden als Strahlung, die auf die Oberfläche des unteren Fügepartners auftrifft. Deutlich sichtbar wird dieser Effekt anhand der Thermografieaufnahmen der Kehle bei Blindschweißungen an PA6 CF42 (Bild 45). Die Versuchs-schweißung mit $P_L = 128 \text{ W}$ und $v_s = 30 \text{ mm/s}$ zeigt die deutlich geringere Ausprägung der WEZ an der Schnittkante des oberen Fügepartners trotz geringen Wärmestaus an der Oberkante. Die ermittelten Maximaltemperaturen liegen ebenfalls deutlich unter den auf der Oberfläche des unteren Fügepartners gemessenen Werten. Durch Veränderungen des lateralen Anstellwinkels hervorgerufene Intensitätssteigerungen an der Schnittkante des oberen Fügepartners und damit verbundene Intensitätsabnahmen auf der Oberfläche des unteren Fügepartners können somit über die verbesserte Wärmeleitung in Faserlängsrichtung im oberen Fügepartnern besser kompensiert werden als umgekehrt.

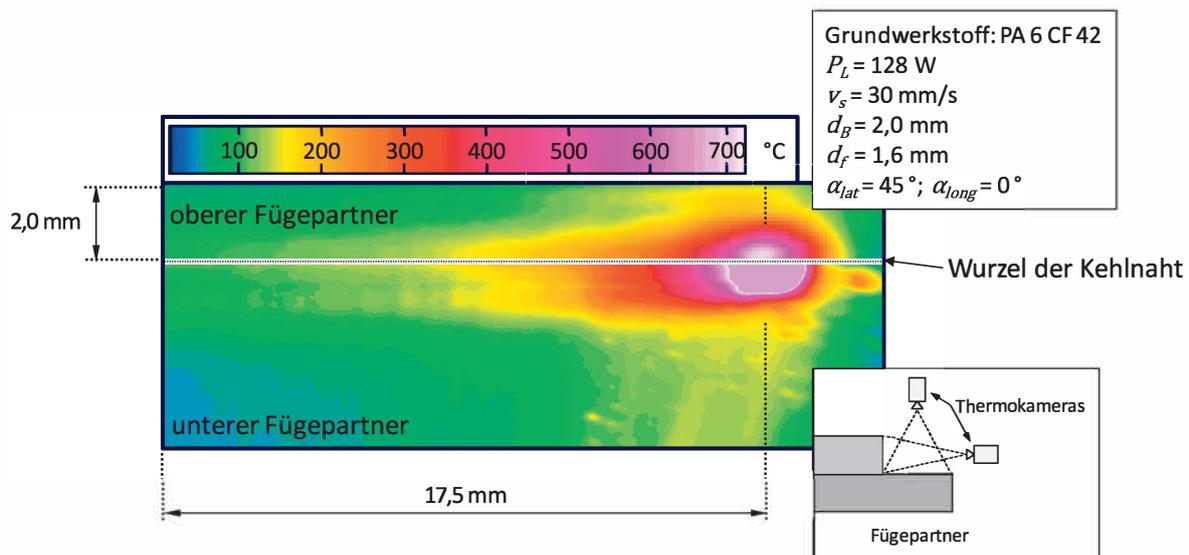


Bild 45: Temperaturverteilung an den Oberflächen des oberen und unteren Fügepartners während einer Blindschweißung der Kehlnaht

5.2.2.3 Longitudinale Strahlanstellung

Die Variation des longitudinalen Anstellwinkels α_{long} wird durch die verwendete Anlagentechnik deutlich eingeschränkt. Grund dafür sind Bauteilkollisionen bzw. Führungsungenauigkeiten bedingt durch die taktile Nahtführung der Bearbeitungsoptik (Bild 24). Es ergibt sich ein mögliches Parameterfeld für die longitudinale Strahlanstellung α_{long} von -2° bis 8° . Wie in Bild 43 dargestellt, ist der Einfluss der longitudinalen Strahlanstellung auf die Abmessung der

bestrahlten Bauteiloberfläche im betrachteten Parameterraum sehr gering. Der in Bild 46 ermittelte Einfluss der Strahlanstellung auf die Bruchkraft σ_l ist somit vielmehr auf die Änderung der Anpresskraft des Zusatzwerkstoffs durch Veränderung der elastischen Vorspannung sowie anlagentechnische Fördereigenschaften zurückzuführen.

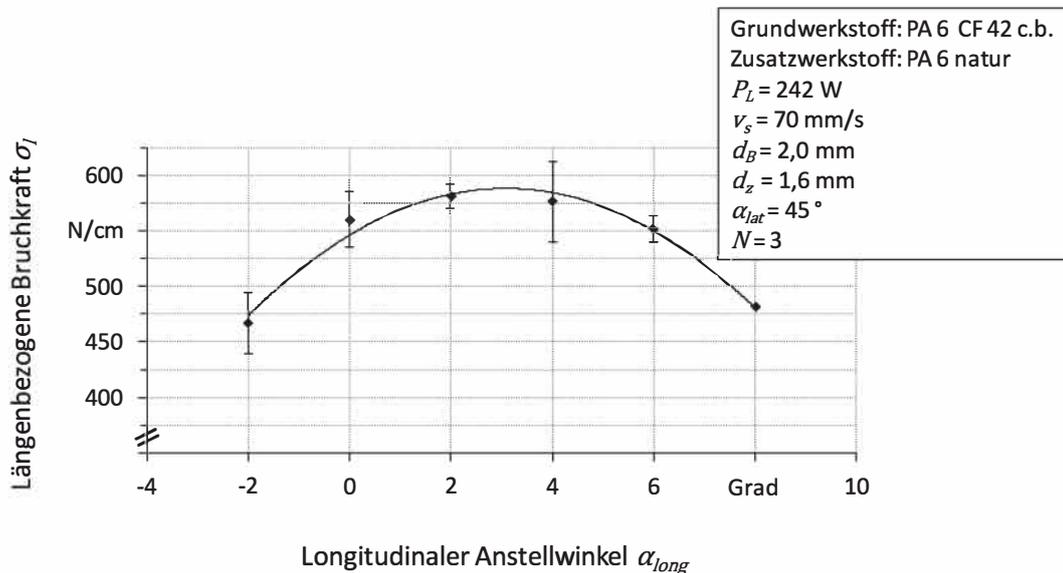


Bild 46: Einfluss der longitudinalen Strahlanstellung auf die Bruchkraft der Schweißverbindung

Für den untersuchten Bereich des longitudinalen Anstellwinkels ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit der Schweißnahtqualität mit einem Optimum bei leicht schleppender Anstellung des Laserstrahls. Hin zu größeren bzw. kleineren Anstellwinkeln nimmt die erreichbare Verbindungskraft deutlich ab.

5.2.3 Einfluss des Fokusbereichs

Der Prozess des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff unterscheidet sich vom konventionellen Laserdurchstrahlschweißen durch die Verwendung eines thermoplastischen Zusatzwerkstoffs. Der Fokusbereich ist damit eng an die Geometrie und die Abmessung des Zusatzwerkstoffs gebunden. Um den Einfluss des Fokusbereichs d_f auf die Schweißnahtqualität zu untersuchen, werden experimentelle Versuche mit dem Grundwerkstoff PA 6 CF 30 und dem Zusatzwerkstoff PA 6 natur mit einem Durchmesser $d_z = 1,6$ mm unter Variation des Fokusbereichs durchgeführt. Um den Einfluss der veränderten Strahlungsintensität in der Fügezone durch Variation der bestrahlten Fläche zu vermeiden, werden die Versuche durch Anpassung der Laserleistung bei konstanten Strahlungsintensitäten I durchgeführt. Bild 47 zeigt die erzielte Bruchkraft σ_l in Abhängigkeit des Fokusbereichs d_f .

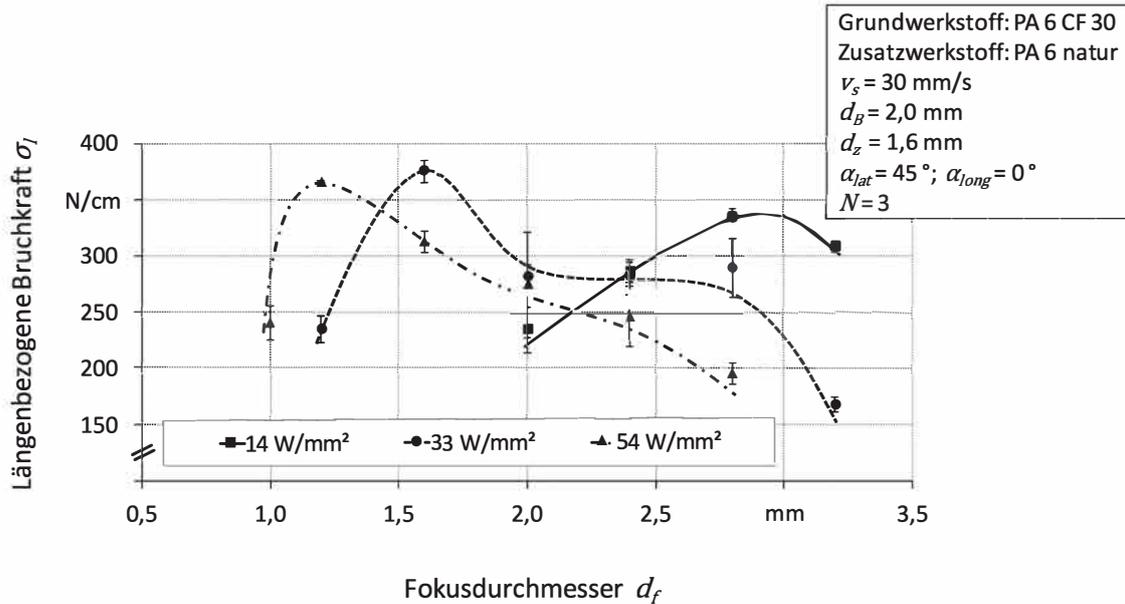


Bild 47: Einfluss des Fokusbereichs auf die Bruchkraft bei unterschiedlichen Strahlungsintensitäten

Die Versuche zeigen, dass ein optimales Fügeergebnis vorliegt, wenn der Durchmesser des Laserfokus d_f dem des Zusatzwerkstoffs d_z gleichgesetzt wird. Dies ist bei $d_f = 1,6$ mm der Fall. Mit einer Strahlungsintensität $I = 33$ W/mm² wird eine Bruchkraft von $\sigma_l = 375$ N/cm erreicht. Eine Reduzierung des Strahldurchmessers bei konstanter Intensität führt zu einer unzureichend eingebrachten Strahlungsenergie, die keine hinreichende Aufschmelzung der Fügepartner gewährleistet. Bei einer Vergrößerung des Strahldurchmessers steigt die integrale Energieeinbringung deutlich an. Der Fügepartner wird thermisch geschädigt. Beim Vergleich der maximal erreichbaren Bruchkräfte wird deutlich, dass Abweichungen des Strahldurchmessers kaum Einfluss auf die Bruchkraft haben. So wird bei einer um etwa 60 % verkleinerten Fokusbereichsfläche ($d_f = 1,0$ mm) noch eine maximale Bruchkraft $\sigma_l = 366$ N/cm erreicht, obwohl nicht mehr die gesamte Oberfläche des Zusatzwerkstoffs bestrahlt wird. Grund dafür ist die Beeinflussung der Strahlgeometrie durch den Zusatzwerkstoff. Er fungiert als optisches Element im Strahlengang. Ein Teil der einfallenden Strahlung wird, abhängig vom Einfallswinkel an der Oberfläche des Zusatzwerkstoffs reflektiert (Abschnitt 2.2.2). Zusätzlich wird die Strahlung während des Medienübergangs von der Umgebungsluft ($n_{Luft} = 1,0$) in den Polymerwerkstoff ($n_{PA6} = 1,53$) ebenfalls abhängig vom Einfallswinkel gebrochen. Nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz [41] lässt sich der Ausfallswinkel δ_2 des gebrochenen Strahls aus dem Verhältnis der beiden Brechungsindizes sowie dem Einfallswinkel δ_1 wie folgt berechnen:

$$\delta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_{Luft}}{n_{PA6}} \cdot \sin \delta_1 \right) \quad (19)$$

Aus der Formel 19 wird ersichtlich, dass der Einfluss der Brechung mit steigendem Einfallswinkel δ_1 deutlich zunimmt. Senkrecht auf die Oberfläche des Zusatzwerkstoffs treffende

Strahlung wird ohne Brechungseinfluss transmittiert. Bei kleinen Strahldurchmessern d_f des einfallenden Lichtes ist der fokussierende Effekt des Zusatzwerkstoffs folglich deutlich geringer, als bei größeren (Bild 48 Skizze). Die simulierte Intensitätsverteilung der Laserstrahlung auf der Oberfläche der Fügepartner nach Transmission durch den Zusatzwerkstoff (Bild 48) zeigt, dass bei Variation des Strahlungsdurchmessers der Großteil der Strahlungsintensität in einem Umkreis von etwa 0,05 mm um den Fokus nahezu unverändert bleibt. Die Verwendung größerer Strahldurchmesser führt lediglich zu einer Aufweitung des Strahles in den Randbereichen.

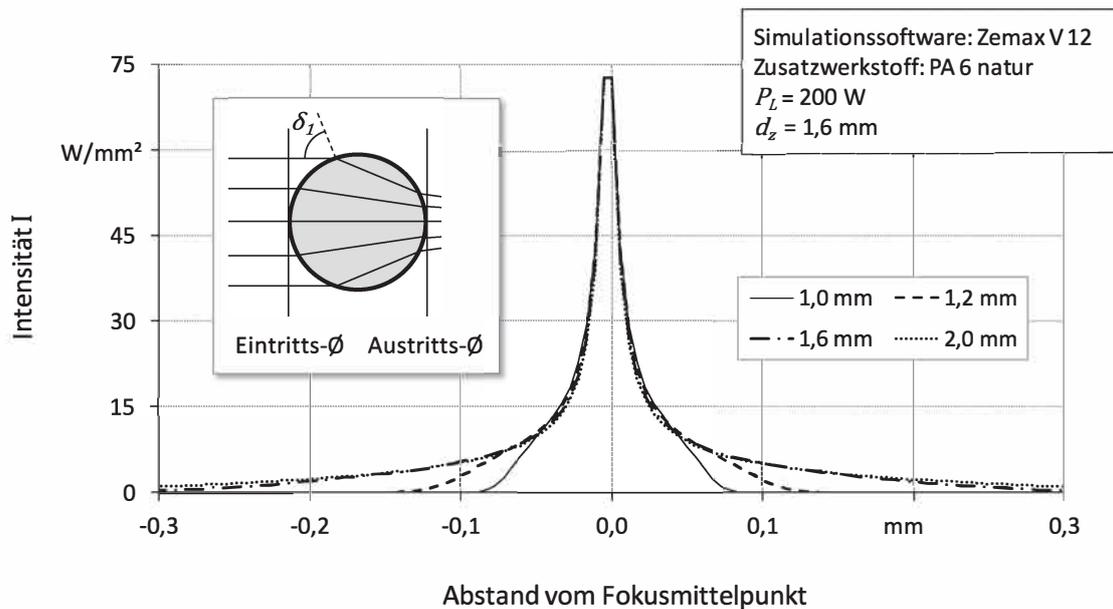


Bild 48: Simulierte Intensitätsverteilung der Laserstrahlung auf der Oberfläche der Fügepartner nach Transmission durch den Zusatzwerkstoff bei Verwendung unterschiedlicher Ausgangsdurchmesser sowie schematische Beeinflussung der Strahlkaustik während der Transmission (Skizze).

5.3 Einfluss der Systemparameter

Neben den untersuchten Prozessparametern, bilden die Systemparameter die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung des Laserstrahlschweißprozesses. Systemparameter werden im Gegensatz zu den jederzeit veränderbaren Prozessparametern bei der Auslegung der Bearbeitungsaufgabe festgelegt. Sie können während der Bearbeitung nicht verändert werden.

5.3.1 Einfluss des Werkstofftyps

Ist die Polymerverträglichkeit der Fügepartner gewährleistet, beruht die Durchführbarkeit und Qualität des Schweißprozesses in der ersten Prozessphase auf der Wechselwirkung der Laserstrahlung mit den Fügepartnern sowie dem thermischen Kontakt zwischen den beteiligten Fü-

gepartnern. Die zweite Prozessphase wird durch die gebildete Energiedichte-, Temperaturverteilung, die thermischen Werkstoffeigenschaften sowie die mechanischen und diffusiven Vorgänge in der Fügezone geprägt.

Bedingt durch die stark anisotropen Absorptions- und Wärmeleitungseigenschaften der kohlenstofffaserverstärkten, textilen Halbzeuge ist beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff eine Abhängigkeit der sich ausbildenden Schweißnaht vom Faservolumengehalt φ sowie dem Rußgehalt ϖ zu erwarten. Bild 49 zeigt die maximal erreichbare Bruchkraft σ_l in Abhängigkeit des Werkstofftyps bzw. der verwendeten Additive und die jeweils dafür nötige Streckenergie E_s .

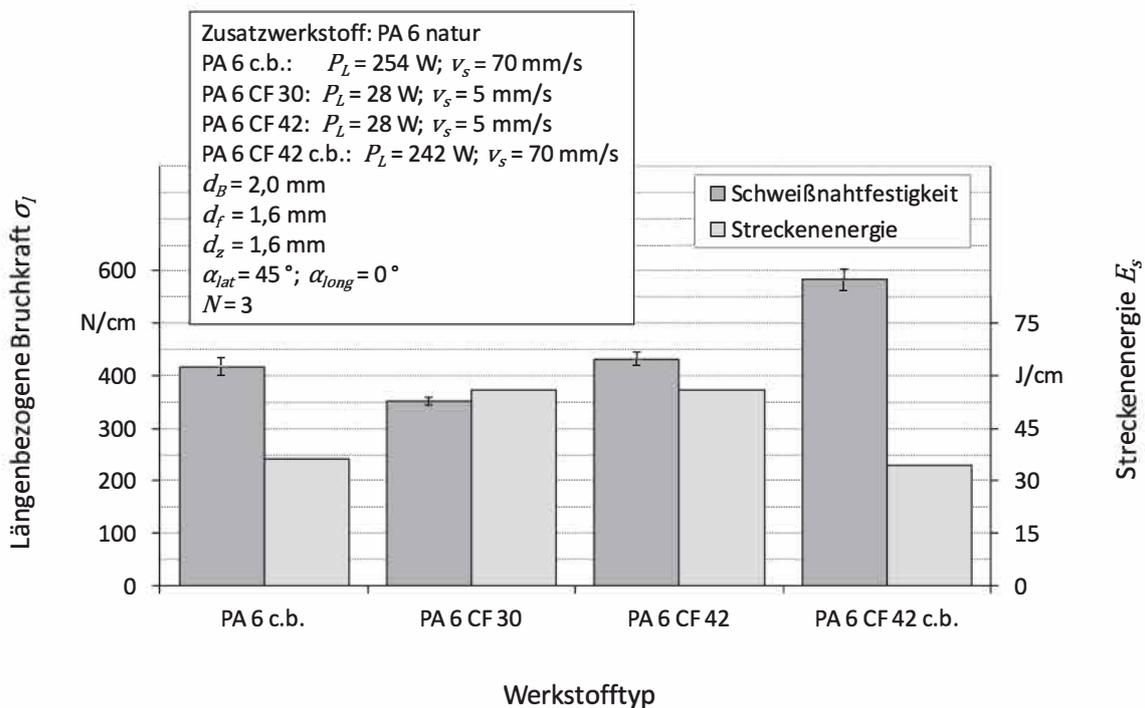


Bild 49: Maximal erreichbare Bruchkraft in Abhängigkeit des Werkstofftyps bzw. der verwendeten Additive und die jeweils nötige Streckenergie

Die Versuche zeigen, dass die Referenzbruchkraft $\sigma_l = 417 \text{ N/cm}$ bei Verwendung von unverstärktem PA 6 mit 1 Gew.-% Rußanteil mit dem kohlenstofffaserverstärkten PA 6 CF 30 nicht erreicht wird. Zudem ist die nötige Streckenergie mit $E_s = 56 \text{ J/cm}$ bei Verwendung des faserverstärkten Polyamides deutlich höher als bei Verwendung der unverstärkten, rußdotierten Variante ($E_s = 36 \text{ J/cm}$). Aufgrund der deutlich reduzierten Strahlungsabsorption innerhalb der Matrix (Abschnitt 2.2.6.3) dringt die Strahlung bei Verwendung der unpigmentierten Matrix tiefer in den Fügepartner ein und wird erst an den Verstärkungsfasern absorbiert. Die umgebende Matrix wird anschließend über Wärmeleitungsmechanismen erwärmt, bis die Oberfläche plastifiziert und eine stoffschlüssige Verbindung entstehen kann (Bild 50). Damit lässt sich die deutlich geringere Schweißgeschwindigkeit $v_s = 5 \text{ mm/s}$ bei PA 6 CF 30 im Vergleich zu $v_s = 70 \text{ mm/s}$ bei PA 6 c.b. sowie die Reduzierung der erreichten Bruchkraft bei Steigerung der

Schweißgeschwindigkeit (Bild 40) erklären. Durch den höheren Faservolumengehalt des PA 6 CF42 ist das Absorptionsvermögen des Werkstoffes etwas höher, das Wärmeleitungsvermögen entlang der Verstärkungsfasern steigt jedoch. Das erzielte Bruchkraftniveau liegt mit $\sigma_l = 432 \text{ N/cm}$ leicht über dem des unverstärkten PA 6 c.b.

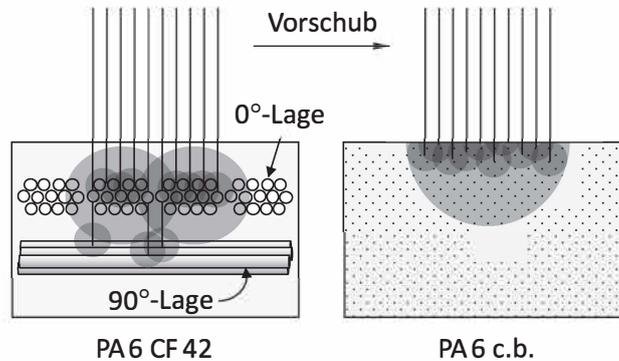


Bild 50: Schematische Darstellung der Absorption und der Wärmeausbreitung bei Verwendung unterschiedlicher laserabsorbierender Halbzeuge

Eine Möglichkeit den anisotropen Absorptionseigenschaften der faserverstärkten Werkstoffe entgegenzuwirken, ist die Modifikation des Matrixpolymers mit Ruß. Dadurch kann eine nahezu ortsunabhängige, homogene Absorption der auftreffenden Laserstrahlung in den oberflächennahen Schichten der beiden Fügepartner erreicht werden. Da die oft gewünschte Schwarzfärbung der Halbzeuge bereits durch die beinhalteten Kohlenstofffasern gewährleistet wird, werden nahezu alle handelsüblichen Organobleche (Abschnitt 2.1.3) ohne den Zusatz von Rußpigmenten hergestellt. Die Untersuchungen zur erreichbaren Bruchkraft bei Verwendung der optisch modifizierten Werkstoffe zeigen, dass neben einer deutlichen Senkung der nötigen Streckenenergie ($E_s = 35 \text{ J/cm}$) auch deutlich höhere Schweißnahtbruchkräfte von bis zu $\sigma_l = 584 \text{ N/cm}$ erreicht werden. Durch den reduzierten Bedarf an Wechselwirkungszeit für Wärmeleitvorgänge liegt die Schweißgeschwindigkeit bei $v_s = 70 \text{ mm/s}$.

Durch die heterogene Ausbildung der Schweißnaht im Fall des Organoblechs ist eine Angabe der Verbindungsfestigkeiten in Form der Zugscherfestigkeit, die die auftretende Maximalkraft während der Prüfung auf die jeweilige Anbindungsfläche bezieht, nur mit großem Aufwand realisierbar. Ein qualitativer Vergleich der resultierenden Fügeflächen beider Werkstoffkombinationen soll dennoch Aufschluss darüber geben, ob die Unterschiede in den erzielten längenbezogenen Bruchkräften allein auf eine qualitativ hochwertigere Schweißnaht oder auf eine Vergrößerung der Anbindungsfläche zurückzuführen sind. Dazu werden Querschliffbilder der Fügeverbindungen beider Werkstoffkombinationen analysiert (Bild 51). Die Bestimmung der Anbindungsbreite für PA 6 CF42 und PA 6 CF42 c.b. ergibt eine um etwa 10 % größere Anbindungsfläche für den rußpigmentierten Werkstoff. Die höhere Bruchkraft ist folglich nicht ausschließlich auf die vergrößerte Anbindungsfläche zurückzuführen, sondern auch auf eine qualitativ hochwertigere Füge-naht. Die hierfür berechneten Zugscherfestigkeiten liegen bei

$\sigma_A = 45 \text{ N/mm}^2$ für PA6 CF42 bzw. $\sigma_A = 55 \text{ N/mm}^2$ für PA6 CF42 c.b. Bezogen auf die Grundwerkstofffestigkeit des Matrixpolymers (Abschnitt 5.1.3) entspricht dies einem Kurzzeitschweißfaktor $s = 0,73$ bzw. $s = 0,90$.

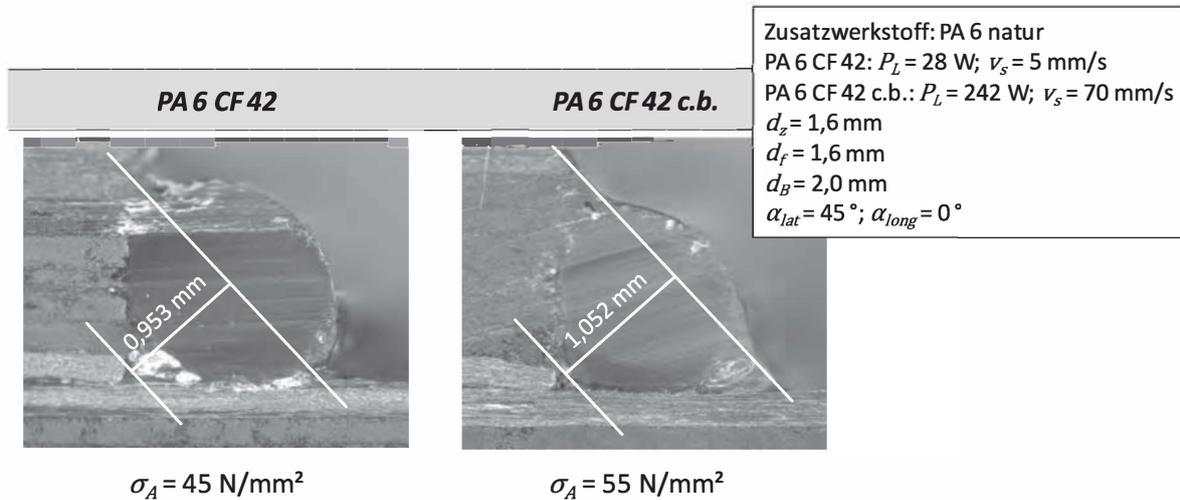


Bild 51: Querschliffbilder der Fügenähte bei Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe mit Angabe der Anbindungsbreite

Zur Verifizierung der in diesem Abschnitt beschriebenen Wechselwirkung der Laserstrahlung mit den unterschiedlichen Werkstofftypen werden Thermographieaufnahmen bei Blindschweißungen mit unterschiedlichen Halbzeugen durchgeführt (Bild 52). Ein Vergleich der Temperaturprofile senkrecht zur Schweißrichtung offenbart signifikante Unterschiede in den sich einstellenden Maximaltemperaturen T_{max} zwischen PA6 c.b. und PA6 CF42. Bei Verwendung des PA6 c.b. wird bei einer Laserausgangsleistung $P_L = 5 \text{ W}$ und der Schweißgeschwindigkeit $v_s = 25 \text{ mm/s}$ eine maximale Temperatur in der Schweißnaht von $T_{max} = 472^\circ\text{C}$ gemessen. Bei gleichen Parametereinstellungen wird im Fall des Organoblechs PA6 CF42 eine Maximaltemperatur von $T_{max} = 315^\circ\text{C}$ erreicht. Das bestätigt die deutlich höhere Streckenenergie, die bei Anwesenheit einer endlosen Kohlenstofffaserverstärkung im Vergleich zu unverstärkten Thermoplasten aufgebracht werden muss, um die Bedingung $T_{max} = \text{const.}$ zu erfüllen. Bei der modifizierten Werkstoffvariante PA6 CF42 c.b. mit Verstärkungsfasern und zusätzlichem Pigmentruß zur verbesserten Absorption beträgt die Maximaltemperatur T_{max} immerhin noch 337°C . Die Thermographieaufnahmen zeigen überdies die sehr begrenzt ausgedehnte und homogene WEZ senkrecht zur Schweißrichtung bei Verwendung des unverstärkten, rußpigmentierten PA6 c.b. Entsprechend dem geringen Wärmeleitungsvermögen des Polyamides ist das Abkühlverhalten sehr träge. Daraus folgt eine ausgeprägte WEZ parallel zur Fügerichtung. Im Gegensatz dazu ist die WEZ bei Verwendung des faserverstärkten PA6 CF42 quer zur Vorschubrichtung deutlich inhomogener und ausgeprägter. Dies ist auf die anisotropen und sehr viel höheren Wärmeleitungseigenschaften der Kohlenstofffasern im Gegensatz zur umgebenden Polymermatrix zurückzuführen (Abschnitt 5.2.2.2). Die Modifizierung der faserverstärkten

Organobleche durch Zugabe von Pigmentruß (PA 6 CF42 c.b.) trägt zur verbesserten Absorption der Laserstrahlung in den oberflächennähen Schichten bei. Die Wärmeverteilung wird auf die Wechselwirkungsfläche zwischen Laserstrahlung und Werkstückoberfläche konzentriert. Die Abkühlrate ist aufgrund der geringeren Eindringtiefe und des verbundenen geringeren erwärmten Polymervolumens geringfügig höher. Bei paralleler Ausrichtung der obersten Lage der Verstärkungsfasern zur Schweißrichtung (PA 6 CF42 II) ist die Wärmeausbreitung senkrecht zur Schweißrichtung deutlich eingeschränkt.

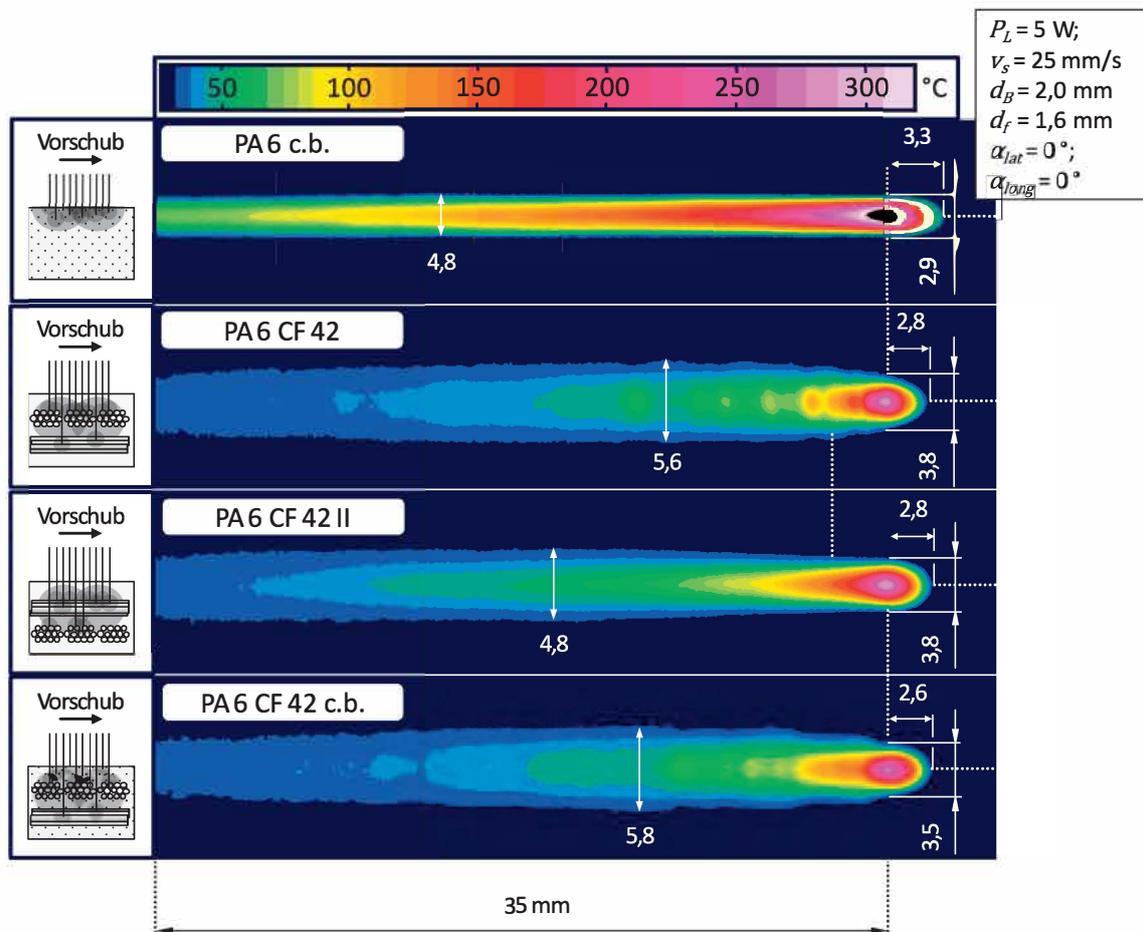


Bild 52: Thermographisch ermittelte Temperaturprofile bei Blindschweißungen an der Oberfläche bei Verwendung unterschiedlicher Organobleche

5.3.2 Einfluss des Zusatzwerkstoffs

Der Prozessenerfolg des Laserstrahlschweißens wird maßgeblich durch die optischen Eigenschaften der lasertransparenten Fügepartner bestimmt (Abschnitt 2.2.6.3). Der Zusatzwerkstoff fungiert als lasertransparenter Haftvermittler. Während des Fügevorgangs trifft die elektromagnetische Strahlung auf den Zusatzwerkstoff und wird abhängig vom Einfallswinkel an der Oberfläche reflektiert, beim Übergang in das Medium gebrochen und an den inneren Strukturen des

Polymers absorbiert (Abschnitt 2.2.2). Der Zusatzwerkstoff wird anschließend über Wärmeleitungs Vorgänge aufgeschmolzen, bis sich die Fügeverbindung in der Kehlnaht ausbildet. Die drei wichtigsten Eigenschaften des Zusatzwerkstoffs, die sich auf die resultierende Strahlkaustik sowie das Prozessverhalten auswirken, sind die Geometrie, der Durchmesser und der Rußgehalt. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher untersucht.

5.3.2.1 Einfluss des Rußgehaltes

Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, wird der polymere Zusatzwerkstoff während des Schweißprozesses nie vollkommen plastifiziert. Durch den geringen Anteil an schmelzflüssiger Phase bleiben teilweise Lufteinschlüsse in Form von Poren in der Fügezone zurück, die geometriebedingt zwischen dem runden Zusatzwerkstoff und den beiden Fügepartnern vorhanden sind. Die Poren haben einen negativen Einfluss auf die resultierende Nahtqualität. Ziel der Pigmentierung des Zusatzwerkstoffs mit Rußpartikeln ist die gezielte Beeinflussung des absorbierten Strahlungsanteils zur Steuerung der Temperaturverteilung zwischen Fügepartnern und Zusatzwerkstoff.

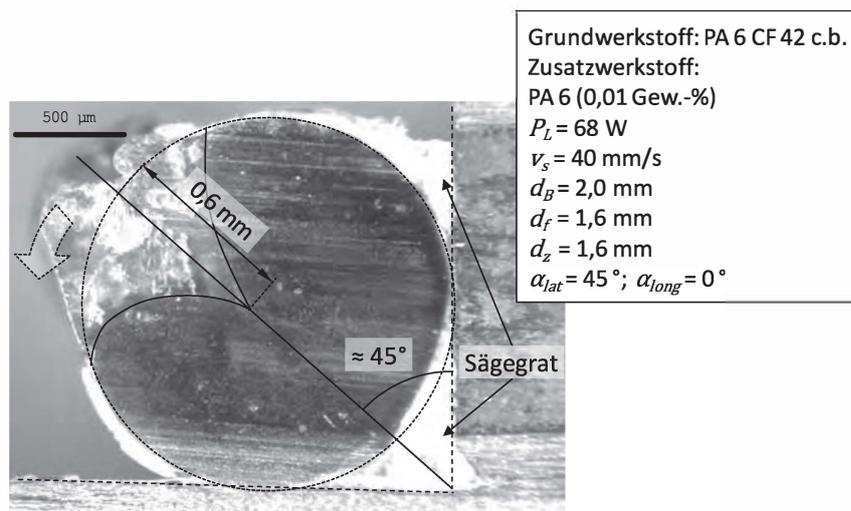


Bild 53: Mikroskopieaufnahme der Fügeverbindung im Querschnitt bei Verwendung des Schweißzusatzwerkstoffs mit 0,01 Gew.-% Rußanteil

Zur Untersuchung des Rußgehaltes ϖ des verwendeten Zusatzwerkstoffs auf den Fügeprozess und die damit verbundene Nahtqualität, werden Schweißungen mit den in Tabelle 5 aufgeführten Zusatzwerkstoffen mit $\varpi = \{0; 0,01; 0,02; 0,05 \text{ Gew.-%}\}$ durchgeführt. Der Einfluss des Rußgehaltes auf die optischen Eigenschaften wird in Abschnitt 2.2.6.3 diskutiert. Die Versuche zeigen, dass bereits bei Verwendung des Zusatzwerkstoffs mit dem geringsten Rußanteil $\varpi = 0,01 \text{ Gew.-%}$ ein sehr großer Anteil der Strahlung im Zusatzwerkstoff absorbiert wird. Anhand des Schliffbildes in Bild 53 ist die thermische Schädigung des Zusatzwerkstoffs bis zu

einer Tiefe von 0,6 mm unter der Oberfläche (keilförmiger, heller Bereich) deutlich zu erkennen. Validiert werden die experimentellen Ergebnisse mithilfe einer Strahlengangsimulation¹⁵ mit der Raytracing Software Zemax 12 des gleichnamigen Herstellers. Das Simulationssetup dazu ist in Bild 54 dargestellt.

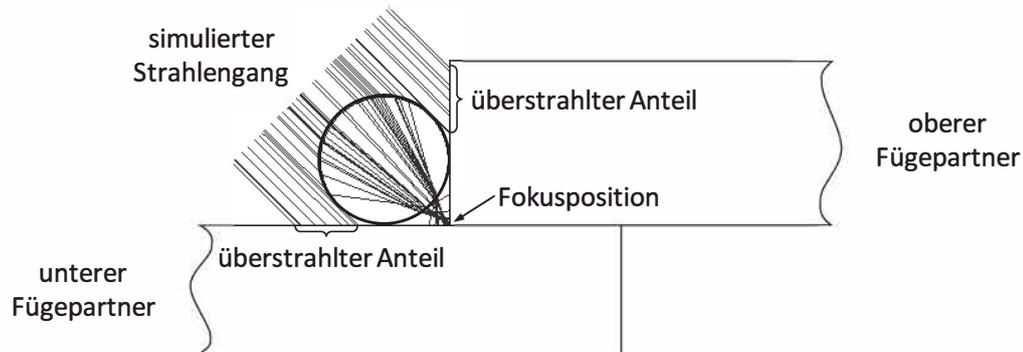


Bild 54: Simulationssetup der durchgeführten Strahlengangsimulation

Die durchgeführte Raytracingsimulation bestätigt die gewonnenen Erkenntnisse. Bereits bei einem Rußanteil von 0,01 Gew.-% ist keine transmittierte Strahlung mehr zu detektieren (Bild 55 links). Die mittlere freie Weglänge, die durch die Wechselwirkung mit den Rußpartikeln bestimmt wird, ist eindeutig zu gering. Die Simulation (Bild 55 rechts) zeigt lediglich messbare Intensitäten im überstrahlten Bereich seitlichen des Zusatzwerkstoffs durch Reflexion an dessen Seitenrändern. Für zielführende Ergebnisse muss der Rußgehalt der Polymermatrix um etwa zwei Dekaden reduziert werden. Ein derart geringer Rußanteil ist aus produktionstechnischen Gründen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht reproduzierbar möglich.

¹⁵ Simulationsprämissen:

$d_{c.b.} = 250 \text{ nm}$, $\rho_{c.b.} = 0,3 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{PA6} = 1,13 \text{ g/cm}^3$, $n_{c.b.} = 5,0$, $n_{PA6} = 1,53$, $P_L = 200 \text{ W}$, Dämpfungskonstante Ruß (Lambert-Beer): $D_{opt} = 3 \cdot 10^{-4}$, Quellverteilung: Supergauß-Strahlprofil 8. Ordnung, thermische Effekte nicht berücksichtigt, nicht sequentielles Raytracing

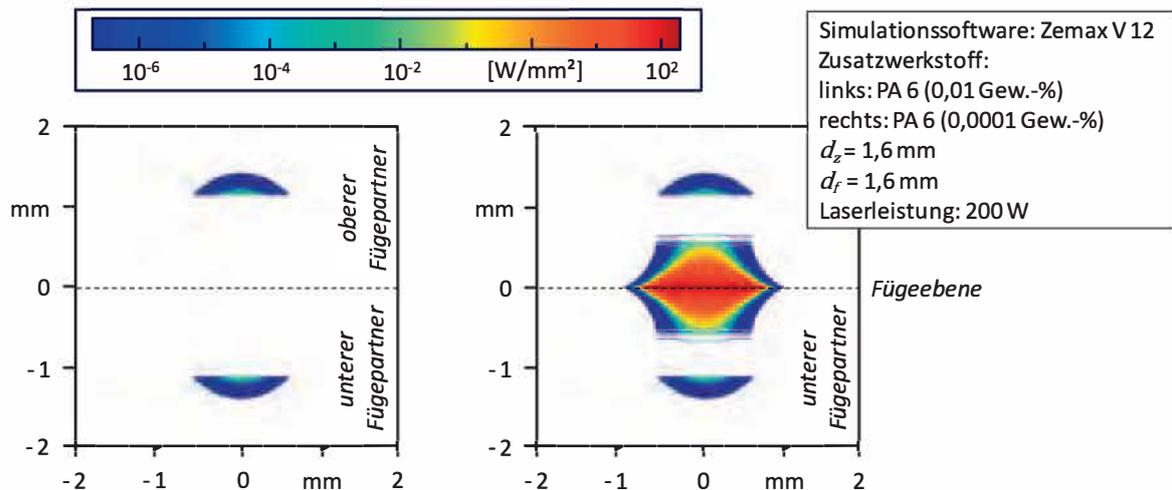


Bild 55: Simulierte Intensitätsverteilung der Laserstrahlung auf den Fügeflächen der beiden Fügepartner bei Verwendung der Zusatzwerkstoffe mit 0,01 (links) und 0,0001 Gew.-% (rechts) Rußanteil

5.3.2.2 Einfluss des Durchmessers

Neben der reinen Nahtqualität bestimmt vor allem die Anbindungsfläche die erreichbare Bruchkraft der Fügeverbindung. Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, muss mangels Vollplastifizierung des Zusatzwerkstoffs dessen Zuführgeschwindigkeit stets an die Vorschubgeschwindigkeit der Handlungseinheit angepasst werden (Formel 11). Die maximal erreichbare Anbindungsbreite ist durch den Querschnitt des Zusatzwerkstoffs beschränkt.

Eine Möglichkeit der gezielten Beeinflussung der Anbindungsbreite ist die Variation des Zusatzwerkstoffdurchmessers. In Bild 56 sind die Bruchkräfte σ_l der zwei untersuchten Zusatzwerkstoffdurchmesser $d_{z,1} = 1,6$ mm und $d_{z,2} = 2,0$ mm in Abhängigkeit der Streckenenergie E_s dargestellt. Die Versuche werden mit PA6 CF42 und rußfreiem Zusatzwerkstoff bei einer Schweißgeschwindigkeit $v_s = 30$ mm/s durchgeführt. Der Fokusbereich des Laserstrahls wird an den Durchmesser des jeweils verwendeten Zusatzwerkstoffs angepasst. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass mit steigendem Durchmesser des Zusatzwerkstoffs mehr Energie für den Fügeprozess benötigt wird. Die Versuche zeigen auch, dass die erzielte Bruchkraft durch Verwendung des Zusatzwerkstoffs mit größerem Durchmesser um etwa 10 % von $\sigma_l = 428$ N/cm auf $\sigma_l = 472$ N/cm gesteigert werden kann.

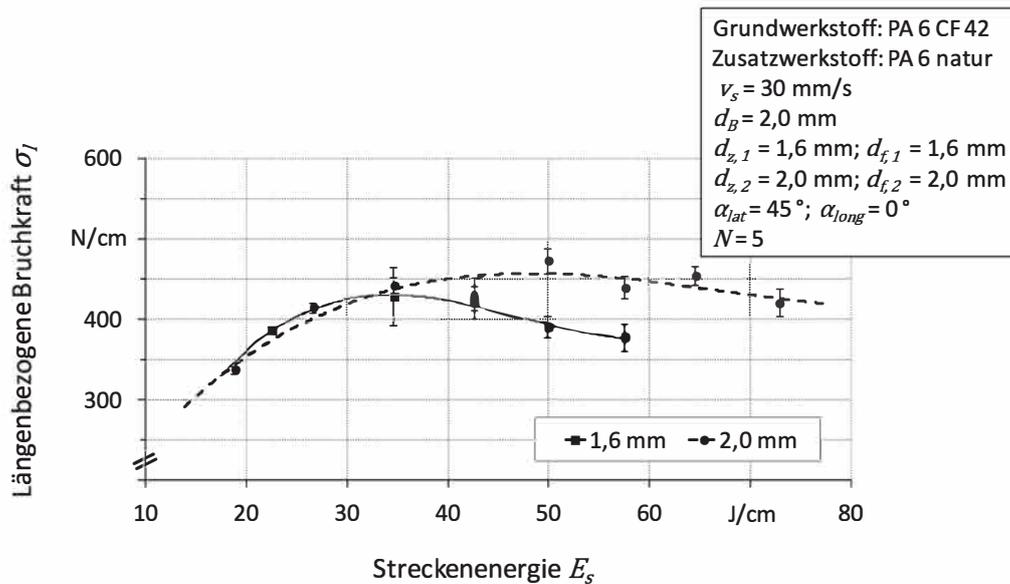


Bild 56: Einfluss des Zusatzwerkstoffdurchmessers auf die längenbezogene Bruchkraft der Verbindung

Die Steigerung der Bruchkraft ist ausschließlich auf die vergrößerte, tragende Anbindungsbreite a zurückzuführen. Diese wird bei Verwendung des Zusatzwerkstoffs mit dem Durchmesser $d_z = 2,0 \text{ mm}$ um fast 10 % auf $a = 1,047 \text{ mm}$ ausgedehnt (Bild 57). Die resultierende Zugscherfestigkeit σ_A beträgt 45 N/mm^2 und entspricht damit der Verbindungsfestigkeit bei Verwendung des Zusatzwerkstoffs mit dem Durchmesser $d_z = 1,6 \text{ mm}$. Die Steigerung der Bruchkraft bzw. der Anbindungsbreite liegt damit deutlich unterhalb der Vergrößerung des Zusatzwerkstoffdurchmessers (25 %) bzw. der Querschnittsfläche (56 %). Das Potenzial kann folglich nur begrenzt ausgeschöpft werden.

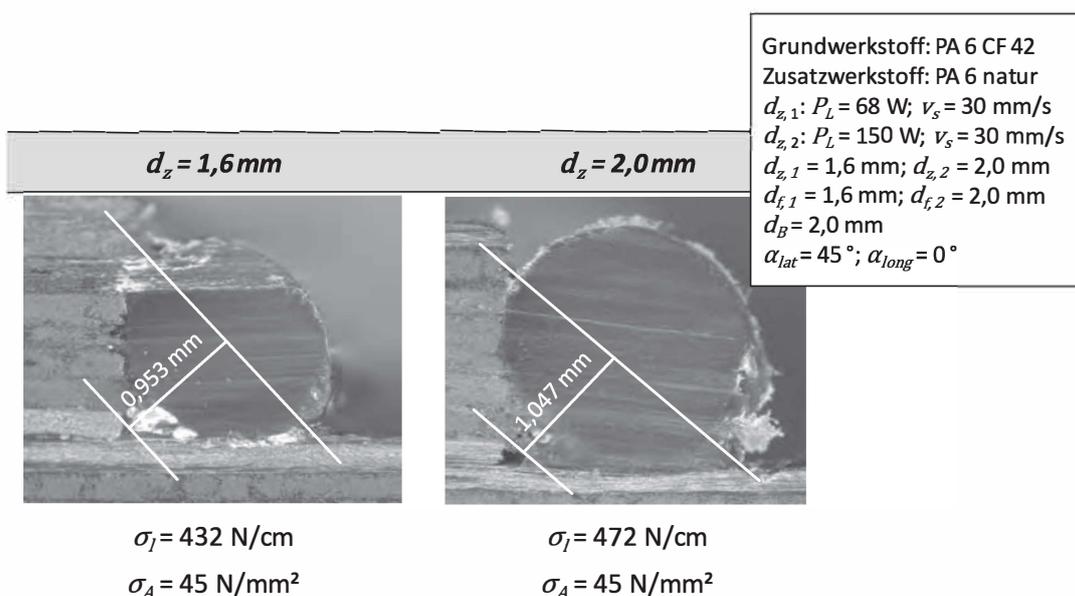


Bild 57: Fügeverbindung bei Verwendung unterschiedlicher Durchmesser des Zusatzwerkstoffs mit resultierender Anbindungsbreite

Die Verwendung des Zusatzwerkstoffs mit größerem Durchmesser führt zu unzureichenden Aufschmelzungen in den der Kehle abgewandten Bereichen. Auch kann der vergrößerte Hohlraum unter dem runden Zusatzwerkstoff nicht gänzlich durch abschmelzendes Polymer aufgefüllt werden. Als Resultat bleiben Poren in der Fügezone, die sich bei weiterer Steigerung des Durchmessers negativ auf die Verbindungsqualität auswirken können.

5.3.2.3 Einfluss der Drahtgeometrie

Eine weitere Möglichkeit die Anbindungsqualität zu optimieren, ist die Anpassung der Drahtgeometrie an die Fügegeometrie der Kehlnaht. Da neben einer gleichmäßigen Erwärmung der Fügezone der thermische Kontakt zwischen den Fügepartnern beim Laserstrahlschweißen prozessentscheidend ist, wäre ein dreieckiger Querschnitt des Zusatzwerkstoffs die optimale Geometrie. Dadurch kann der Einfluss durch Restspalte, also die Be- oder gar Verhinderung des thermischen Kontaktes zwischen den beteiligten Fügepartnern deutlich reduziert werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass bei Verwendung des modifizierten Zusatzwerkstoffs mit rechtwinkligem Dreieckquerschnitt und einer Schenkellänge von $l_d = d_B = 1,6$ mm keine Verbesserung erkennbar ist. Wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, fungiert der lasertransparente Zusatzwerkstoff beim Strahlendurchgang als optisches Element und nimmt dadurch Einfluss auf die resultierende Strahlkaustik des Laserstrahls. Die Strahlung wird abhängig vom Einfallswinkel an der Oberfläche reflektiert. Der transmittierte Anteil der Strahlung wird aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes der Luft ($n_{Luft} \approx 1,0$) und dem Polyamid ($n_{PA6} \approx 1,53$) beim Ein- und Austritt gebrochen. Die durchgeführte Raytracingsimulation (Bild 58) zeigt die vollständige Reflexion der Laserstrahlung. Ein Zusatzwerkstoff mit dreieckigem Querschnitt wirkt im Strahlengang des Laserstrahls als Prisma und verhindert so eine Transmission der einfallenden Strahlung. Die Simulationsergebnisse validieren folglich die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen. Die Strahlung wird mehrfach abgelenkt und letztendlich zurückreflektiert. Dieser Ansatz zur Optimierung der Drahtgeometrie führt also zu einer deutlichen Verschlechterung der resultierenden Nahtqualität.

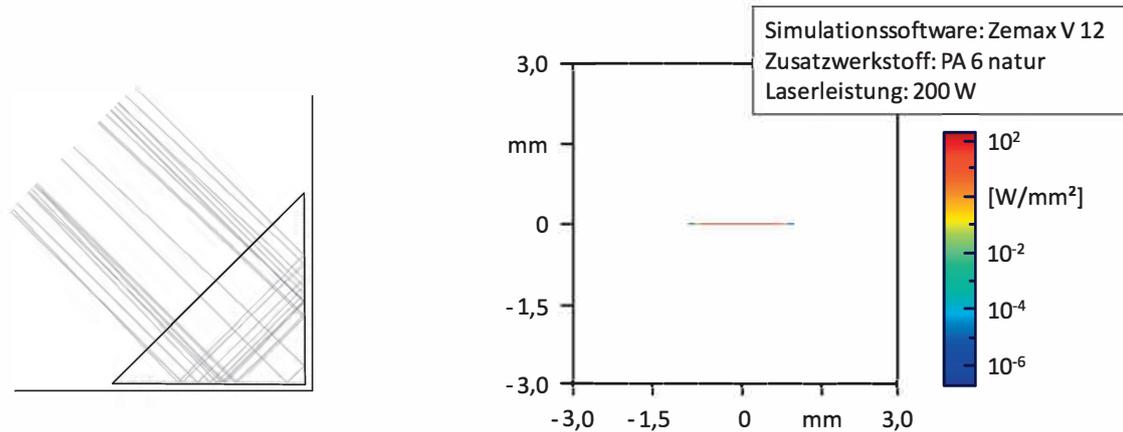


Bild 58: Schematische Darstellung des Strahlengangs bei Verwendung eines dreieckigen Zusatzwerkstoffs (links) sowie die damit simulierte Intensitätsverteilung der Laserstrahlung auf den Fügeflächen der beiden Fügepartner (rechts)

5.3.3 Einfluss der Nahtgeometrie

Neben den untersuchten Kehlnähten an Überlappverbindungen sind für das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff auch andere Nahtformen, wie Stumpfstöße mit V- bzw. X-Nahtform denkbar. Diese bieten im Gegensatz zu Kehlnähten ein optimales Leichtbaupotenzial, einen optimalen Kraftfluss sowie eine geringe Entgasungsproblematik [130].

Zur Beurteilung der Verbindungsqualität wird der Einfluss der Nahtgeometrie auf die statische Bruchkraft anhand dreier charakteristischer Nahtformen (Bild 59), die sich beim Schweißen von Kunststoffen bewährt haben [131] untersucht. Die Kanten der beiden Fügepartner werden mit einer Phase versehen, ein Öffnungswinkel von 60° bzw. 90° entsteht [132, 133]. Als Versuchswerkstoffe dienen die Werkstoffe PA6 CF30 und PA6 CF42. Als Referenz dienen gefügte Proben mit Kehlnähten und den verwendeten Anstellwinkeln $\alpha_{lat} = 45^\circ$ bzw. $\alpha_{long} = 0^\circ$.

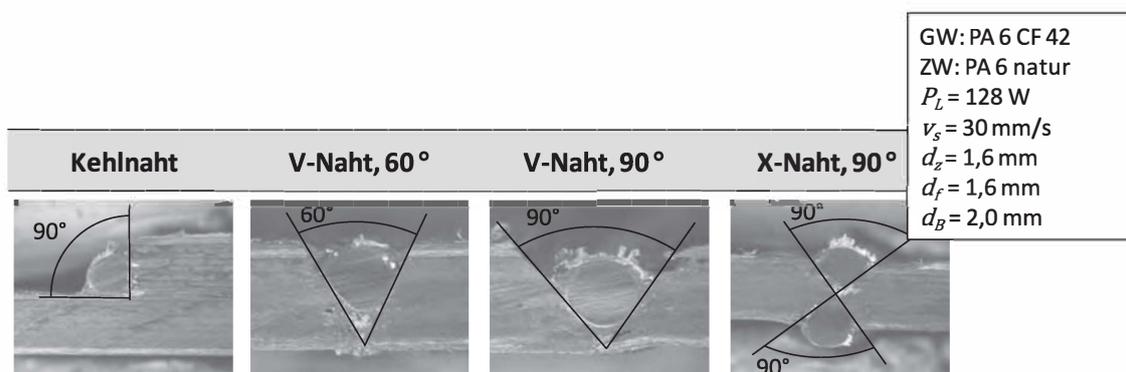


Bild 59: Schliffbilder gefügter Proben mit unterschiedlichen Nahtformen

Die experimentellen Ergebnisse der Kehlnaht (Bild 60 links) zeigen den bekannten Bruchkräfteunterschied in Abhängigkeit des Faservolumenanteils der Kohlenstofffaserverstärkung zwischen PA 6 CF30 und PA 6 CF42 (Abschnitt 5.3.1). Bei einem Vergleich der ermittelten Bruchkräfte der gefügten Proben mit den unterschiedlichen Nahtformen wird deutlich, dass die erreichten Werte beim Fügen der V-Form um bis zu 23 % über den Werten der Kehlnaht liegen (PA 6 CF30). Der Stumpfstoß mit X-Form liefert mit $\sigma_l = 535 \text{ N/cm}$ bei Verwendung des PA 6 CF42 das beste Ergebnis.

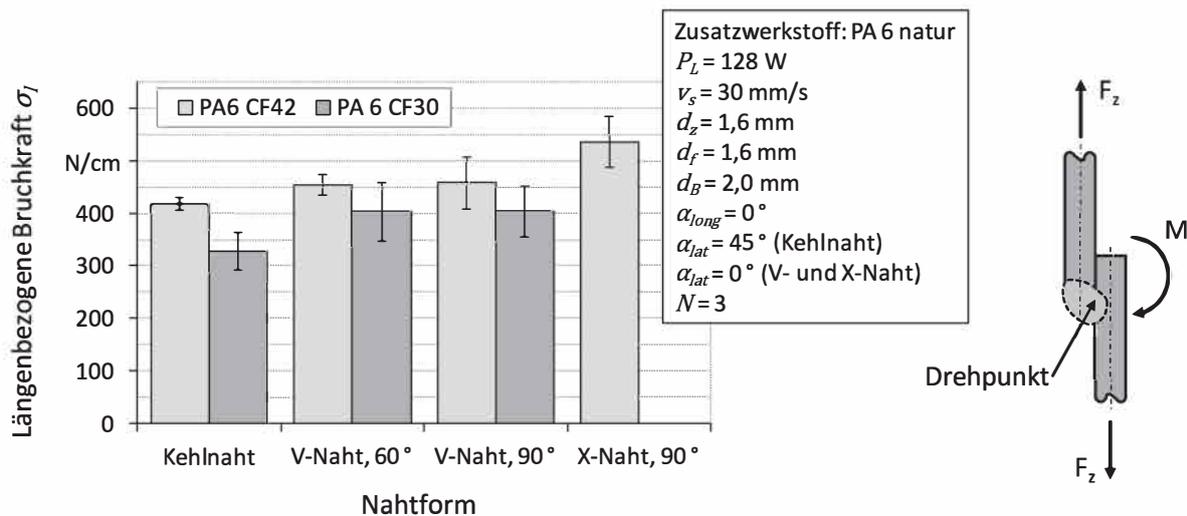


Bild 60: Einfluss der Nahtgeometrie auf die Bruchkraft (links) sowie die Kraftangriffspunkte und das daraus resultierende Biegemoment während der Zugscherprüfung (rechts)

Die Steigerung der Bruchkräfte ist weniger auf eine qualitativ hochwertigere Schweißnahtqualität zurückzuführen. Vielmehr ist die Naht in Bezug auf die Zugscherprüfung belastungsgerechter gestaltet (Abschnitt 4.3.2). Durch die exzentrische Kräfteinleitung bei der Zugscherprüfung von Kehlnahtschweißungen wirkt auf die Fügeverbindung nicht nur eine reine Zugkraft, sondern auch ein daraus resultierendes Biegemoment (Bild 60 rechts) [134]. Bei Stumpfstoßen tritt dieser Effekt nicht auf. Die deutlich höhere statische Zugscherkraft der X-Naht ist sowohl auf das reduzierte Biegemoment bei der Prüfung, wie auch auf die vergrößerte Anbindungsfläche, die durch das beidseitige Fügen entsteht zurückzuführen.

Neben den gerade eben beschriebenen positiven Eigenschaften der Stumpfstoße wirken sich die hohen Toleranzanforderungen an die zu fügenden Bauteile sowie der hohe Spann- und Positionierungsaufwand nachteilig aus. Aus diesem Grund wird für Serienanwendungen in der Regel die Kehlnahtgeometrie empfohlen.

5.3.4 Einfluss des Fügespalts

Für das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff ist der thermische Kontakt zwischen den beiden Fügepartnern und dem Zusatzwerkstoff prozessentscheidend. Voraussetzung ist eine

restspaltfreie Fügepartneranordnung. Ein Restspalt ist der lokale Abstand zwischen den beteiligten Fügepartnern in der Fügezone nachdem der Fügedruck angelegt ist. Durch Restspalte zwischen den Fügepartnern wird der thermische Kontakt be- oder gar verhindert bzw. die Anbindefläche reduziert und damit die Fügenahtqualität negativ beeinflusst. Restspalte werden z.B. durch den Herstellungsprozess, die Materialeigenschaften (Schrumpfung, Schwindung), Teiltoleranzen, Auswerfermarkierungen und mangelhafte Spanntechnik verursacht. Da die beschriebenen Toleranzanforderungen verbunden mit dem Positionierungsaufwand in abgeschwächter Form auch auf das Fügen von Kehlnähten zutreffen, ist ein völlig restspaltfreier Kontakt der beiden Fügepartner in der Realität nur mit unverhältnismäßigem Aufwand realisierbar. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Einfluss eines Fügespalt zwischen den beiden Organblechen auf die resultierende Nahtqualität untersucht. Wie die Ergebnisse in Bild 61 zeigen, wird die Bruchkraft der Fügeverbindung bei größer werdenden Fügespalten deutlich reduziert. Gegenüber der spaltfreien Verbindung sinkt die erreichbare Bruchkraft bei einem Spalt zwischen beiden Organblechen von $x_s = 0,1$ mm bereits um ca. 40 % von 576 auf 347 N/cm. Durch den Spalt verteilt sich eingebrachte Strahlungsleistung auf eine größere Oberfläche. Die Intensität wird geringer. Eine schmalere WEZ entsteht. Geringere Adhäsionskräfte zwischen den beiden Fügepartnern sind die Folge.

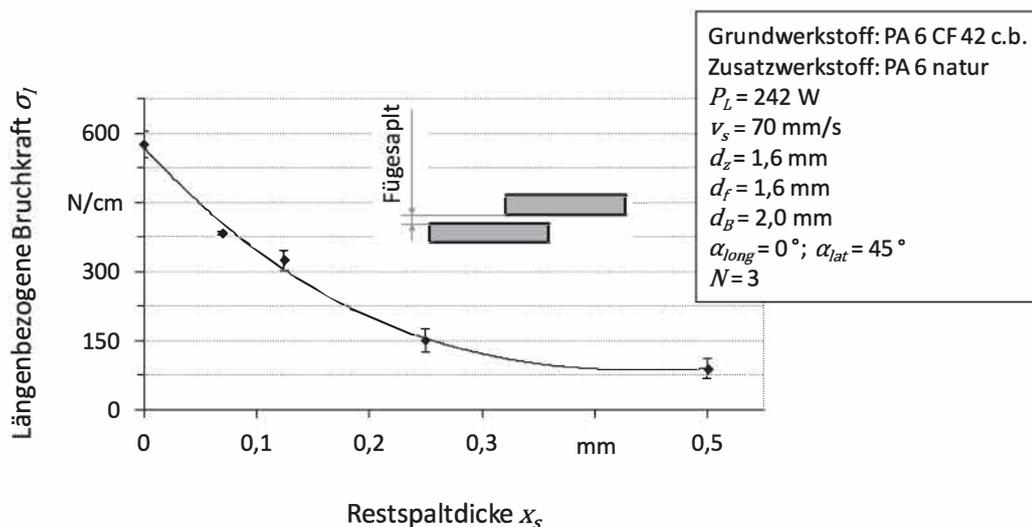


Bild 61: Längenbezogene Bruchkraft in Abhängigkeit des Fügespalt

5.3.5 Einfluss der Oberflächenqualität

Für eine spätere Serienanwendung des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff in der Bauteilfertigung ist der Einfluss der Oberflächenqualität bzw. Schnittkantenqualität von großer Bedeutung. Hierauf beruhen die Anforderungen an die vorgelagerten Prozessschritte der Halbzeugherstellung. Ein gängiges Mittel zur Beurteilung der Oberflächenqualität ist die Bestimmung der Oberflächenrauheit R_z . Bild 62 zeigt die erreichte Bruchkraft σ_l in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit R_z bei vier unterschiedlich hergestellten Schnittkanten – gefräst, gesägt, wasserstrahl- und lasergeschnitten.

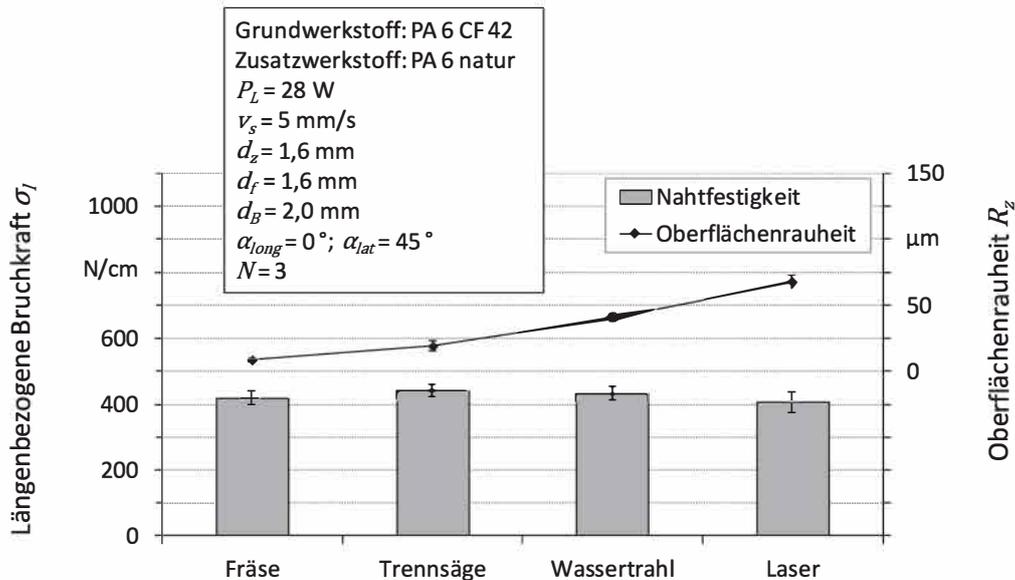


Bild 62: Oberflächenrauheit unterschiedlich hergestellter Schnittkanten sowie deren Einfluss auf die Bruchkräfte der Verbindung

Die Oberflächenrauheit R_z der unterschiedlich hergestellten Schnittkanten variiert zwischen $8 \mu\text{m}$ bei gefrästen und $67 \mu\text{m}$ bei laserstrahlgeschnittenen Proben. Es ist zu beobachten, dass die Schnittkantenqualität der mithilfe der drei Trennverfahren Fräsen, Sägen und Wasserstrahlschneiden hergestellten Proben unter Berücksichtigung der Streuung kaum Einfluss auf die entstehenden Bruchkräfte hat. Die erreichte Bruchkraft bei Verwendung laserstrahlgeschnittener Proben liegt etwa 6 % unter den Referenzwerten und ist mit einer größeren Streuung behaftet. Dies ist nicht nur auf die Oberflächenrauheit, sondern auch auf die thermische Vorschädigung der Proben durch das thermische Trennverfahren zurückzuführen.

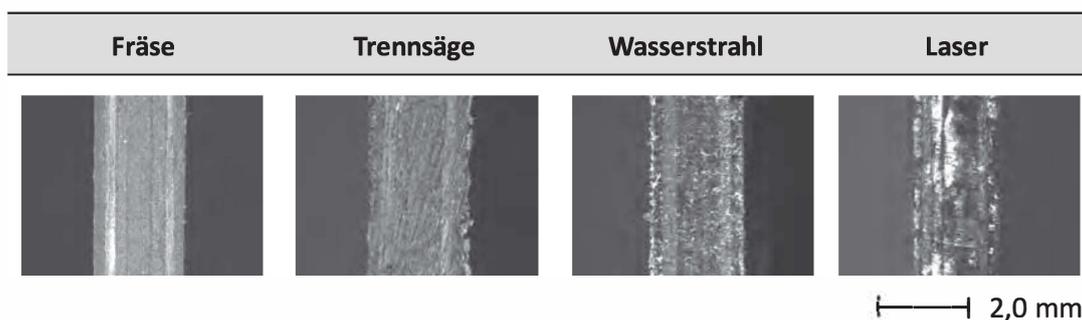


Bild 63: Oberflächenmorphologie der unterschiedlich hergestellten Schnittkanten Kohlenstofffaserverstärkter

Die Erwärmung des Zusatzwerkstoffs bis hin zur Plastifizierung muss über Wärmetransportmechanismen sichergestellt werden (Abschnitt 5.3.1). Die Wärmeleitungseigenschaften der kohlenstofffaserverstärkten Fügepartner sind anisotrop und stark von der Orientierung und Art der Faserverstärkung abhängig. Die verwendete Laserleistung P_L teilt sich gemäß der Formel 20 in einen Wärmestrom \dot{Q}_z der im Zusatzwerkstoff absorbierten Wärmeleistung sowie die Wärmeströme \dot{Q}_o und \dot{Q}_u der beiden von den Fügepartnern absorbierten Wärmeleistungen. Nicht zu vernachlässigen sind die Verluste durch Reflexion und Streuung an den Grenzschichten.

$$P_L = \dot{Q}_{AU} + \dot{Q}_{AO} + \dot{Q}_{AD} + \dot{Q}_{Verluste} \quad (20)$$

Die maximal erreichbare Bruchkraft der Verbindung nimmt unabhängig von der applizierten Streckenenergie E_s mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit stetig ab. Grund dafür ist die geringer werdende Wechselwirkungszeit t_{ww} zwischen der Laserstrahlung und den Fügepartnern sowie dem daraus resultierenden geringeren plastifizierten Schmelzvolumen. Aufgrund der Transparenz der Polymermatrix wird die Laserstrahlung zuerst an den Verstärkungsfasern absorbiert. Die umliegende Matrix muss anschließend über Wärmeleitungseffekte erwärmt werden.

Durch die Zugabe von Pigmentruß können die Absorptionseigenschaften der Polymere und damit die Wärmeverteilung während des Fügeprozesses gezielt beeinflusst werden (Abschnitt 2.2.6.3). Die Additivierung des Zusatzwerkstoffs führt im Rahmen dieser Arbeit jedoch zu keiner Verbesserung der Schweißnahtqualität, da die geringen Anteile an Pigmentruß in der Polymermatrix $\varpi \ll 0,01$ Gew.-% aus produktionstechnischen Gründen nicht reproduzierbar hergestellt werden können (Abschnitt 5.3.2.1). Dennoch führt die Zugabe von Pigmentruß zum Matrixpolymer der beiden kohlenstofffaserverstärkten Fügepartner zu einer deutlichen Homogenisierung des Absorptionsverhaltens und zur Konzentration der WEZ auf den Fügebereich. Erst dadurch ist es möglich, unter Berücksichtigung qualitativer Bewertungskriterien eine gute Nahtqualität auch bei hohen Schweißgeschwindigkeiten ($v_s = 70$ mm/s) zu erreichen. Ohne den Zusatz von Absorberpartikeln weist die Polymermatrix eine hohe Transmission für die verwendete Laserstrahlung auf. Die Strahlung wird dadurch erst an den Kohlenstofffasern absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die umgebende Matrix wird anschließend über Wärmeleitungsmechanismen erwärmt und plastifiziert. Dieser Vorgang ist jedoch zeitabhängig. Die nötige Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahlung und Fügepartnern steigt. Dies führt zu einer stetigen Abnahme der längenbezogenen Bruchkraft der Fügeverbindung (Abschnitt 5.2.1). Ebenfalls bedingt durch den Aufbau der Organobleche ist der Einfluss der Strahlanstellung auf den Fügeprozess. Aufbau und Orientierung der Verstärkungsfasern führen zu unterschiedlich ausgeprägten WEZ auf den oberen und unteren Fügepartnern (Abschnitt 5.2.2). Ein optimales Fügeergebnis wird bei einem lateralen Anstellwinkel von $\alpha_{lat} = 45^\circ$ mit einer maximalen Toleranz von etwa $\pm 7,5^\circ$ um den Ausgangspunkt erreicht. Abweichungen hin zu größeren Anstellwinkeln haben einen geringeren Einfluss auf das Fügeergebnis, als hin zu kleineren. Grund

dafür ist, dass die Veränderungen der Strahlungsintensitäten durch das anisotrope Wärmeleitungsverhalten der kohlenstofffaserverstärkten Thermoplaste teilweise kompensiert werden können. Die longitudinale Strahlanstellung wird durch die Bearbeitungsoptik auf einen Bereich von $\alpha_{long} = [-2^\circ; +8^\circ]$ begrenzt. Kleinere laterale Anstellwinkel führen zu Kollisionen der Bearbeitungsoptik mit den Bauteilen, größere hingegen zu Ungenauigkeiten der Zusatzwerkstoffzuführung.

Die Auswirkungen der einzelnen Parameteränderungen auf die resultierende Verbindungsqualität werden in Tabelle 7 vereinfacht zusammengefasst. Die Auswirkungen werden mittels Pfeilen dargestellt und beziehen sich auf eine Steigerung des jeweiligen Parameters.

Tabelle 7: Zusammenfassende Darstellung des Einflusses einzelner Parameteränderungen auf die Verbindungsqualität

Parameter		Auswirkung
Vorschubgeschwindigkeit	v_s	↓
Laterale Strahlanstellung ¹²	α_{lat}	↓
Longitudinale Strahlanstellung ¹²	α_{long}	↓
Fokusedurchmesser ¹²	d_f	↘
Durchmesser des Zusatzwerkstoffs	d_z	↗
Kohlenstofffaseranteil der Fügepartner	CF	↗
Rußgehalt der Fügepartner	$c.b.$	↑
Rußgehalt des Zusatzwerkstoffes	$c.b.$	↓
Fügespaltdicke	x_s	↓
Oberflächenrauheit der Fügeflächen	R_z	→

¹⁶ Bei den vorliegenden Parametern gibt es jeweils ein Optimum. Sowohl positive, wie auch negative Veränderungen des Parameters führen zur dargestellten Auswirkung.

6 Produktionstechnische Umsetzung

6.1 Bauteil- und Prozessgestaltungsrichtlinien

Die Beurteilung der Herstellbarkeit ist ein wesentlicher Schritt im Entwicklungsprozess eines jeden Bauteils. Die richtige Vorbereitung und -bewertung bildet ein erhebliches Einsparpotenzial an Entwicklungs- und Produktionskosten. In diesem Zusammenhang ist einer der wichtigsten Aspekte die fertigungsgerechte Bauteilgestaltung. Die Auswahl der Fügeverfahren ist frühzeitig bei der Konstruktion- und Bauteilherstellung zu beachten. Für das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte und experimentell untersuchte Fügeverfahren des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff ergeben sich aus der beschriebenen Anlagentechnik sowie den durchgeführten Versuchen einige verfahrensspezifische Bauteil- und Prozessgestaltungsrichtlinien, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Im Hinblick auf eine geeignete Werkstoffauswahl, wie sie für die Auslegung eines jeden Durchstrahlschweißprozesses zwingend erforderlich ist, sind bzgl. kohlenstofffaserverstärkter Verbundwerkstoffe im Bereich der Formulierung der Polymermatrix Modifizierungen für eine verbesserte Schweißbarkeit denkbar. Kommerziell verfügbare Organobleche sind nicht für das Laserstrahlschweißen qualifiziert. Die verwendeten Matrixpolymere sind daher typischerweise naturbelassen. Untersuchungen zeigten, dass sich durch die Zugabe von Pigmentruß eine deutlich verbesserte Strahlungsabsorption und damit ein homogeneres und konzentrierteres Temperaturprofil an der Oberfläche des Organoblechs erzeugen lassen. Die Verwendung absorbierender Additive ist demzufolge anzuraten.

Neben dem typischen Verhalten der Verbindungsfestigkeit beim Laserdurchstrahlschweißen zeigt die Untersuchung des Verfahrens eine sehr deutliche Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit v_s . Die maximal erreichbare Bruchkraft nimmt unabhängig von der applizierten Streckenenergie E_s mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit stetig ab. Da der Zusatzwerkstoff nie vollständig plastifiziert wird, ist bei der Einstellung der beiden Vorschubgeschwindigkeiten v_r und v_z des Handlingsroboters bzw. des Zusatzwerkstoffs darauf zu achten, dass diese prozessbedingt nicht entkoppelt werden können und dadurch immer gleichgesetzt werden müssen.

Untersuchungen zum Einfluss des Zusatzwerkstoffs zeigen, dass der Fügeprozess durch mehrere Faktoren beeinflusst wird. Ein Zusatzwerkstoff mit kreisrundem Querschnitt und naturbelassenem Polymer ist zu bevorzugen. Die maximale Anbindungsbreite, die durch den Querschnitt des verwendeten Zusatzwerkstoffs maßgeblich beeinflusst wird, kann mithilfe eines größeren Zusatzwerkstoffdurchmessers vergrößert werden. Die Einflüsse der Hohlräume unter dem Zusatzwerkstoff bzw. die Strahlformung beim Durchgang des Laserlichtes sowie die 3D-Fähigkeit beschränken den maximalen Durchmesser auf etwa 2,0 mm.

Durch den Einfluss des Zusatzwerkstoffs auf die Strahlkaustik des Laserstrahls und die damit verbundene zusätzliche Fokussierung, ist der Einfluss des Fokusedurchmessers auf das resultierende Fügeergebnis stark begrenzt und erfordert keinerlei besondere Prozessüberwachung.

Einen deutlichen Einfluss auf die Wärmeverteilung und auf das resultierende Fügeergebnis übt die Strahlanstellung des Laserstrahls aus. Ein optimales Fügeergebnis wird bei einem lateralen Anstellwinkel von $\alpha_{lat} = 45^\circ$ mit einer maximalen Toleranz von etwa $\pm 7,5^\circ$ um den Ausgangspunkt erreicht. Abweichungen hin zu größeren Anstellwinkeln haben einen geringeren Einfluss auf das Fügeergebnis als hin zu kleineren. Die longitudinale Strahlanstellung wird durch die Bearbeitungsoptik auf einen Bereich von $\alpha_{long} = [-2^\circ; +8^\circ]$ begrenzt. Kleinere laterale Anstellwinkel führen zu Kollisionen der Bearbeitungsoptik mit den Bauteilen, größere zu Ungenauigkeiten der Zusatzwerkstoffzuführung. Um ein optimales Fügeergebnis zu erzielen, sollte der Bereich von 0° bis $+4^\circ$ nicht unter- bzw. überschritten werden.

Die erforderliche Oberflächenqualität und die realisierbare Nahtgeometrie stellen keine besondere Anforderung an den Fügeprozess. In Bezug auf die Nahtgeometrie ist auf das Vorliegen einer ausreichenden Kante zur taktilen Nahtführung der Bearbeitungsoptik zu achten. Wichtig ist auch die Vermeidung von Fügespalten zwischen den Fügepartnern. Durch Restspalte wird der thermische Kontakt be- oder gar verhindert bzw. die Anbindungsfläche reduziert und damit die Fügenahtqualität negativ beeinflusst. Ein völlig restspaltfreier Kontakt der beiden Fügepartner ist in der Realität nur mit unverhältnismäßigem Aufwand realisierbar. Der Einfluss der Bruchkraftabnahme bei bereits geringen Fügespalten muss während der konstruktiven Auslegung beachtet und vermieden werden.

Neben den Gestaltungsrichtlinien, die sich aus der Untersuchung der Prozess- und Systemparameter ergeben, sind zusätzliche Richtlinien in Bezug auf die verwendete Anlagentechnik zu beachten. So ist die Zugänglichkeit der Bearbeitungsoptik bereits bei der Auslegung und Konstruktion der Bauteile zu beachten. Neben der grundsätzlichen Zugänglichkeit nimmt die Gestaltung des Nahtverlaufes einen hohen Stellenwert ein, die vor allem bei der Umorientierung der Bearbeitungsoptik entscheidend sein kann. Auf eine konstante Vorschubgeschwindigkeit der Handlungseinheit und die Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit des Zusatzwerkstoffs daran ist zu achten.

6.2 Technologische Bewertung

Neben den in Abschnitt 2.2.4.3 dargestellten, allgemeinen Vorteilen der Laserstrahltechnologie für die Bearbeitung von Thermoplasten bietet die in dieser Arbeit vorgestellte Verfahrensvariante des Laserstrahlschweißens thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit Zusatzwerkstoff eine Reihe verfahrensspezifischer Potenziale und Grenzen. In Bild 65 werden diese den vier Kategorien Konstruktion, Fertigung, Werkstück und Funktionsintegration zugeordnet.

Das vorgestellte Verfahren mit der beschriebenen Anlagentechnik ist durch die Integration einer Handlingseinheit sehr flexibel in Bezug auf Bauteil- und Nahtgestaltung. Ein weiterer Vorteil ist die nur einseitig benötigte Zugänglichkeit. Aufgrund des eingeschränkten Anbindungsquerschnittes in der Kehlnaht am Überlappstoß ist das Verfahren trotz der hohen erreichbaren spezifischen Festigkeit nur bedingt für hoch belastete Bauteile geeignet. Neben den Festigkeitsanforderungen ergeben sich durch die Fügeverbindung zusätzlich funktionsintegrative Potentiale, wie die Dichtheit der Naht gegenüber Medieneinflüssen und Dämpfungseigenschaften aufgrund der Elastizität des verwendeten Zusatzwerkstoffs. Die wesentlichen Stärken des Verfahrens liegen in der Fertigung. Der Fügeprozess benötigt keine besonderen Prozessschritte zur Fügeflächenvorbereitung. Keine zusätzlichen Aushärtezeiten werden benötigt, wie dies bspw. das Kleben erfordert. Die Aushärtung ist einzig von der Abkühlzeit der Polymerschmelze abhängig und liegt im Sekundenbereich¹⁷. In Abhängigkeit von der verwendeten Laserstrahlleistung und dem verwendeten Polymerwerkstoff können hohe Prozessgeschwindigkeiten erreicht werden. Daraus resultieren kurze Taktzeiten. Den Fügeprozess bestimmen vor allem die Eigenschaften des Werkstücks. Die optischen und thermischen Eigenschaften werden vor allem durch den verwendeten Polymerwerkstoff sowie die beinhalteten Kohlenstofffasern beeinflusst.

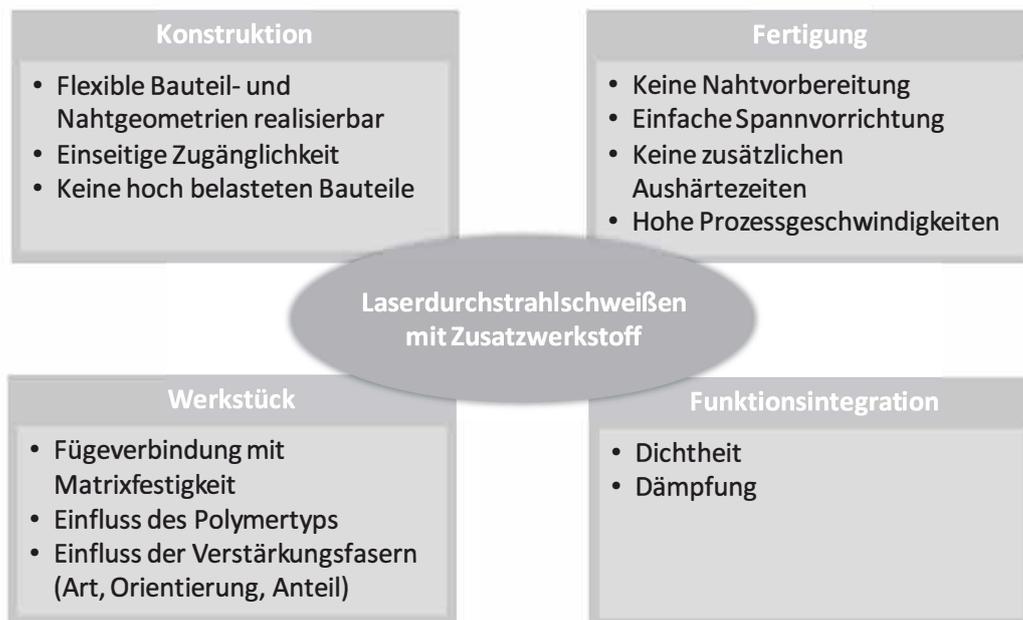


Bild 65: Verfahrenscharakteristika und -potenziale des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff

Das technologische Potenzial des Verfahrens wird anhand eines Praxisbeispiels aus dem automobilen Karosseriebau mit typischer Bauteilgröße und Stückmenge aufgezeigt. Die Fügeaufgabe besteht darin, eine Torsionsversteifung aus endlosfaserverstärktem Organoblech

¹⁷ Je nach Werkstoff und Bearbeitungsparametern zwischen 1 s und 3 s.

(PA 6 CF 42) mit einer Spritzgussheckklappe aus kurzfaserverstärktem PA 6 CF 30 zu fügen (Bild 66). Die Verbindungsaufgabe bildet einen umlaufende Fügenaht mit einer Länge $l_s = 3,0$ m pro Bauteil.

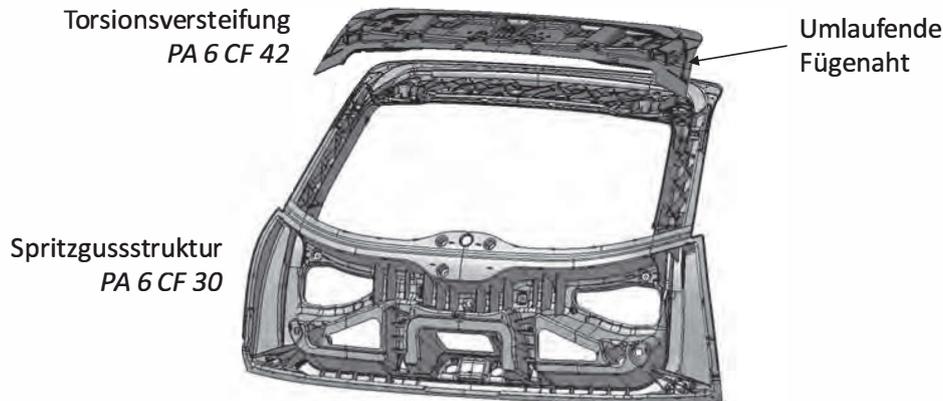


Bild 66: Bauteilgeometrie der untersuchten Heckklappe

Als Referenz dient das alternative Fügeverfahren Kleben. Beim Kleben von Thermoplasten sind je nach Anwendung und Anforderung mehrere Schritte zur Vorbereitung der Fügefläche notwendig [135]. Eine Übersicht der durchgeführten Schweißaufgabe und der verwendeten Anlagentechnik sowie der Vergleich zum Kleben mithilfe eines kalthärtenden 2K-Polyurethan Klebstoffes ist in Tabelle 8 dargestellt. Es werden zum einen die beiden Schritte der Oberflächenaktivierung (Haftgrundierung) und des Klebens, zum anderen der Klebprozess mit vorausgehender chemischer Behandlung der Fügefläche (Kleben gesamt) herangezogen.

Die beiden Vorbehandlungsschritte können vom eigentlichen Fügeprozess entkoppelt werden. Durch diese Parallelarbeit kann die Taktzeit konstant gehalten werden. Dafür muss allerdings je Bearbeitungsschritt ein weiteres Handlungssystem eingesetzt werden. Bei den Positionierzeiten und Verfahrensgeschwindigkeiten handelt es sich um Richtwerte, die anhand von Praxisbeispielen ermittelt wurden. Die Zeiten des Laserstrahlschweißens entsprechen den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werten für die zu schweißende Überlappverbindung mit einer Werkstoffdicke $d_B = 2,0$ mm bei Verwendung des rußdotierten PA 6 CF 42 c.b. und dem naturbelassenen Zusatzwerkstoff mit dem Durchmesser $d_z = 1,6$ mm. Die zugehörigen Bearbeitungsparameter für diese Fügeaufgabe bestehen aus einer Laserleistung von $P_L = 242$ W und einer Schweißgeschwindigkeit von $v_s = 70$ mm/s.

Table 8: Charakteristika der Schweißaufgabe sowie prozesstechnischer Vergleich zwischen dem Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff und dem Kleben

Anlagentechnik	Laserstrahl- schweißen	Aktivieren & Kleben	Kleben gesamt
Robotertyp (Fa. ABB)	IRB 6640	IRB 6640	IRB 6640
Roboteranzahl	1	2	3
Verbindungseigenschaften			
Festigkeit [N/mm ²]	55	6	8
Anbindungsbreite [mm]	1,05	10	10
Bruchkraft der Verbindung [N/cm]	584	600	800
Prozessparameter			
Bearbeitungsschritte	1	2	3
Nahtlänge [m]	3	3	3
Bearbeitungsgeschwindigkeit [mm/s]	70	250	250
Aushärtezeit [s]	5	120	120
Positionierweg [m]	4	8	12
Positioniergeschwindigkeit [mm/s]	100	100	100
Ergebnisse			
Bearbeitungszeit [s]	48	132	132
Positionierzeit [s]	40	40	40
Taktzeit pro Bauteil [s]	88	172	172

Mithilfe eines Technologiewechsels zum Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff und den in Kapitel 5 ermittelten Prozessparametern kann im Vergleich zum Kleben die zur Fertigung eines Bauteils notwendige Taktzeit deutlich reduziert werden (Bild 67). Maßgeblich beeinflusst wird die Taktzeit durch die Aushärtezeit des Klebstoffes, die in etwa 120 s in Anspruch nimmt und damit eine Wartezeit der Anlage generiert. Mithilfe des Laserstrahlfügens kann die Taktzeit in diesem Beispiel um bis zu 49 % gegenüber dem Klebprozess (Aktivieren und Kleben) reduziert werden.

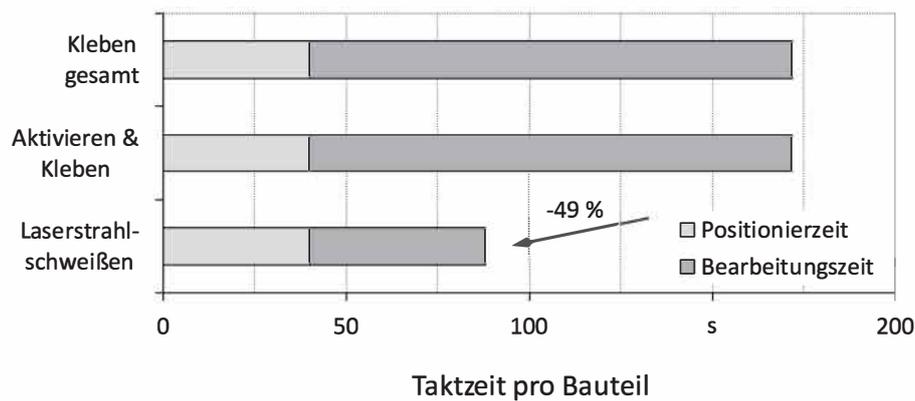


Bild 67: Vergleich der ermittelten Taktzeiten pro Bauteil beim Kleben und beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff

6.3 Wirtschaftliche Bewertung

Entscheidende Faktoren, die eine industrielle Umsetzung des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff hinsichtlich erzielbarer Produktivität und Wirtschaftlichkeit maßgeblich bestimmen, sind neben den realisierbaren Taktzeiten vor allem die Höhe der Investitionskosten für Strahlquelle, Bearbeitungsoptik, Fördereinrichtung des Zusatzwerkstoffs sowie Handhabungs- und Spanntechnik. Trotz der vergleichsweise hohen Anlagekosten ist deren Anteil an den gesamten Herstellungskosten eher gering.

Um eine quantitative Einschätzung des wirtschaftlichen Potenzials zu erhalten, wird für das beschriebene Anwendungsbeispiel eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt (Tabelle 9). Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an Oefele [117]. Das berechnete Kalkulationsbeispiel zeigt die um fast 55 % (bzw. 20 %) höheren Gesamtkosten der Laseranlage im Vergleich zur Klebeanlage. Werden die Gesamtkosten der Anlagen auf die maximal zu fertigende Bauteilanzahl pro Stunde umgelegt, ist die Laseranlage wegen der deutlich höheren Ausbringung jedoch wirtschaftlicher. Die tatsächliche Kostenkalkulation muss deshalb für beide Fügeverfahren anhand der jeweils zu erwartenden Losgrößen durchgeführt werden.

Table 9: Wirtschaftliche Bewertung des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff und des Klebens

Pos.	Investitionskosten [€]	Laser	Aktivieren & Kleben	Kleben gesamt
1	Strahlquelle / Mischanlage	40.000	20.000	30.000
2	Roboter	20.000	40.000	60.000
3	Schweißzelle und Peripherie	100.000	20.000	20.000
4	Anlagensteuerung	15.000	15.000	15.000
5	Spanntechnik	15.000	20.000	25.000
6	Investitionssumme	190.000	115.000	150.000
	Kostensätze			
7	Personalkosten [€/h]	55,00	55,00	55,00
8	Verbrauchsmaterial [€/m]	0,20	0,50	0,55
9	Betriebskostensatz [€/m ²]	155,00	155,00	155,00
10	Instandhaltungskostensatz [%]	7,00	7,00	7,00
11	Zinssatz [%]	6,00	6,00	6,00
	Kostenrechnung			
12	Nutzungsdauer [a]	5	5	5
13	Arbeitszeit [h/a]	3.520	3.520	3.520
14	Flächenbedarf [m ²]	20	20	20
15	Anlagenverfügbarkeit [%]	85	85	85
16	Gesamttaktzeit [s]	88	172	172
17	Bauteilwechselzeit pro Takt [s]	30	30	30
18	Bauteilanzahl pro Stunde [Stk/h]	26	15	15
19	Kalkulatorische Abschreibung [€/h]	12,70	7,69	10,03
20	Kalkulatorischer Zinssatz [€/h]	1,91	1,15	1,50
21	Betriebskosten [€/h]	0,88	0,88	0,88
22	Instandhaltungskosten [€/h]	0,89	0,54	0,70
23	Maschinenstundensatz netto [€/h]	22,49	16,72	19,41
24	Anzahl der Maschinenbediener	0,25	0,25	0,25
25	Gesamtkosten der Anlage [€/h]	36,24	30,47	33,16
26	Verbrauchsmaterialkosten [€/Bauteil]	0,60	1,50	1,65
27	Fügekosten pro Bauteil [€/St.]	2,00	3,51	3,84

In Bild 68 sind die gesamten Fügekosten pro Bauteil, der mittels Laserstrahlfügen und Kleben hergestellten Heckklappen für unterschiedliche Stückzahlen gegenübergestellt. Der aufgeführte Kostenvergleich zeigt, dass die Verwendung einer Laseranlage bei einer Nutzungsdauer von 5 Jahren im Zweischiebtbetrieb bereits ab einer geforderten Bauteilanzahl von 7 Stück pro Stunde (bzw. 3 bei gesamthafter Betrachtung) wirtschaftlicher ist, als die Verwendung einer Klebeanlage. Die Kosten pro Bauteil bei maximaler Bauteilanzahl pro Stunde der Verfahren schlagen

mit 2,00 € beim Laserstrahlfügen und 3,51 € bzw. 3,84 € beim Kleben zu Buche. Damit ist das Klebeverfahren um 76 % bzw. 92 % teurer als das konkurrierende Schweißverfahren. Da Klebeanlagen aufgrund der im Vergleich zu Laseranlagen hohen Taktzeiten in ihrer Bauteilausbringung beschränkt sind, ergeben sich bei Steigerung der Bauteilausbringung zusätzlich kürzere Investitionsstufen, die die Wirtschaftlichkeit negativ beeinträchtigen (Bild 68). Weitere Aufwände für zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahmen werden in der Kostenbetrachtung nicht berücksichtigt.

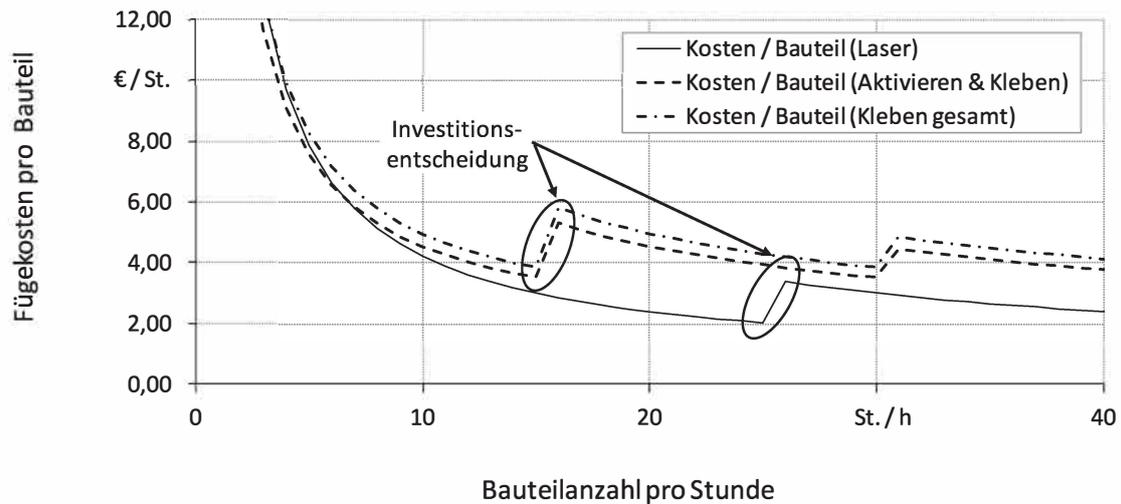


Bild 68: Gesamte Fügekosten pro Bauteil für unterschiedliche Losgrößen

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse erweitern den Stand der Technik um folgende Aspekte:

- Das Laserstrahlschweißen von Thermoplasten mit spezifischem Zusatzwerkstoff bietet neue Möglichkeiten in der industriellen Applikation des Kunststofflaserstrahlschweißens. Die verfahrensspezifischen Vorteile können so der Füge-technik kohlenstofffaser-verstärkter Thermoplaste zugänglich gemacht werden.
- Strahlungsabsorption findet beim Fügen kohlenstofffaserverstärkter Thermoplaste fast ausschließlich an den Verstärkungsfasern statt. Die umliegende Matrix muss über Wärmeleitung erhitzt werden. Mithilfe von Pigmentruß können die Absorptionseigenschaften verbessert werden. Höhere Bruchkräfte bei gleichzeitig möglicher Steigerung der Prozessgeschwindigkeit sind die Folgen.
- Eine entscheidende Rolle des Verfahrens spielt der Zusatzwerkstoff. Eine hohe Transparenz ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Applikation. Ein kreisrunder Querschnitt ist zu bevorzugen.
- Die Verfahrenscharakteristika des Fügeprozesses sind dem konventionellen Laserdurchstrahlschweißprozess sehr ähnlich. Der Prozess verhält sich sehr robust gegenüber den meisten Störgrößen, wie bspw. der Oberflächenqualität.
- Anhand einer Wirtschaftlichkeitsbewertung wird gezeigt, dass das Verfahren Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff eine konkurrenzfähige Lösung zum alternativen Klebeverfahren darstellt. Die Taktzeit kann deutlich reduziert werden.

Kontinuierlich kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe kommen immer häufiger zum industriellen Einsatz um hochintegrierte, belastbare und dennoch leichte Bauteile in Serie herzustellen. Die vornehmlich mechanischen bzw. adhäsiven Fügeverfahren sind oft nur bedingt faserverbundgerecht bzw. schwer automatisierbar. Die Substitution der duroplastischen Matrix durch thermoplastische Werkstoffe ermöglicht neben verbesserten Eigenschaften im Rohstoffhandling, der Bauteilherstellung und im Recycling aufgrund der chemischen Eigenschaften das große Potenzial der Schmelzschweißbarkeit und ein großes Automatisierungspotenzial. Studien zufolge besteht zum Fügen thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe noch erheblicher Forschungsbedarf, wobei dem Kleben und Schweißen das größte Potenzial zugerechnet wird. Der Laserstrahlschweißprozess gilt aufgrund seiner lokalen Energieeinbringung, der hohen Fertigungsqualität und vor allem der hohen Flexibilität und Reproduzierbarkeit als ein industriell weit verbreitetes Fügeverfahren für unverstärkte und kurzglasfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe. Die optischen Eigenschaften der verwendeten Polymerwerkstoffe spielen eine entscheidende Rolle. Die Verbindung artgleicher kohlenstofffaserverstärkter Thermoplaste ist dadurch ausgeschlossen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Laserdurchstrahlschweißprozess im Hinblick auf die Anwendbarkeit für genau diese Werkstoffkombination weiterentwickelt. Ziel ist die Entwicklung einer prozesstechnischen Lösung, die Identifikation der Haupt- und Nebeneinflussgrößen sowie die Bewertung hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Schweißnahtqualität. Hierfür wird das Verfahren des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff vom Laserdurchstrahlverfahren abgeleitet und die zugehörige Anlagentechnik in einer Prototypenanlage umgesetzt. Anschließend werden die zu untersuchenden Prozess- und Systemparameter anhand vollfaktorieller Voruntersuchungen sowie der Hilfe von Expertenwissen ausgewählt. Die Analyse der Verbindungsbildung wird vorrangig anhand thermischer Messverfahren, mithilfe von Querschleifen und Zugscherversuchen ausgewertet. Zusätzlich wird zum besseren Verständnis des Strahlengangs und der Strahlformung eine Raytracingsimulation durchgeführt.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und untersuchte Prozessvariante des Laserstrahlschweißens zeichnet sich vor allem durch die Verwendung eines thermoplastischen Zusatzwerkstoffs als Haftvermittler aus. Dieser wird in Form eines endlosen Monofilaments aus unverstärktem Matrixwerkstoff zugeführt. Gefügt wird in der Kehlnaht der Überlappverbindung. Neben den beschriebenen Kehlnähten wird auch die Eignung für Stumpfstöße in V- und X-Nahtform nachgewiesen. Während des Fügeprozesses trifft die Laserstrahlung auf den lasertransparenten Zusatzwerkstoff, wird zu einem großen Anteil transmittiert, von den beiden Fügepartnern absorbiert und in Wärme umgewandelt. Der lasertransparente Zusatzwerkstoff wird anschließend über Wärmeleitungseffekte erwärmt und aufgeschmolzen bis eine stoffschlüssige Verbindung entsteht.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass sich das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff sehr ähnlich dem konventionellen Laserdurchstrahlschweißprozess verhält. Dennoch weist es verfahrensspezifische Charakteristika auf, wie bspw. eine deutliche Abhängigkeit von der Wechselwirkungszeit des Laserstrahls mit den Fügepartnern. Grund dafür ist die Transparenz des Matrixpolymers für die verwendete Laserstrahlung. Die Strahlung wird nahezu ausschließlich an den Verstärkungsfasern absorbiert und die umliegende Matrix muss über Wärmeleitung erhitzt werden. Abhilfe dafür schafft die gezielte Modifikation des Polymerwerkstoffs mithilfe von Pigmentruß zur Verbesserung der Absorptionseigenschaften. Dieser Schritt ermöglicht eine Steigerung der maximalen Bruchkraft bei gleichzeitiger Steigerung der Prozessgeschwindigkeit. Der Aufbau des verwendeten Polymerwerkstoffs hat durch seine anisotropen Wärmeleitungseigenschaften einen deutlichen Einfluss auf die resultierende Temperaturverteilung in der Fügezone. Inhomogenitäten der Strahlungsintensität bzw. der Absorption können so unterschiedlich gut ausgeglichen werden. Eine entscheidende Rolle für das vorgestellte Verfahren spielt der lasertransparente Zusatzwerkstoff, dessen Eigenschaften von mehreren Faktoren beeinflusst werden. Ein Zusatzwerkstoff mit kreisrundem Querschnitt ist zu bevorzugen. Allerdings können sich die entstehenden Hohlräume unter dem Zusatzwerkstoff sowie die Strahlformung beim Durchgang der Laserstrahlung negativ auf den Fügeprozess aus-

wirken. Dadurch wird der maximale Durchmesser auf etwa 2,0 mm beschränkt. Modifizierungen des Zusatzwerkstoffs hinsichtlich Form und Additivierung führen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu keiner Verbesserung der Versuchsergebnisse. Die meisten Systemparameter, wie Oberflächenqualität und Fügespalt zeigen keinen großen Einfluss auf das Fügeverfahren.

In der abschließenden technologischen und wirtschaftlichen Bewertung des Fügeverfahrens wird gezeigt, dass mithilfe eines Technologiewechsels zum Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff und den in dieser Arbeit ermittelten Prozessparametern im Vergleich zum alternativen Klebeverfahren eine deutliche Reduzierung der zur Fertigung eines Bauteils notwendige Taktzeit erreicht wird. Die Amortisierung der höheren Gesamtkosten der Laseranlage durch die höhere Ausbringung (Bauteilanzahl pro Stunde) ist nicht zuletzt der Verdienst der erreichten, verkürzten Taktzeiten.

Gleichzeitig wird aber deutlich, dass weiterer Forschungsbedarf besteht. Insbesondere stellen die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten CFK-Werkstoffe typische Vertreter der Anwendungsfelder Luftfahrt und Automobilbau dar. Um eine verallgemeinerte Aussage hinsichtlich der Eignung unterschiedlicher Polymerwerkstoffe für das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff treffen zu können, sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Um vertiefende Erkenntnisse zu erlangen, bedarf es einer genaueren Beschreibung der Absorption der Laserstrahlung in den oberflächennahen Schichten und an den Fasern des laserabsorbierenden Faserverbundwerkstoffes inklusive der Wärmetransportmechanismen und den entstehenden Temperaturfeldern. Die Schmelztemperaturbereiche von Polymeren sind sehr eng begrenzt. Erwärmungen der Kunststoffe über die Zersetzungstemperatur hinaus führen leicht zu Bauteilschädigungen. Weiterführende Untersuchungen zur Additivierung des Zusatzwerkstoffs, Optimierung der Geometrie sowie einer Anpassung der Anlagentechnik sollten im Vordergrund stehen. Denkbar wäre bspw. eine Doppelfokusoptik oder die Verwendung eines Hybridschweißkopfes zur gezielten Vorwärmung der Fügezone.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnen Erkenntnisse bilden die Grundlage für eine Vielzahl potenzieller Anwendungen. Der Einsatz des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff ist damit als attraktive Alternative zu bestehenden Verfahren zu bewerten.

8 Summary and future work

The most important scientific insights of this work to increase the current state of the art are:

- The process of laser beam welding using filler material offers new possibilities for industrial applications. Advantages of laser technology can now also be used for joining of carbon fiber reinforced thermoplastics.
- The laser radiation is absorbed by the fibers only, when joining carbon fiber reinforced thermoplastics. The surrounding matrix has to be heated via heat conduction. The additional use of carbon black for absorbing particles within the matrix polymer can improve the absorption behavior. Improving seam strengths as well as higher possible feeding rates are the consequence.
- One of the most important factors for the process is the filler material. A high transparency is the basic requirement for a successful application. A circular shaped filler material is preferable.
- The process-specific characteristics are very similar to those of conventional laser transmission welding. It is a stable process where disturbances like surface quality have no significant influence.
- The feasibility study shows, that laser welding using filler material is competitive to the gluing process, which is the current state of the art for joining carbon fiber reinforced thermoplastics. Also the cycle times can be reduced significantly.

Continuous fiber reinforced thermoplastics are increasingly being used for series production of highly integrated, lightweight parts with high load capacity. The commonly used mechanical or adhesive joining technologies are not entirely fiber bond appropriate and difficult to automate. Therefore, laser welding using filler material offers the opportunity to join two opaque joining partners like carbon fiber reinforced thermoplastics by using process specific advantages of laser welding technology. The main objective of this research is the development of the process technology, the identification of the influencing factors and the investigation of their influence on the weld seam quality.

Therefore the process of laser welding using filler material is derived from the current laser transmission welding process and implemented in a prototype system. A key differentiator of the newly developed process is the usage of a thermoplastic filler material as adhesive promoter, provided as an endless monofilament comprising unreinforced matrix material. While the welding process radiation passes through the transparent filler material, it is absorbed by the two joining partners. The transparent filler material is melted by influence of the absorbed laser energy and the heat flow from the two joining partners to the filler material. Besides preferable fillet welds, v- and x-welds are also possible.

The experimental studies show that process characteristics of laser welding using filler material are very similar to current state of the art laser transmission welding. Nevertheless it shows specific behavior like increased dependence on the interaction time between the laser beam and the joining partners. Therefore the reason is the transparency of the matrix polymer. The radiation is absorbed by the reinforcing fibers only and the surrounding matrix material has to be heated via heat conduction which takes time. The additional use of carbon black as absorbing particles within the matrix polymer can improve the absorption behavior. Improving seam strengths as well as higher possible feeding rates at the same time are the consequence.

The composition of reinforced thermoplastic significantly influences the resulting temperature in the joining area due to its anisotropic heat conduction properties. This leads to different compensation possibilities of inhomogeneous intensity distribution. The optical properties of the filler material are very important for the process and are affected by several factors. A high transparency is the basic requirement for a successful application and a circular shaped filler material is preferable. Upcoming cavities and beam formation limit the maximum diameter to roughly 2.0 mm. Modifications within the filler material concerning shape and additives did not lead to an improvement of the results. Most of the disturbances like surface quality have no significant influence on the process.

The technical and economic evaluation in the end of the work shows that a technology change towards laser welding using filler material. Using the parameters worked out in this investigations offers the possibility to reduce cycle times compared to the bonding process. Thus the higher investment for the laser equipment can amortize its costs after only a short time.

It is also evident, that further investigations are necessary. It will be very important to further define the suitability of different polymer types for the process of laser welding using filler material. Further explanations of the absorption within the surface layers of the polymer and the reinforcing fibers including the thermal transport mechanisms and the resulting temperature areas should be provided.

The melting temperature ranges of polymers are very narrow. Heating above the decomposition temperature leads to partial damages of the parts. Further investigations regarding additives and geometry of the filler material should be carried out. Maybe a double focus- or hybrid laser working head would be a promising possibility for pre-heating the joining area and/or the filler material.

The scientific insights generated in this work are the basis for numerous promising applications. Laser welding using filler material is thus an attractive alternative with respect to the current state of the art joining technologies.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Blankenburg, S.; Kreis, A.: *Gewichtsmanagement – Leichtbau intelligent steuern*. *Lightweight Design* 7 (2014) 6, S. 54-57. ISSN: 1865-4819
- [2] Sobek, W.: *Zum Entwerfen im Leichtbau*. Themenheft Leichtbau (2007), S. 70-82. ISSN: 1861-0269.
- [3] Fischer, F.: *Funktionsintegrative Mischverbunde für den Systemleichtbau*. Diss. Technische Universität Dresden (2011). ISBN: 978-3-8439-0031-7
- [4] DVS Media GmbH (Hrsg.): *Forschungsbedarf zum Fügen von Kunststoffen im Leichtbau und im Bereich der erneuerbaren Energien*, Bd. 294. Düsseldorf: 2012. ISBN: 978-3-87155-612-8.
- [5] Niesing, B.: *Mit Leichtigkeit Energie sparen*. In: Fraunhofer Gesellschaft (Hrsg.): weiter.vorn – Das Fraunhofer-Magazin (2010) 3, S. 8-10. ISSN: 1868-3428.
- [5] Horoschenkoff, A.: *Sensorelement für funktionelle Faserverbundwerkstoffe*. *Lightweight Design* (2014) 2, S. 28-33.
- [6] Dieringa, H.; Drechsler, K.; Evertz, T.; Flaxa, V.; Furrer, P.; Gadow, R.; Georgeou, Z.; Gronebaum, R.-H.; Kainer, K.-U.; Kwiation, N.; Lesch, C.; Leyens, C.; Müller, A.; Otto, M.; Peters, M.; Schöttler, J.; Schulz, T.; Springub, B.; Ziegmann, G.: *Die Leichtbauwerkstoffe für den Fahrzeugbau*. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer 2013, S. 199-442. ISBN: 978-3-8348-2110-2
- [8] Weißenborn, S.: *Wie sich Carbon im Auto fest etabliert*. In: PS - Das Automagazin der WELT. (Hrsg.): WeltN24 GmbH (2014). Berlin. <<http://www.welt.de/motor/article128914187/Wie-sich-Carbon-im-Auto-fest-etabliert.html>> - 14.06.2014.
- [9] Jahn, B.; Karl, D.: *Der globale CFK-Markt*. In: AVK - Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): *Composites Marktbericht 2012*. Frankfurt. <http://www.avk-tv.de/files/20121009_gesamt_marktbericht_2012_2.pdf> - 23.08.2013.
- [10] Fleckenstein, M.; Kaufmann, S.: *Lasermaterialbearbeitung im Automobilbau*. In: *VDI-Z* 143 (2001) 10. S. 31-35.
- [11] Hänsch, D.: *Laserschweißen von Kunststoffen im Automobilbereich*. Die Verbindungsspezialisten. Basel, 16.-18. September 2007.
- [12] Henning, F.; Moeller, E.: *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München: Hanser 2011. ISBN-13: 978-3446422674.

-
- [13] Baron, C.; Börger, H.; Breuer, U. P.; Hinz, B.; Kempe, G.; Lücke, A.; Ostgathe, M.; Sprenger, K. H.; Zepf, H. P.; Ziegmann, G.: *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix*. Renningen-Malmsheim: Expert 1997. ISBN-13: 978-3816913900.
- [14] Jahn, B.; Witten, E.: *Der globale CFK-Markt*. In: AVK - Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): *Composites Marktbericht 2011*. Frankfurt. < http://www.avk-tv.de/files/20110929_marktbericht_2011__deutsch.pdf> - 23.08.2013.
- [15] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: *Werkstoffkunde*. Berlin: Springer 2005. ISBN-13: 978-3642177163.
- [16] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin: Springer 2005. ISBN-13: 978-3540721895.
- [17] Ehrenstein, W.: *Faserverbund-Kunststoffe*. 2. überarb. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN-13: 978-3446227163.
- [18] Ackermann, J.: *Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe*. Diss. FAU Nürnberg-Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2010. ISBN: 978-3-87525-305-4. (Fertigungstechnik Erlangen 212)
- [19] Ewering, J.; Schepper, B.: *Teilkristalline und amorphe Thermoplaste*. *Plastverarbeiter* (2003) 12, S. 40-41
- [20] Ehrenstein, G.: *Polymer-Werkstoffe: Struktur, Eigenschaften, Anwendung*. 3. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN-13: 978-3446422834.
- [21] Erhard, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*. 4. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN-13: 978-3446416468.
- [22] Kaiser, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*. 3. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN-13: 978-3446430471.
- [23] Obermann, C.: *Komplexe Bauteile aus endlosfaserverstärkten Kunststoffen großserientauglich herstellen*. Fachtagung Kunststoffe. Ostwestfalen-Lippe, 27. September 2010.
- [24] Egger, P.; Stock, A.: *Organobleche verlassen das Hochpreissegment*. *MM Composites World* (2011) 2, S. 12-15.
- [25] N. N.: *Das Beste von Zweien - Frontend in Hybridtechnik mit Organoblech*. *Kunststoff Magazin Online*. < <http://www.kunststoff-magazin.de/FVK-Werkstoffe/FVK-Werkstoffe---Organoblech--Fahrzeugbau.htm>> - 17.12.2012.

- [26] Brast, K.: *Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren*. Diss. RWTH Aachen (2001). < http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2001/140/01_140.pdf?origin=publication_detail> - 15.7.2013.
- [27] Ermanni, P.: *Composites Technologien*. Skriptum zur Vorlesung. ETH Zürich 2007.
- [28] Denkena, B.: *Neue Fertigungstechnologien in der Luftfahrtindustrie*. Machining Innovations Conference. Hannover, 22.-23. September 2011. < <http://files.messe.de/cmsdb/GB/004/26117.pdf>> - 21.6.2012.
- [29] TenCate Advanced Composites (Hrsg.): *TenCate Cetex® and CFRT® Thermoplastic Advanced Composites*. Nijverdal (NL): 2013. < http://www.tencate.com/amer/Images/TCAC_ThermoplasticCetex-CFRT-Guide_Web_tcm29-23026.pdf> - 26.4.2013.
- [30] N. N.: *Werkstoffe. Kunststoff Magazin Online*. < <http://www.kunststoffmagazin.de/FVK-Werkstoffe/FVK-Werkstoffe---Organoblech--Fahrzeugbau.htm>> - 26.4.2013.
- [31] Dölle, N.; Eckstein, L.; Goede, M.; Ickert, M.: *Leichtbau-Bodengruppe mit Verstärkungen aus CFK und GFK*. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (2011) 4, S. 256-261.
- [32] Henninger, H.: *Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten*. Diss. TU Kaiserslautern (2005). < <http://d-nb.info/979514851/34>> - 17.07.2012.
- [33] Das, S.: *The cost of automotive polymer composites: A review and assessment of DOE's lightweight materials composites research*. Oak Ridge (USA): 2001. < http://www-cta.ornl.gov/cta/Publications/Reports/ORNL_TM_2000_283.pdf> - 27.08.2013.
- [34] Maimann, T.: *Stimulated optical radiation in ruby*. Nature (1960) 187, S. 493-494.
- [35] Eichler, J.; Eichler, H. J.: *Laser - Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 5. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN-13: 978-3642104619.
- [36] Graf, T.: *Laser. Grundlagen der Laserstrahlquellen*. Wiesbaden: Vieweg 2009. ISBN-13: 978-3834807700.
- [37] DIN 1910-100: *Schweißen und verwandte Prozesse*. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth 2005.

-
- [38] DIN 8593-6: *Fertigungsverfahren Fügen. Teil 6: Fügen durch Schweißen*. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth 2003
- [39] Klein, M.: *Bearbeitung von Polymerwerkstoffen mit infraroter Laserstrahlung*. Diss. RWTH Aachen (1990).
- [40] Hügel, H.: *Laser in der Fertigung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Teubner 2009. ISBN-13: 978-3835100053.
- [41] Demtröder, W.: *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*, 5. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN-13: 978-3540682103.
- [42] Hänsch, D.: *Die optischen Eigenschaften von Polymeren und ihre Bedeutung für das Durchstrahlschweißen mit Diodenlaser*. Diss. RWTH Aachen (2001). Aachen: Shaker 2001. ISBN-13: 978-3826590535.
- [43] Lenz, R. W.; Stein, R. S.: *Structure and Properties of Polymer Films*. New York: Springer 1973. ISBN-13: 978-0306364013.
- [44] Adrio, J.: *Die Strahlungseigenschaften pigmentierter Kunststoffe im Bereich der Temperaturstrahlung*. Diss. RWTH Aachen (1969).
- [45] Hecht, E.: *Optik*. 4. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN-13: 978-3486273595.
- [46] Michel, P.: *Schweißverfahren in der Kunststoffverarbeitung*. Düsseldorf: DVS 1998. ISBN-13: 978-3871556609.
- [47] Bischof, C.; Possart, W.: *Adhäsion: Theoretische und experimentelle Grundlagen*. Berlin: Akademie Verlag 1983.
- [48] Schultz, J.; Nardin, M.: *Handbook of Adhesive Technology*. New York: Dekker 1994. ASIN: B00KL0E0IM.
- [49] Kinloch, A. J.: *Adhesion and Adhesives*. London: Springer 1987. ASIN: B00GUDP7RW.
- [50] Crimmann, P.: *Grenzflächenmodifizierung und -analyse im Polypropylen-Kupfer-Verbund*. Diss. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (2003).
- [51] Gillner, A.; Olowinsky, A.; Reisgen, U.; Roesner, A.; Scheik, S.; Schleser, M.: *Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids*. In: 10th International WLT Conference on Laser in Manufacturing (LiM). München, 23.-26. Mai 2011, S. 370-377. ISSN: 1875-3892.

- [52] Jud, K.: *Bruchmechanische und infrarotspektroskopische Untersuchungen der Interdiffusion von Molekülen in Polymethylmetacrylat und Styrolacrylnitril*. Diss. EPFL Lausanne (1981).
- [53] Bister, E.; Borchard, W.; Rehage, P.: *AutohäSION und tack bei kautschukartigen unvernetzten Polymeren*. *Kautschuk & Gummi* (1976), S. 527-531.
- [54] Gürs, K.; Rüdfler, C.: *Cutting and welding using a CO₂ laser*. *Optics and Laser Technology* (1972) 4, S. 265-269.
- [55] Duley, W. W.; Müller, R. E.: *CO₂ Laser Welding of Polymers*. *Polymer Engineering and Science* (1992) 32, S. 582-584.
- [56] Heil, M.; Korte, J.; Potente, H.: *Laserschweißen von Thermoplasten*. *Plastverarbeiter* (1995) 9, S. 42-46.
- [57] Russek, U. A.: *Laserschweißen von Kunststoffen: Grundlagen, Einflussgrößen, Anwendungen*. In: Die Bibliothek der Technik. Bd. 319. München: Süddeutscher 2009. ISBN-13: 978-3937889900.
- [58] Korte, J.: *Laserschweißen von Thermoplasten*. Diss. Gesamthochschule Paderborn (1998).
- [59] Lützel, R. R.: *Laserdurchstrahlschweißen von teilkristallinen Thermoplasten*. Diss. RWTH Aachen. Mainz: Verlagsgruppe 2005. ISBN: 3-86130-842-8.
- [60] Becker, F.: *Einsatz des Laserdurchstrahlschweißens zum Fügen von Thermoplasten*. Diss. Universität Paderborn (2003): Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-2018-6.
- [61] Potente, H.; De Zeeuw, K.: *Folienschweißen durch Lichtstrahlen*. *TARA* (1975) 312, S. 593-596.
- [62] Grimm, R. A.: *Through-Transmission Infrared Welding of Polymers*. In: Society of Plastics Engineering (Hrsg.): Annual Technical Conference (ANTEC), Indianapolis (USA), 1996. Boca Raton: CRC, S. 1238-1240. ISBN: 1-56676-443-2
- [63] von Busse, L.-A.: *Laserdurchstrahlschweißen von Thermoplasten: Werkstoffeinflüsse und Wege zur optimierten Prozessführung*. Diss. Universität Hannover (2005). Hannover: PZH 2005. ISBN: 3-936888-90-6. (Berichte aus dem LZH 02/2005)
- [64] Haberstroh, E.; Klein, H.; Schulz, J.: *Kunststoffschiweißen - Teil 2: Industrielle Serienfertigung*. *Schiweißen und Schneiden* (2000) 5, S. 272-276.

-
- [65] Hojjati, M.; Immarigeon, J.-P.; Yousefpour, A.: *Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites*. Journal of Thermoplastic Composite Materials (2004) 17, S. 303-340.
- [66] Klein, H. M.: *Laserschweißen von Kunststoffen in der Mikrotechnik*. Diss. RWTH Aachen (2001).
- [67] Bachmann, F. G.; Russek, U. A.: *Laser welding of Polymers Using High Power Diode Lasers*. In: Proceedings of SPIE 5121: Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies, Moskau (RU), 3. September 2003, S. 385-398. ISBN: 978-0-8194-4981-8
- [68] Schulz, J.-E.: *Werkstoff-, Prozess- und Bauteiluntersuchungen zum Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen*. Diss. RWTH Aachen (2002). < <http://d-nb.info/96756025X/34>> - 15.03.2013.
- [69] Russek, U. A.: *Innovative Trends in Laser Beam Welding of Thermoplastics*. In: 2nd International WLT Conference on Lasers in Manufacturing (LiM). München, 24.-26. Juni 2003, S.105-111. ISBN 3-00-011673-7.
- [70] Jansson, A.; Kouvo, S.; Kujanpää, V.: *Simultaneous Laser Welding of Polymers - The Process and Applications for Mass-Production*. International Congress on Laser and electro-optics (ICALEO). Anaheim (USA), 01.-03.November 2005.
- [71] Thielen, C.: *Maskenschweißen von Thermoplasten mittels Laserstrahlung - Eine Prozessidee findet den Weg in die Industrie*. Laser Technik Journal (2008) 4, S. 37-39.
- [72] Hügel, H.: *Strahlwerkzeug Laser*. Stuttgart: Teubner 1992. ISBN-13: 978-3519061342.
- [73] Hinz, O.: *Laserschweißen von Kunststoffen*. maschinenbau - Das Schweizer Industriemagazin (2008) 2, S. 25-29.
- [74] Otto, G.; Kind, H.; Koeppe, A.; Palmen, A.; Poggel, M.; Pöhler, J.; Russek, U. A.; Staub, H.; Wenzlau, C.: *Laser Beam Welding of Thermoplastics*. In: SPIE Proceedings 4977: Annual Conference of Photonics West. San Jose (USA), 25.-31. Januar 2003, S. 458-472. ISBN: 0-8194-4777-3.
- [75] Dirks, H. M.: *Kunststoffschiweißen mit Laser*. Technologieseminar Kunststoffschweißen mit Laser. Freudenstadt, 28. September 2005.
- [76] Albright, C. W.; Benatar, A.; Ou, B. S.: *Laser weding of polyethylene and polypropylene plates*. Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC). Detroit (USA), 4.-7. Mai 1992.

- [77] Rau, A.; Reinl, S.: *Laserkunststoffschweißen in der industriellen Serienproduktion*. Laser Magazin (2011) 2, S. 17-21.
- [78] DIN EN ISO 1145: *Optik und Photonik. Laser und Laseranlagen. Begriffe und Formelzeichen*. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth 2008
- [79] Bryden, B.: *High power diode laser transmission welding of plastics*. Assembly Automation (2000) 2, S. 136-139.
- [80] Flock, D.; Gillner, A.; Haberstroh, E.; Poprawe, E.; Sari, F.: *Laserdurchstrahlfügen für Mikrosysteme und Halbleitertechnik*. In: Vollertsen, F. et al. (Hrsg.): 4. Kolloquium Mikroproduktion. Bremen, 28.-29. Oktober 2009, S. 63-74. ISBN: 978-3-933762-32-0.
- [81] Gebhardt, A.: *Lasertechnologie*. Skriptum zur Vorlesung. FH Aachen 2010.
- [82] Luft, A.: *Hochleistungs-Diodenlaserstapel hoher Strahldichte*. Diss. RWTH Aachen (2000). Aachen: Shaker 2001. ISBN-13: 978-3826584244.
- [83] Gillner, A.; Poggel, M.; Russek, U. A.: *Fügen mit Licht*. Kunststoffe (2006) 3, S. 50-54.
- [84] Beyer, E.: *Schweißen mit Laser*. Berlin: Springer 1995. ISBN-13: 978-3540526742.
- [85] IMPAC Infrared GmbH (Hrsg.): *Pyrometer-Handbuch*. Frankfurt: 2004.
- [86] Bachmann, F.; Bolognese, L.; Campbell, R.; Engen, P.; Grim, K.; Hempel, M.; Korbee, R.; Lupp, F.; Palfelt, B.; Russek, U. A.: *New Advances in Polymer Laser Welding*. Polyweld Abschlussbericht. <http://www.dsm.com/en_US/downloads/dep/laser_welding_handbook.pdf> - 12.03.2012
- [87] Hänsch, D.; Vatterodt, T.: *Laserschweißen von Kunststoffen: Vielfältige Einsatzmöglichkeiten auch abseits typischer Automotive-Anwendungen*. Laser Technik Journal (2005) 3, S.32-34.
- [88] Ahmeti, K.: *Laserschweißen von Kunststoffen - einfach und sicher zur Serienanwendung*. Schweißtechnische und mechanische Verfahren in der Kunststofftechnologie. Erlangen, 20. Juli 2012.
- [89] Russek, U. A.: *Prozesstechnische Aspekte des Laserdurchstrahlschweißens von Thermoplasten*. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2006. ISBN-13: 978-3-8322-5267-0.

-
- [90] Hoffmann, W.-M.: *Laserdurchstrahlschweißen unpigmentierter Kunststoffe*. Diss. RWTH Aachen: Mainz: Verlagsgruppe 2008. ISBN: 3-86130-862-2.
- [91] Polster, S.: *Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile*. Diss. FAU Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach 2009. ISBN: 978-3-87525-294-1.
- [92] Ferch, H.: *Die Technologie des Beschichtens - Pigmentruße*. Hannover: Vincentz 1995. ISBN: 3-87870-426-7
- [93] Brunnecker, F.; Bühring, R.; Geiger, R.: *Joining with Transparency: Clear-Clear Joints through Welding of Plastics by Laser Beam Process*. Laser Technik Journal (2009) 5, S. 41-49.
- [94] Haberstroh, E.; Hoffmann, W. M.: *Laser transmission welding of transparent plastics parts in micro technology*. RWTH Aachen (2010).
- [95] Devrient, M.; Frick, T.; Schmidt, M.: *Laser transmission welding of optical transparent thermoplastics*. 10th International WLT Conference on Laser in Manufacturing (LiM). München, 23.-26. Mai 2011. Amsterdam: Elsevier 2011, S. 157-165. ISSN: 1875-3892
- [96] Boglea, A.; Olowinsky, A.; Rösner, A.: *New Perspectives for the Absorber Free Laser Welding of Thermoplastics*. International Congress on Laser and electro-optics (ICALEO). Anaheim (USA), 26.-30. September 2010.
- [97] Abed, S.; Knapp, W.: *New applications of laser welding in the field of thermoplastic polymer composites*. International Congress on Laser and electro-optics (ICALEO). Orlando (USA), 29.-31. Oktober 2007.
- [98] Grewell, D.; Kagan, V. A.; Rooney, P.: *Relationship between Optical Properties and Optimized Processing Parameters for Through-Transmission Laser Welding of Thermoplastics*. Journal of Reinforced Plastics and Composites (2004) 23, S. 239-247.
- [99] Clement, S.; Franz, C.; Knapp, W.; Oumarou, M.; Renard, J.: *Laser-bonding of long fiber thermoplastic composites for structural assemblies*. International Conference on Photonic Technologies (LANE). Erlangen, 21.-24. September 2010.
- [100] Batzer, C.: *Polymere Werkstoffe*. Chemie und Physik. Bd. 1. Stuttgart: Thieme 1985. ISBN-13: 978-3136481011.
- [101] DIN 55350: *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik*. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth 1986.

- [102] DVS Richtlinie 2203-2: *Prüfen vonSchweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen – Zugversuch*. Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. Berlin: Beuth 2010
- [103] DVS 2203-4: *Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen – Zeitstand-Zugversuch*. Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V. Düsseldorf: DVS 1997.
- [104] Diedrich, G.; Gaube, E.: *Schweißverfahren für Rohre und Platten aus Hart-Polyäthylen*. *Kunststoffe* (1970) 60, S. 74-80.
- [105] Lietzmann, A.: *Festigkeitsmäßige Auslegung von geschweißten Kunststoffkonstruktionen unter Berücksichtigung von Qualitätsmerkmalen*. Diss. Universität Dortmund (2004). Aachen: Shaker 2004. ISBN-13: 978-3832224516.
- [106] Haberstroh, E.; Menges, G.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. 5. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN-13: 978-3446427624.
- [107] Clemens, M.; Döpfer, J.; Ehrfeld, W.: *Development of low-cost injection moulded micropumps*. International Conference and Exhibition on New Actuators and Drive Systems (ACTUATOR). Bremen, 26.-28. Juni 1996.
- [108] Grosser, U.; Krause, F.; Schulten, S.: *Lasergeschweißter Luftsammler*. *Kunststoffe* 91 (2001) 7, S. 100-102.
- [109] Kerbiguet, J.-G.; Roumadni, H.: *Renault LAST NEW industrialization in LASER PLASTIC TailGate assembling*. 15th European Automotive Laser Applications (EALA). Bad Nauheim, 11.-12. Februar 2014.
- [110] Brecher, C.; Dubratz, M.; Emonts, M.; Kremer.Meyer, A.: *Thermoplastische Organobleche für die Großserie*. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ extra)* (2010) 10, S. 28-32.
- [111] Conrad, M.; Stock, J.; Zäh, M. F.: *Remote Laser Cutting of CFRP: Improvements in the Cut Surface*. International Conference on Photonic Technologies (LANE). Fürth, 12.-15. November 2012.
- [112] Katsiropoulos, C. V.; Labeas, G. N.; Moraitis, G. A.; Pantelakis, S. G.: *Optimisation of laser welding process for thermoplastic composite materials with regard to component quality and cost*. *Plastics, Rubber and Composite* (2009) 38, S. 153-161.
- [113] Herrmann, A. S.; Herzog, D.; Jäschke, P.; Peters, C.; Purol, H.: *Laserstrahlschweißen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe – prozesssicheres Fügen ohne Zusatzwerkstoffe*. *Ingenieurspiegel* (2010) 1, S. 64-66. ISSN:1868-5919

-
- [114] Amend, P.; Frick, T.; Schmidt, M.: *Experimental Studies on Laser-based Hot-melt Bonding of thermosetting Composites and Thermoplastics*. 10th International WLT Conference on Laser in Manufacturing (LiM). München, 23.-26. Mai 2011.
- [115] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5. überarb. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN 978-3-446-43548-3
- [116] HIGHYAG Lasertechnologie GmbH (Hrsg.): *Handbuch PDT*. Stahnsdorf: 2013
- [117] Oefele, F.: *Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen*. Diss. TU München (2012). <<http://mediatum.ub.tum.de/doc/1096019/1096019.pdf>> - 15.09.13.
- [118] Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*. 7. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN-13: 978-3642161728.
- [119] Schübel, K.-D.: *Polymer und Laser*. (Hrsg.): Evonik Industries. Marl: 2008 <<http://www.vestamid.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/VESTAMID/de/broschueren/Polymer%20und%20Laser.pdf>> - 15.06.2013
- [120] DIN EN ISO 527-4: *Bestimmung der Zugeigenschaftenn. Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth 1997
- [121] InfraTec GmbH (Hrsg.): *Benutzerhandbuch VarioCAM high resolution*. Dresden: 2012.
- [122] Eßer, G.; Frick, T.; Gebert, K.; Hopfner, H.; Polster, S.: *Experimental analysis of laser welding of coloured thermoplastics and thermoplastic elastomers*. International Conference on Photonic Technologies (LANE). Bamberg, 21.-24. September 2004.
- [123] Mettler-Toledo GmbH (Hrsg.): *Differential scanning calorimetry for all requirements*. Schwerzenbach (CH): 2000.
- [124] Ehrenstein, G. W.: *Kunststoff-Schadensanalyse: Methoden und Verfahren*. München: Hanser 1992. ISBN-13: 978-3446173293.
- [125] Domininghaus, H.: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. Berlin: Springer 1998. ISBN-13: 978-3184011864.
- [126] Berger, L. I.; Covington, A. K.; Frederikse, H. P.; Fischer, K.; Fontaine, J.-C.; Fuhr, J. R.; Gmehling, J.; Goldberg, R. N.; Hammond, C. R.; Holden, N. E.; et al.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 84. Aufl. New York: Taylor & Francis 2003. ISBN-13: 978-0849304842.

- [127] BASF - The Chemical Company (Hrsg.): *Produktdatenblatt Ultramid B3S*. Ludwigshafen 2013. <http://www.plasticsportal.net/wa/EU~de_DE/Catalog/ePlastics/doc4/BASF/product/ultramid_b3s/.pdf?title=&asset_type=pds/pdf&language=DE&urn=urn:documentum:eCommerce_sol_EU:09007bb2800da90b.pdf> - 17.07.2014.
- [128] Bittmann, E.: *Mit Wärme den Fasern auf der Spur - Thermische Analyse an Polyester- und Polyamidtextilien*. Symposium Textile Materialprüfung. Fulda, April 2009.
- [129] Flemming, M.; Roth, S.; Ziegmann, G.: *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Berlin: Springer 1995. ISBN-13: 978-3540586456.
- [130] Rick, F.: *Lasergerechte Konstruktion*. Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz. Bd. 34. München: Utz 1998. ISBN-13: 978-3931327347.
- [131] Potente, H.: *Fügen von Kunststoffen*. München: Hanser 2004. ISBN-13: 978-3446227552.
- [132] Ahlborn Kunststoffe e.U. (Hrsg.): *Schweißen von Thermoplasten*. Pöggstall (A): 2007. <<http://www.akuplastics.com/attachments/article/5/AKU-Schweissfibel.pdf>> - 16.05.2013.
- [133] Leister Technologies GmbH (Hrsg.): *Kunststoffschweißen mit dem Heißluftschweißgerät*. Kaegiswil (CH): 2002. < http://www.klappenbach.de/P_Kstoff_schw.pdf> - 17.05.2012.
- [134] Böllinghaus, T.; Krause, H.-J.; Weber, G.; Xu, P.: *Bewertung und Vereinheitlichung von gefügten Dünoblechproben für Schwingversuche im Zeitfestigkeitsbereich*. In: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) (Hrsg.): Band 116. Frankfurt: 2002. ISSN: 0933-050 X
- [135] Habenicht, G.: *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6. Akt. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN-13: 978-3540852643.
- [136] Frick, T.; Hofmann, A.: *Hybridschweißen von Kunststoffen - Eine neue Technologie zum Fügen von Makrobauteilen*. Laser Magazin (2006) 1, S. 11-14.
- [137] Boglea, A.; Olowinsky, A.; Roesner, A.: *Laserdurchstrahlschweißen von Thermoplasten - Ein Verfahren erobert den Kunststoffmarkt*. Laser Technik Journal (2008) 4, S. 28-32.

-
- [138] Stollenwerk, J. H.: *Abtragen von gefüllten Elastomeren mit IR-Hochleistungslasern*. Diss. RWTH Aachen (2001). Aachen: Shaker 2001. ISBN-13: 978-3826594694.
- [139] RWTH Aachen (Hrsg.): *Ishikawa-Diagramm*. Aachen: 2013. < http://www.app.wipro-forum.de/file/24/ishikawa_diagramm.pdf> - 02.05.2013.
- [140] Chen, J.-W.; Thielen, C.: *Globo-Welding: Ein innovatives Konzept für das 3D-Laserfügen von Thermoplasten im Durchstrahlverfahren*. Laser Technik Journal (2004) 2, S. 35-38.
- [141] Lehner, C.: *Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahl-Schweißprozesses von Magnesiumdruckguss*. Diss. TU München (2001). München: Utz 2001. ISBN: 978-3-8316-0004-5.
- [142] Ruf, A.: *Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern*. Diss. Universität Stuttgart (2004). München: Utz 2004. ISBN: 978-3-8316-0372-5.
- [143] Kull, H.-J.: *Laserphysik: Physikalische Grundlagen des Laserlichts und seiner Wechselwirkung mit Materie*. 2. Aufl. Oldenbourg: De Gruyter 2014. ASIN: B0138NC68Y
- [144] Bauer, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T. A.; Saechtling, H.; Schmachtenberg, E.: *Kunststoff Taschenbuch*. 30. Aufl. München: Hanser 2007. ISBN: 3446403523

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

Band 28: Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.

Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.

Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.

Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.

Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.

Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.

Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.

Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.

Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.

Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.

Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.

Band 42: Armin Gropp
**Anlagen- und Prozessdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

- Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.
- Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
- Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
- Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
- Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
- Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.
- Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.
- Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.
- Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2
- Band 54: Thomas Rebhan
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3
- Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5
- Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1
- Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

- Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D–Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA–Anwendungen über einem STEP–Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt– und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen zur Prozeß– und Programoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus–Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs– und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schuberth

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**

216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetchnologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
**Oberflächenbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebe-
ne in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion

128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen

178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung

161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)

165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren

122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion

155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften

122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten

181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik

176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion

152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile

126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung

111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen

148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte

Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren –

Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung:

Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme

für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise

für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile

bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit

in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung

des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum

Laserstrahlintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit

trockenschmierstoffbeschichteter

Aluminiumbleche im Presswerk

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie,

zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle

120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-237-3

- Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien – System- und Prozesstechnik
154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1
- Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X
- Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3
- Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8
- Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2
- Band 176: Attila Komlódi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9
- Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7
- Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0
- Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9
- Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8
- Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6
- Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Vökl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5
133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion
149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärzbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoren zur Schwerpunktlagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahl-schweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

- Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8
- Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5
- Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6
- Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3
- Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0
- Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlenschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4
- Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8
- Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5
- Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2
- Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8
- Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2
- Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen
147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8

Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung

154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9

Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose

182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6

Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen

113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-357-3

Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau

178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-358-0

Band 245: Anja Neumann

Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk

162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-360-3

Band 246: Ulf-Hermann Quentin

Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen

137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-361-0

Band 247: Erik Lamprecht

Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-362-7

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium

148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-363-4

Band 249: Paul Hippchen

Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung

163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-364-1

Band 250: Martin Zubeil

Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren

171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-365-8

Band 251: Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik

142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-367-2

Band 252: Thomas Albrecht

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen

198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-368-9

Band 253: Florian Risch

Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles

185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-369-6

Band 254: Markus Weigl

Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen

184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-370-2

Band 255: Johannes Noneder

Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen

161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-371-9

Band 256: Andreas Reinhardt

Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger

123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-373-3

Band 257: Tobias Schmuck

Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation

151 Seiten, 74 Bilder 2014.

ISBN 978-3-87525-374-0

Band 258: Bernd Eichenhüller

Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen

127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-375-7

Band 259: Felix Lütteke

Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren

152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tabellen 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4

Band 260: Martin Grüner

Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium

144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-379-5

Band 261: Christian Brock

Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition

126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-380-1

Band 262: Peter Vatter

Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode

145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-381-8

Band 263: Florian Klämpfl

Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung

169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-384-9

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten

133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-385-6

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings

177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen

137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven

138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung

154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge

166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge

164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren

170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tabellen 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten

156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-395-5

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma

136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-396-2

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen

136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-397-9

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen

169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-398-6

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates

158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-399-3

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung

188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-401-3

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene

157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-402-0

Band 279: Fabian Zöllner

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation

126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-403-7

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen

147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-404-4

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation

177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-405-1

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik

156 Seiten, 80 Bilder, 27 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-406-8

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse

155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-407-5

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht

118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-408-2